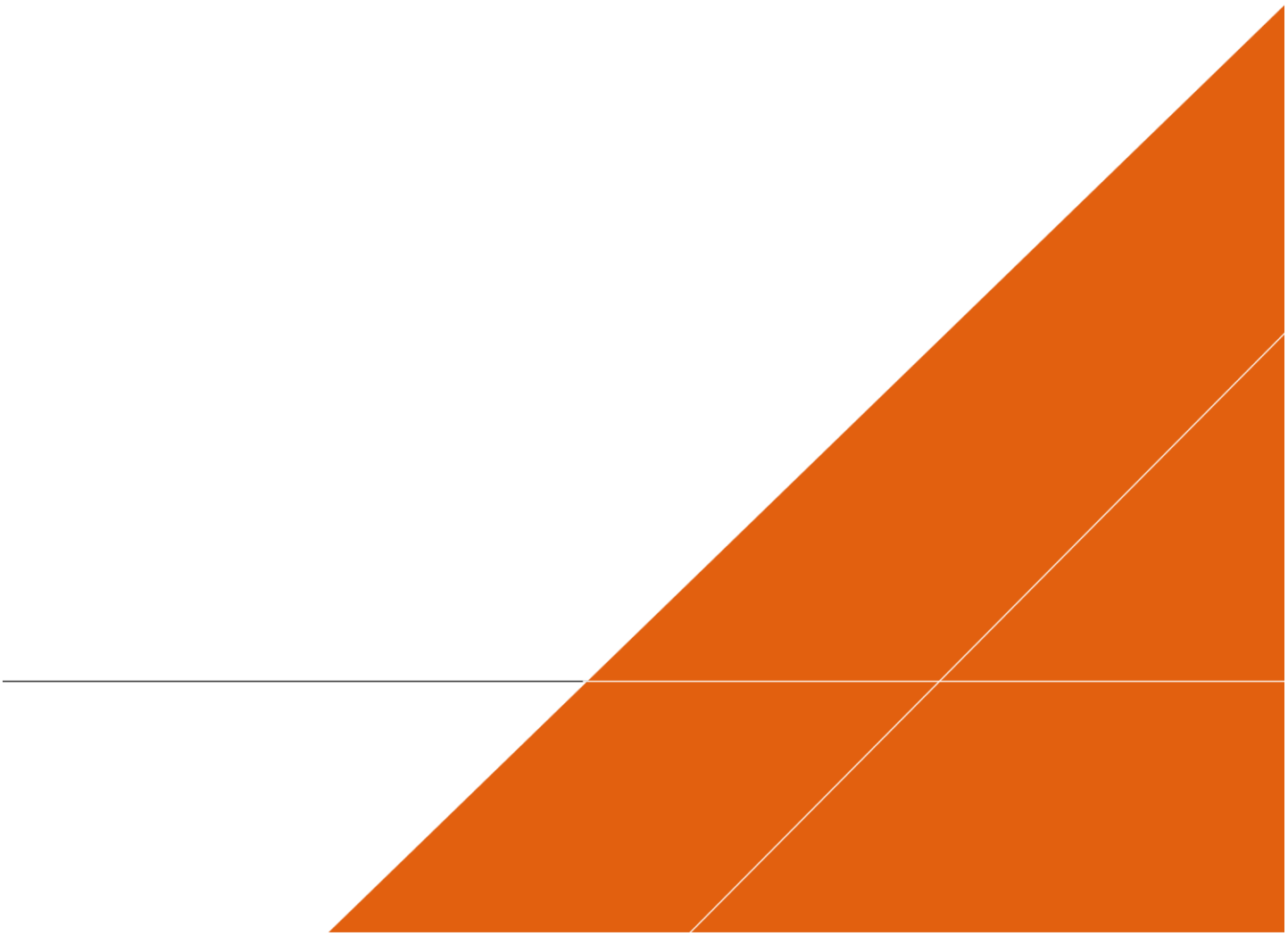
- Bijlage 3 Passende beoordeling 20 mei 2020
- Bijlage 7 SRA winningsplan Ternaard
- Bijlage 9 Documenten van Dijkenstudie

ARCADIS Design & Consultancy for natural and built assets

PASSENDE BEOORDELING GASBORING EN GASWINNING TERNAARD

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

20 MEI 2020



Contactgegevens

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland

INHOUDSOPGAVE

1 INLEIDING 7
1.1 Het project 7
1.2 Initiatiefnemer en bevoegd gezag 8
1.3 Leeswijzer 8
2 VOORGENOMEN ACTIVITEIT 9
2.1 Fasen van de activiteit 9
2.1.1 Aanlegfase 10
2.1.2 Winningsfase 12
3 GASWINNING ONDER DE WADDENZEE 15
3.1 Inleiding 15
3.2 Dynamiek van de Waddenzee 17
3.2.1 Morfologie van de kombergingsgebieden 17
3.2.2 Het sedimentdelende systeem en het transport van water, zand en slib 18
3.2.3 Langjarige ontwikkelingen op de schaal van het sedimentdelende systeem 21
3.2.4 Kwelders 24
3.3 De Hand aan de Kraan-systematiek 27
3.3.1 De drie uitgangspunten van de Hand aan de Kraan-systematiek 27
3.3.2 Uitgangspunt 1: Het meegroeivermogen van de Waddenzee 28
3.3.3 Uitgangspunt 2: De snelheid van zeespiegelstijging 28
3.3.4 Uitgangspunt 3: De bodemdalingssnelheid 29
3.3.5 De Meet- & Regelcyclus 31
3.3.6 Ecologische monitoring 32
3.3.7 Bevoegdheid, taakverdeling en rapportage 33
3.3.8 Extra volume zandsuppleties 35
3.3.9 Gaswinning Ternaard en de Hand aan de Kraan-systematiek 35
3.3.10 Hand aan de Kraan systematiek in de praktijk 37
4 WERKEN BINNEN DE GEBRUIKSRUIMTE 40

5 BEOORDELINGSKADER 43
5.1 Wet natuurbescherming 43
5.2 Effecten van stikstofdepositie 43
5.2.1 Zelfstandige beoordeling stikstofdepositie 43

6 AFBAKENING EFFECTEN 44
6.1 Natura 2000 44
6.1.1 Mogelijke effecten 44
6.1.2 Studiegebied Natura 2000 45
6.2 Effecten en reikwijdte 46
6.2.1 Oppervlakteverlies tijdens aanleg 46
6.2.2 Verstoring tijdens aanleg 46
6.2.3 Verandering populatiedynamiek (sterfte) tijdens aanleg 49
6.2.4 Verzuring en vermesting tijdens aanleg 51
6.2.5 Verdroging en vernatting tijdens aanleg 52
6.2.6 Bodemdaling tijdens winning 53
6.2.7 Extra volume zandsuppleties tijdens winning 53
6.3 Samenvatting 56

7 AANWEZIGHEID NATUURWAARDEN 58
7.1 Inleiding 58
7.2 Morfologische kenmerken van het studiegebied 58
7.2.1 Grootschalige sedimentatie 58
7.2.2 Plaatareaal, droogvalduur 59
7.2.3 Wadvogels en droogvallende platen 62
7.2.4 Sedimentsamenstelling 63
7.2.5 Kwelders 63
7.2.6 Kustdynamiek en zandsuppleties 65
7.3 Natura 2000-gebieden 68
7.3.1 Waddenzee 69
7.3.2 Noordzeekustzone 72
7.3.3 Duinen Ameland 73
7.3.4 Duinen Schiermonnikoog 74
7.4 Samenvatting 74

8 EFFECTBEPALING 83
8.1 Inleiding 83
8.2 Morfologische effectbepaling 83
8.2.1 Grootschalige sedimentatie 83

8.2.2 Plaatareaal, droogvalduur 84
8.2.3 Sedimentsamenstelling 86
8.2.4 Kwelders 86
8.2.5 Conclusie 87
8.3 Ecologische effectbepaling 87
8.3.1 Aanlegfase 87
8.3.2 Winningsfase 89
8.3.3 Extra volume zandsuppleties 91
8.3.4 Cumulatie 92
8.4 Conclusie effectbepaling 95

9 EFFECTBEOORDELING 98
9.1 Inleiding 98
9.2 Passende beoordeling effecten stikstofdepositie 98
9.2.1 Effecten 98
9.2.2 Mitigatie 99
9.2.3 Natura 2000-gebied Waddenzee 99
9.2.4 Natura 2000-gebied Noordzeekustzone 101
9.2.5 Natura 2000-gebied Duinen Ameland 101
9.2.6 Natura 2000-gebied Duinen Schiermonnikoog 102
9.2.7 Samenvatting passende beoordeling effecten stikstofdepositie 103
9.3 Passende beoordeling effecten zandsuppleties 103
9.3.1 Effecten 103
9.3.2 Mitigatie 104
9.3.3 Beoordeling 106
9.4 Conclusies 106
9.5 Monitoring 106

10 LITERATUUR 108

BIJLAGEN

BIJLAGE A VERSTORINGSCONTOUREN 114

BIJLAGE B UITGANGSPUNTEN EN RESULTAAT AERIUS BEREKENING 119

BIJLAGE C NATURA 2000 INSTANDHOUDINGSDOELEN 123

BIJLAGE D MONITORINGSPROGRAMMA 129

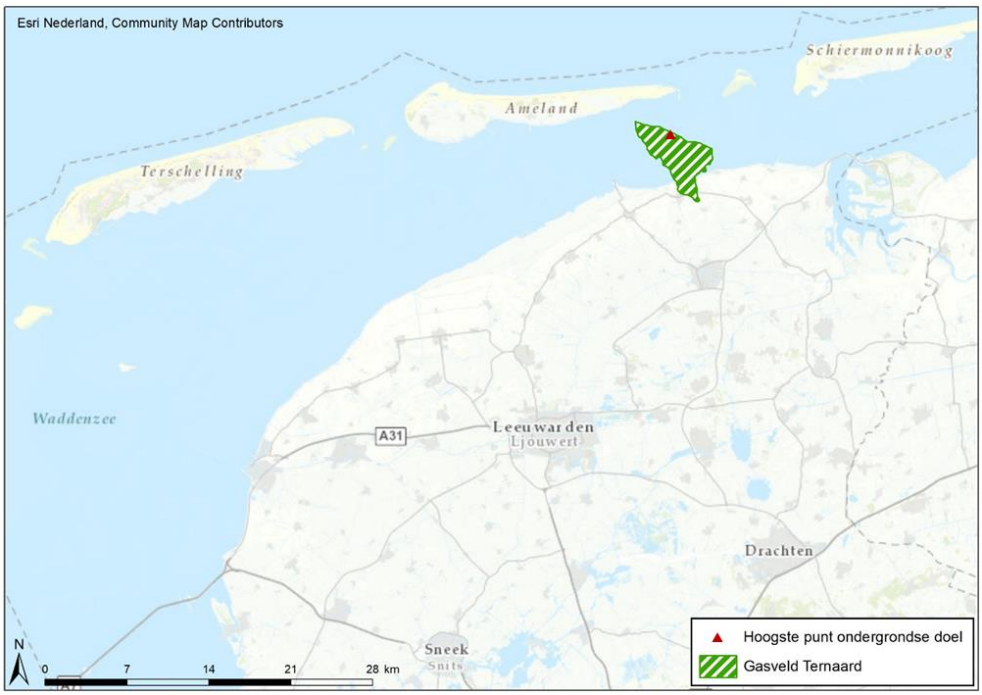
BIJLAGE E ADDENDUM MONITORINGSPROGRAMMA 130

COLOFON 133

1 INLEIDING

1.1 Het project

De Nederlandse Aardoliemaatschappij B.V. (hierna: NAM) is voornemens een productieboring uit te voeren naar het Ternaard gasveld. Het Ternaard gasveld ligt op ruim 3 kilometer diepte, ten noorden van het dorp Ternaard in de gemeente Noardeast-Fryslân. Een klein deel van dit gasveld ligt onder land. Het grootste deel van dit gasveld ligt onder de Waddenzee – grofweg tussen de kust bij Ternaard en Ameland – onder het kombergingsgebied 'Pinkegat'. In Figuur 1-1 is de ligging van het Ternaard gasveld weergegeven. Om de boring, de winning van het gas en de aanleg van een transportleiding mogelijk te maken wordt een m.e.r.-procedure doorlopen, moet een winningsplan worden goedgekeurd, verschillende vergunningen worden verleend en een inpassingsplan worden vastgesteld. Deze Passende beoordeling vormt het middel waarmee een vergunning van de Wet natuurbescherming aangevraagd kan worden voor de gaswinning, inclusief de hiervoor noodzakelijke voorbereidende werkzaamheden, bij Ternaard.



Figuur 1-1 Ligging Ternaard gasveld

Het doel van het project boring en gaswinning Ternaard is:

> *Het op duurzame, veilige en optimale wijze winnen van het aardgas uit het Ternaard gasveld, binnen de beschikbare gebruiksruimte voor gaswinning in de Waddenzee en met toepassing van het 'Hand aan de Kraan'-principe.*

Uitgangspunt daarbij is dat vigerende vergunningvereisten voor bestaande winningen onder de Waddenzee - ten aanzien van bodemdaling, de gevolgen voor de natuur en het meten en monitoren - op vergelijkbare wijze toegepast worden op de gaswinning uit het Ternaard gasveld. In essentie betekent dit dat gewerkt wordt volgens het Hand aan de Kraan-principe (of HadK-principe). Dit principe houdt in dat de gaswinning wordt beperkt of stilgelegd voordat de natuurgrens (het 'meegroeivermogen') van de Waddenzee dreigt te worden overschreden. Zo wordt voorkomen dat de bodem sneller daalt dan het natte deel van het Waddensysteem kan compenseren door de aanvoer van slib en zand. Hierbij wordt ook rekening gehouden met de zeespiegelstijging. Door deze factoren mee te wegen, kan de 'gebruiksruimte' worden bepaald: de bodemdaling die als gevolg van de gaswinning op mag treden, zonder dat er significant negatieve effecten op het Waddensysteem ontstaan.

1.2 Initiatiefnemer en bevoegd gezag

Initiatiefnemer

De initiatiefnemer voor het project is NAM.

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (NAM)
Schepersmaat 2
9405 TA Assen
Postbus 28000, 9400 HH Assen

Bevoegd gezag

De minister van EZK is onder andere bevoegd gezag voor het besluit over het winningsplan en overige besluiten in het kader van de Mijnbouwwet. De minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) is bevoegd gezag voor de vergunning in het kader van de Wet natuurbescherming. De ministers van EZK en Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (hierna: BZK) zijn bevoegd gezag voor het vaststellen van het inpassingsplan. De voorbereiding en bekendmaking van het MER, het winningsplan, de benodigde vergunningen en het inpassingsplan worden gecoördineerd door het ministerie van EZK.

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Directoraat-Generaal Klimaat en Energie
Directie Warmte en Ondergrond
Bezuidenhoutseweg 73
2594 AC Den Haag
Postbus 20401, 2500 EK Den Haag

1.3 Leeswijzer

Deze Passende beoordeling heeft een opbouw waarin specifieke aandacht is voor de Waddenzee in relatie tot de gaswinning. Dit komt tot uitdrukking in de Hoofdstukken 3 en 4, met de titels *Gaswinning Waddenzee* en *Werken binnen de gebruiksruimte*. In hoofdstuk 3 Gaswinning Waddenzee wordt de lezer stapsgewijs meegenomen in de dynamiek van het zand en slib in de Waddenzee en de response van die dynamiek op de stijgende zeespiegel en bodemdaling. Daarna wordt ingegaan op het HadK-principe, dat is ontwikkeld voor de gaswinning Waddenzee. In het daaropvolgende Hoofdstuk *Werken binnen de gebruiksruimte* wordt kort samengevat hoe vorm wordt gegeven aan de randvoorwaarde dat de gaswinning Ternaard plaats zal vinden binnen de gebruiksruimte, omdat deze randvoorwaarde medebepalend is voor de effectbepaling en -beoordeling.

Voorafgaand aan het hoofdstuk *Gaswinning Waddenzee* is in hoofdstuk 2 de activiteit beschreven. Na het hoofdstuk *Werken binnen de gebruiksruimte* geeft het hoofdstuk 5 het beoordelingskader van de Wet natuurbescherming.

In de daaropvolgende hoofdstukken 6 tot en met 9 vindt de feitelijke effectbeoordeling plaats, waarbij sprake is van een trechtering van de effecten. De afbakening van de effecten van de gaswinning Ternaard is opgenomen in hoofdstuk 6. In dit hoofdstuk wordt aan het begin van het hoofdstuk vastgesteld welke mogelijke effecten kunnen optreden tijdens de aanleg en de gaswinning. Vervolgens wordt onderbouwd welke van de mogelijke effecten zeker geen effecten op de Natura 2000-instandhoudingsdoelen hebben. Het daaropvolgende hoofdstuk 7 geeft een beschrijving van de morfologische kenmerken van het Natura 2000-gebied en van de aanwezigheid van de natuurwaarden. Vervolgens wordt in hoofdstuk 8 Effectbepaling ingegaan op die mogelijke effecten waarvan in hoofdstuk 6 niet met zekerheid kon worden vastgesteld dat deze geen effecten hebben. Ten slotte vindt in hoofdstuk 9 de daadwerkelijke effectbeoordeling plaats.

2 VOORGENOMEN ACTIVITEIT

In dit hoofdstuk is een beschrijving opgenomen van de voorgenomen activiteit, waarbij onderscheid gemaakt wordt in de aanlegfase en de winning (paragrafen 2.1.1 en 2.1.2). Na de beschrijving van deze fasen wordt ingegaan op het Winningsscenario.

2.1 Fasen van de activiteit

Op dit moment staat de Ternaard boring (Figuur 2-1) gepland vanaf medio 2021 met een duur van circa 134 dagen. De totale aanlegfase duurt circa 9 maanden.

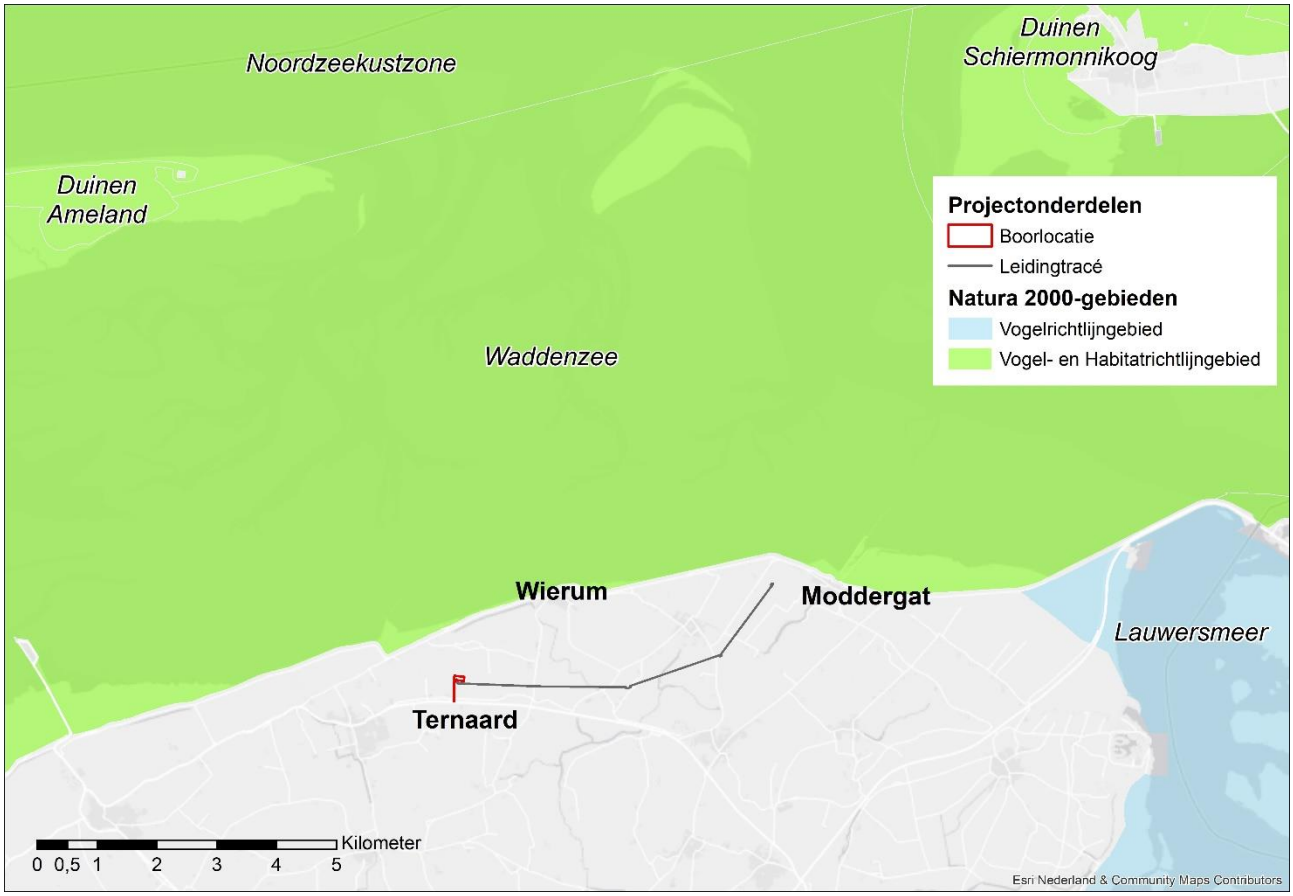
De hoofdzakelijke werkzaamheden die samenhangen met de voorgenomen activiteit op de productielocatie(s) zijn:

- Aanlegfase (zie paragraaf 2.1.1)

  Realisatie van een locatie voor het plaatsen van de boorinstallatie.
  Aanvoeren, opstellen en afvoeren van de boorinstallatie.
  Aanbrengen van een geluidsscherm indien nodig.
  Boren van een nieuwe put met een Deutag T-700 of vergelijkbare boorinstallatie.
  Boorproces.
  Affakkelen van vrijkomend gas.
  Aanleg transportleiding naar Moddergat.

- Winning (zie paragraaf 2.1.2)

  Deze fase omvat de winning van het gas, waarbij het gas getransporteerd wordt van de productielocatie naar Moddergat. Verder zijn er geen nieuwe ontwikkelingen of werkzaamheden die een verwachte milieu-impact hebben, anders dan reeds beschreven in de aanlegfase.



Figuur 2-1 Ligging Boor/productielocatie (rode lijn) en het leidingtracé naar Moddergat (groene lijn).

2.1.1 Aanlegfase

Boren

Wat
In 1991 is het veld bij Ternaard al aangeboord. NAM vond toen aardgas, maar ging niet tot winning over omdat de put niet op de juiste locatie in het gasveld stond. Met nieuwe technieken heeft NAM de gegevens van de diepe ondergrond nu opnieuw bestudeerd. NAM verwacht bij een nieuwe boring zo'n 7,57 miljard m^3 aardgas te kunnen winnen. Voordat NAM het aardgas kan winnen, moet een nieuwe gasput worden geboord. Hiervoor moet een productielocatie aangelegd worden vanaf waar NAM de boring uitvoert. De mijnbouwlocatie heeft een ruimtebeslag van 170 meter bij 87 meter. Als blijkt dat het gas in voldoende volume, met voldoende druk aanwezig is en van goede kwaliteit is dan wordt overgegaan tot de winning van het aardgas (zie alinea productietesten, hieronder).

Hoe
Op de productielocatie wordt tijdelijk (ongeveer 4,5 maand) een mobiele (demontabele) boorinstallatie geplaatst van het type Deutag T-700 (zie Figuur 2-2) of een vergelijkbare boorinstallatie van 46 meter hoog. Voorafgaand aan het plaatsen van de boorinstallatie moeten 170 palen worden geheid (Standaard palenplan T-700, NAM b.v.). Heien vindt plaats gedurende enkele weken, waarin de palen worden geplaatst ter verankering van de boorinstallatie en het plaatsen van een stalen conductorpijp voor de boorput (2). De boorinstallatie wordt voorzien van elektriciteit door middel van dieselgeneratoren. De boorinstallatie bestaat uit een boortoren en een 'mudplant' waar boorvloeistoffen, die tijdens het boren in gebruik zijn, worden opgeslagen en behandeld (1).

Voor de aan- en afvoer van de boorinstallatie met bijbehorende apparatuur zijn circa 115 transportbewegingen nodig (2). Met de aanvoer en het opbouwen van de installatie zijn circa 10 dagen gemoeid. Gemiddeld zijn er per dag 3 tot 7 transportbewegingen nodig voor de aan- en afvoer van materiaal. Transport gedurende de nacht wordt vermeden.

Vanaf de productielocatie boort NAM gedevieerd (schuin) naar een punt onder de Waddenzee. Dit punt is het ondergrondse doel in het gasveld waar NAM naartoe wil boren. Omdat gas naar boven beweegt en zich concentreert in het hoogstgelegen deel van het gasveld, is het belangrijk dat het ondergrondse doel het hoogste punt van het gasveld is. Dit hoogste punt bevindt zich in het noorden van het gasveld. Dit punt ligt op een diepte van ongeveer 3400 meter onder NAP.

Op basis van geluidsonderzoek tijdens boringen, is de *noise footprint* van de T-700 vastgesteld. De *noise footprint* is de afstand van de boortoren tot de 60 dB(A) grens rondom de boortoren, conform BARMM-eisen. Dit geluidsniveau mag conform BARMM-eisen 50 dagen optreden en de heiwerkzaamheden vinden tijdelijk plaats, gedurende10-15 werkdagen (3).

Het boren van de put strekt zich uit over een periode van circa 4 maanden, waarin continu (24 uur per etmaal, 7 dagen per week) wordt geboord. Ten behoeve van de boring wordt eerst een zogenaamde boorkelder aangelegd, waarna een stalen buis van circa tachtig meter (de 'stove-pipe') de grond in wordt geheid. Vanaf hier zal de mobiele boorinstallatie het boorgat realiseren. Hiervoor wordt een holle boorstang gebruikt met een beitel die het gesteente tot gruis vermaalt. De beitel boort zichzelf door middel van het eigen gewicht de grond in en wordt verlengd met een nieuwe boorpijp aan de boorstang zodra het einde van de voorgaande boorstang is bereikt (4).

Gedurende de boring wordt continu een boorvloeistof[1] naar beneden gepompt en brengt het boorgruis zodoende omhoog naar de oppervlakte. Door middel van schudzeven, cyclonen en centrifuges wordt het boorgruis uit de vloeistof gefilterd en afgevoerd naar een erkende verwerker. De vloeistof wordt via een gesloten systeem hergebruikt (5).

[1] Indicatie: KPM (boorspoeling op waterbasis); VCM (boorspoeling op oliebasis); diverse boorchemicaliën; cement; kaliumchloride-brine (zoutwateroplossing).

Om het boorgat open te houden, wordt het boorgat verbuisd met stalen bekledingsbuizen (‘casings’). De binnenste casing dient voor het transport van het gas naar de oppervlakte. De buitenste casing wordt met cement aan de boorgatwand bevestigd. Deze casing voorkomt dat de putwand tijdens het boren instort, dat migratie tussen de bodemlagen optreedt en dat gas via het boorgat kan ontsnappen. De put wordt afgewerkt met een veiligheidsafsluiter die ten behoeve van de veiligheid op het boorgat worden gemonteerd. Deze hebben als functie dat ze op elk gewenst moment en – indien noodzakelijk – van afstand kunnen worden gesloten om een blow-out te voorkomen. Het aanwezige gas wordt onderzocht om te bepalen of het winbaar is (productietesten) (5).

De boortoren is tijdens de werkzaamheden verlicht. De lichtuitstraling naar de omgeving wordt beperkt door de verlichting alleen te gebruiken wanneer dat nodig is (bijvoorbeeld alleen wanneer gewerkt wordt), een beperkt aantal lampen in te zetten, ledverlichting toe te passen, de montagehoogte te beperken en de lampen voornamelijk naar het grondoppervlak te richten. Alleen de boorvloer en -toren zijn zichtbaar. De boorinstallatie zal alleen gedurende de aanlegfase aanwezig zijn (5). Tijdens het affakkelen in de aanlegfase wordt de hemel gedurende 2 dagen opgelicht.

Figuur 2-2 Boorinstallatie inclusief boortoren en geluidswanden, zoals deze op de productielocatie eruit zal zien. Deze installatie staat meestal enkele maanden op locatie.

Productietesten

Als de gashoudende formatie is bereikt en gas wordt aangetroffen, worden productietesten uitgevoerd. Hierbij worden gegevens over het productievermogen van de put, de reservoir-technische eigenschappen en de samenstelling van het gas verkregen. Indien het gas niet produceerbaar blijkt, dan wordt de put afgesloten.

Een onderdeel van het testen is het gedurende een korte periode gas produceren uit de put. Het geproduceerde gas en mee geproduceerde vloeistoffen worden gescheiden, waarna het gas wordt afgefakkeld in de tijdelijk aanwezige fakkelinstallatie op de productielocatie. Hiervoor worden 2 fakkels op de productielocatie geplaatst op 21 meter hoogte. Affakkelen gebeurt in drie perioden van 8 uur, verdeeld over 36 uur, daarna nog een periode van 24 uur non-stop (6).

Waar
Om tot een geschikte locatie voor de boring en de winning te komen zijn enkele systematische stappen doorlopen. De ligging van het gasveld is een gegeven en vormde daarmee de start van de zoektocht. Op basis van kansen en belemmeringen vanuit milieutechnische en beleidsmatige overwegingen zoals bodem, verstoring, waterkeringen et cetera is de uiteindelijke productielocatie bepaald. Het voorkeursalternatief (Figuur 2-1) is door de minister van EZK vastgesteld. Het exacte perceel moet nog worden aangekocht.

Aanleg leidingtracé

Wat?
Om het gas te transporteren naar de afnemer moet een nieuwe ondergrondse transportleiding met een diameter van circa 45 centimeter aangelegd worden tussen de productielocatie en de bestaande mijnbouwlocatie Moddergat. Vanuit Moddergat wordt het gas via de reeds bestaande gasleiding naar de gasbehandelingslocatie in Anjum getransporteerd.

De keuze voor Moddergat is gebaseerd op afstand en capaciteit. Moddergat is de dichtstbijzijnde locatie vanaf het gasveld en heeft voldoende capaciteit om deze nieuwe toevoer van gas op het gasnet aan te sluiten. Een alternatieve mijnbouwlocatie, locatie Blija, heeft deze capaciteit niet.

Hoe?
De aanleg van het tracé gebeurt grotendeels ‘in den droge’. Dit betekent dat er een sleuf gegraven wordt die, indien nodig, drooggehouden wordt door het toepassen van bemaling. In deze sleuf wordt vervolgens de leiding gelegd. Met de grondeigenaren en grondgebruikers maakt de NAM afspraken over het uit gebruik nemen van de werkstrook voor (meestal) een volledig groeiseizoen **(7)**. De transportleiding wordt op een diepte van circa 2,00-2,10 meter onder maaiveld aangelegd, om zo de drainagesystemen van de aanwezige landbouw (1,5 meter -mv) te ontwijken.

Op de locatie Moddergat wordt de leiding bovengronds gekoppeld aan de bestaande gasinstallatie (‘tie-in’). Vanaf Moddergat wordt de bestaande leiding gebruikt en zijn er verder geen ingrepen en/of werkzaamheden nodig.

Waar?
De ligging van het leidingtracé wordt in eerste instantie bepaald door het startpunt, de productielocatie, en het eindpunt, locatie Moddergat. Vanaf de productielocatie ligt de leiding met een lichte boog naar de aansluiting bij Moddergat.

2.1.2 Winningsfase

Wat
Wanneer de productieboring succesvol is afgerond en de benodigde vergunningen zijn verkregen, wordt gestart met de winning van aardgas.

Het totale volume in het Ternaard gasveld wordt geschat op circa 25 miljard m^3 (25 billion cubic meters, BCM). Echter, niet al dit gas zal uiteindelijk worden gewonnen. Uitgangspunt voor winning is dat NAM opereert binnen de kaders die in de vergunningen en instemmingsbesluiten zijn gesteld ten aanzien van bodemdaling als gevolg van de overige gaswinningen in het Waddengebied. Hoe dat werkt staat in paragraaf 3.3. Dit betekent een maximale winning van circa 7,57 miljard m^3 voor Ternaard en dit scenario ligt ten grondslag aan de effectbeoordeling. Dit volume wordt geleidelijk gewonnen over een periode van circa 20 jaar, zie hiervoor de ‘voorgenomen gaswinning’ in Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Winningsscenario's gaswinning Ternaard

Ternaard gasproductie		
Jaar	**Minimale scenario x miljard Nm³/jaar**	**Voorgenomen gaswinning x miljard Nm³/jaar (Maximale productie binnen de huidige gebruiksruimte)[2]**
2021	0,069	0,069
2022	0,663	0,731
2023	0,626	0,678
2024	0,540	0,638
2025	0,468	0,558
2026	0,410	0,519
2027	0,358	0,499
2028	0,316	0,475
2029	0,281	0,452
2030	0,250	0,433
2031	0,222	0,412
2032	0,199	0,394
2033	0,177	0,377
2034	0,158	0,361
2035	0,072	0,345
2036	0,000	0,330
2037	0,000	0,302
Totaal	**4,81**	**7,57**

Hoe

In de winningsfase wordt op de productielocatie een productie-eenheid geplaatst (Figuur 2-3). Het gas stroomt vanuit het gasveld naar de productielocatie en via de aangelegde transportleiding tussen de productielocatie naar de bestaande mijnbouwlocatie Moddergat. Het gas wordt vervolgens vanaf Moddergat naar de gasbehandelingslocatie in Anjum getransporteerd.

Daar wordt het gas geschikt gemaakt voor transport naar de afnemer. Er vinden geen wijzigingen plaats op locatie Anjum als gevolg van dit voornemen.

[2] De voorgenomen gaswinning komt overeen met het hoge productiescenario uit het winningsplan Ternaard (NAM, 2019)

Figuur 2-3 Voorbeeld van een productie-eenheid op een productielocatie

Putstimulatie
De opbrengst van een gaswinningsput neemt na verloop van tijd af. Er zijn verschillende manieren om de levensduur van de gaswinning te verlengen. Eén van de methoden is het zogenaamde ‘fracken’, maar dit maakt geen onderdeel uit van het voornemen.

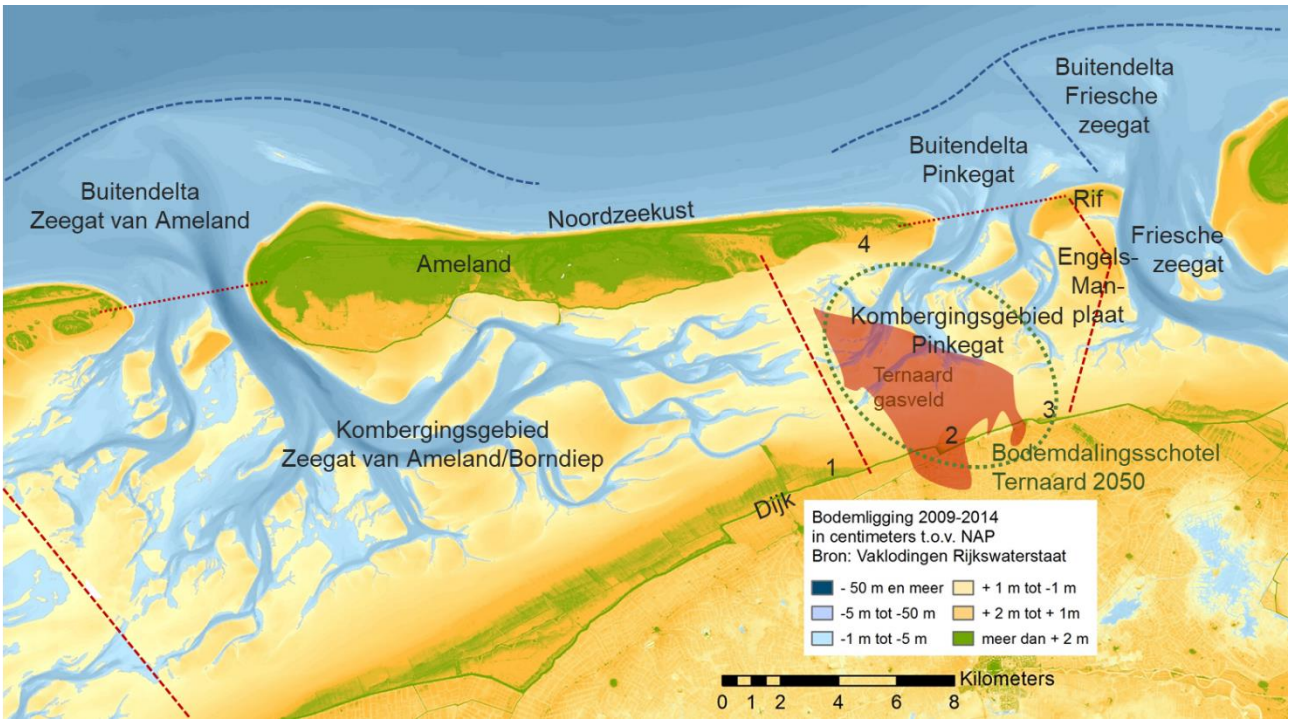
Zandsuppletie
Langs de hele Nederlandse kust worden in opdracht van Rijkswaterstaat zandsuppleties uitgevoerd vanwege het Nederlandse kustbeleid. Het Nederlandse kustbeleid is erop gericht om de positie van de kustlijn in stand te houden en de zandvoorraad van het kustfundament op peil te houden. De daling van de diepe ondergrond door gaswinning leidt in de Waddenzee tot extra sedimentatie van zand en slib, dat afkomstig is van de buitendelta’s en de kust van Ameland. Deze afname van het zandvolume voor de kust is vanuit het vigerende kustbeleid ongewenst en daarom wordt een extra volume zand gesuppleerd. De zandsuppleties omvatten de zandwinning in de wingebieden, het transport van de wingebieden naar de suppletielocaties en het aanbrengen van het zand op de vooroever. Het extra volume aan zand dat zal worden gesuppleerd is het gevolg van de voorgenomen activiteit (de gaswinning).

Waar
De winning vindt plaats vanaf de productielocatie. Behandeling van het gas vindt plaats op de bestaande locatie in Anjum. De zandsuppleties sluiten aan bij de toekomstige zandsuppleties die door Rijkswaterstaat op Ameland zullen worden uitgevoerd.

3 GASWINNING ONDER DE WADDENZEE

3.1 Inleiding

Het gasveld Ternaard ligt voor het grootste deel onder de Waddenzee (Figuur 3-1). De activiteit moet dan ook worden aangemerkt als een project, namelijk gaswinning onder de Waddenzee. Gaswinning onder de Waddenzee is niet nieuw. Het meest recent en meest uitgebreid beoordeeld zijn de waddenwinningen die vanaf de NAM-locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (afgekort MLV) plaatsvinden. Het Rijksprojectbesluit voor gaswinning onder de Waddenzee beziet de winning van deze locaties. In dat Rijksprojectbesluit wordt uitgelegd hoe gaswinning onder de Waddenzee wordt gemanaged en gecontroleerd met het HadK-principe. Mogelijke schade aan de Waddenzeenatuur door gaswinning wordt gegarandeerd voorkomen door deze HadK-systematiek. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de HadK-systematiek werkt en waarop het gebaseerd is. Vervolgens wordt toegelicht hoe de voorgenomen gaswinning uit het gasveld Ternaard onderdeel wordt van deze systematiek. Dit hoofdstuk sluit af met enkele praktijkvoorbeelden van hoe voor de gaswinning in het waddengebied de vinger aan de pols wordt gehouden.



Figuur 3-1 Kaart met de bodemdalingsschotel door gaswinning Ternaard en de kombergingsgebieden in de Waddenzee, buitendelta en de Noordzeekust van Ameland.

Het gas is op circa 3400 meter diep onder de Waddenzee aanwezig in de gasvoerende lagen, waar het gas aanwezig is in de poriën van het gesteente. Gaswinning leidt tot drukdaling in deze gasvoerende lagen. Als gevolg van deze drukdaling en onder invloed van het gewicht van de bovenliggende aardlagen, wordt het gasvoerende gesteente samengedrukt. Dat noemen we compactie. Deze compactie leidt tot een lichte verzakking van de bovenliggende aardlagen en uiteindelijk tot een daling aan het aardoppervlak. Dit fenomeen noemen we bodemdaling. Op het land wordt bodemdaling aan de hand van landmeetcampagnes gemonitord. Daardoor weten we dat bodemdaling boven gasvelden in Nederland typisch enkele centimeters tot decimeters bedraagt. In de Waddenzee is dat anders. Daar meten we geen bodemdaling door gaswinning aan het wadoppervlak. Dit komt enerzijds doordat sediment in de Waddenzee door stroming en golven continu wordt herverdeeld. Anderzijds zorgt een aanvoer van zand en slib vanuit de kustzone en Noordzee ervoor dat er ook op langere termijn geen zandtekort ontstaat. Hoe de processen van erosie en sedimentatie de ontwikkeling van de wadplaten en geulen beïnvloeden en waarom dat belangrijk is om bodemdaling in het Waddengebied tegen te gaan, kunt u lezen in paragraaf 3.2.

In de bovenstaande alinea wordt gesteld dat er een aanvoer is van zand en slib vanuit de Noordzeekustzone naar de Waddenzee. Wat er op hoofdlijnen gebeurt, is dat de golfslag en stroming in de Noordzeekustzone relatief sterk zijn. Deze waterbeweging leidt tot het opwervelen van zand en slib. Met de vloedstroom, stroomt zo sedimentrijk water door de geulen de Waddenzee in. Boven de platen nemen de stroomsnelheden af en bezinken zand en slib. Zo ontstaan en groeien de wadplaten. Deze groei is van belang om de stijgende zeespiegel en de bodemdaling door de gaswinning op natuurlijke wijze te compenseren. Als er meer water het gebied in stroomt, neemt de zand- en slibaanvoer toe (paragraaf 3.2.3). De aanvoercapaciteit van deze natuurlijke transporten van zand en slib is niet oneindig. In het kader van gaswinning onder de Waddenzee is er veel onderzoek gedaan om de grenzen van deze aanvoercapaciteit met zekerheid vast te stellen. Verschillende studies, op basis van berekeningen met andere uitgangspunten en aannames, komen tot uiteenlopende getallen. In de meest voorzichtige berekeningen in de Integrale Bodemdalingstudie uit 1998 is bepaald dat delen van de Waddenzee 3 tot 10 mm per jaar zouden moeten kunnen ophogen (meegroeien) als resultaat van die aanvoercapaciteit (Oost et al., 1998; Hoeksema et al., 2004). Recentere studies komen met veel hogere getallen (Wang et al. 2017; 2018). Voor het Pinkegat, dat is het deel van de Waddenzee waaronder het gasveld Ternaard ligt, zijn meegroeivermogens van 6, 10, 13 en 32 mm per jaar berekend (zie paragraaf 3.3.2).

Het hierboven geïntroduceerde meegroeivermogen van de Waddenzee is onderdeel van de HadK-systematiek om te voorkomen dat onherstelbare verlaging van de wadplaten optreedt door gaswinning onder de Waddenzee. In de kern zorgt de HadK-systematiek ervoor dat de bodemdaling onder de Waddenzee door de gaswinning, opgeteld bij de zeespiegelstijging[3] niet groter wordt dan het meegroeivermogen van het betreffende deel van de Waddenzee. Jaarlijks wordt bepaald hoeveel bodemdaling heeft plaatsgevonden en hoeveel zeespiegelstijging is opgetreden en wordt vooruitgekeken naar de voorspelde bodemdaling en verwachte zeespiegelstijging. Dit wordt gerapporteerd aan het bevoegd gezag en de toezichthouder. Ieder jaar wordt dit opnieuw berekend, op basis van metingen van de bodemdaling onder de Waddenzee. Wanneer de bodemdaling in combinatie met de zeespiegelstijging groter dreigen te worden dan het vastgestelde meegroeivermogen, dan wordt de gaswinning teruggeschroefd. Minder gaswinning leidt tot minder bodemdaling en zo wordt voorkomen dat een onherstelbare verlaging van de wadplaten optreedt door de gaswinning. Dit proces heet de “Meet- en Regelcyclus”. De Meet- en Regelcyclus als onderdeel van HadK-systematiek wordt uitgebreid toegelicht in paragraaf 3.3.5.

De wadplaten groeien dus mee met de stijgende zeespiegel en met de bodemdaling door de gaswinning. Het zand dat daarvoor vanuit de Noordzeekustzone de Waddenzee in getransporteerd wordt, is afkomstig van de eilandkust, de buitendelta en de ondiepe delen van de Noordzee. Samen noemen we deze gebieden het kustfundament. Om de zandvoorraad van het kustfundament op peil te houden, voert Rijkswaterstaat zandsuppleties uit. Rijkswaterstaat heeft als verantwoordelijkheid en tot taak om het volume aan zand dat nodig is om de zeespiegelstijging bij te houden, aan te vullen met zand uit de diepere delen van de Noordzee. Per jaar is dat voor heel Nederland zo’n 12 miljoen kuub zand, dat deels op de stranden en deels onder water voor de stranden wordt gedeponeerd. Voor het deel van de Waddenzee dat we het Pinkegat noemen, komt daar nog een volume zand bij, namelijk het volume aan bodemdaling als gevolg van gaswinning onder het gebied. Zo wordt voorkomen dat gaswinning Waddenzee leidt tot een zandafname in het kustfundament. In paragraaf 3.3.8 wordt zandsuppletie nader besproken.

In aanvulling op de metingen voor de HadK-systematiek wordt voor de gaswinning onder de Waddenzee een ecologisch monitoringprogramma uitgevoerd. Dit programma is een extra veiligheid die uit voorzorg is ingebouwd, om zeker te stellen dat inderdaad geen onherstelbare schade optreedt in de Waddenzee door de gaswinning. Met een uitgebreid monitoring- en data-analyseprogramma maakt NAM jaarlijks inzichtelijk hoe een aantal ecologische parameters zich in het Waddengebied ontwikkelt. Hierbij dient de NAM redelijkerwijs aannemelijk te maken dat geobserveerde veranderingen niet het gevolg zijn van bodemdaling door gaswinning. Lukt dat niet, dan is het aan de Minister van LNV om te bepalen of er sprake is van significante gevolgen voor de instandhoudingsdoelen van de Waddenzee. Ook dit kan leiden tot het stoppen of verminderen van de gaswinning op grond van toepasselijke vergunningvoorschriften in opdracht van het

[3] In deze Passende beoordeling wordt met zeespiegelstijging steeds de relatieve zeespiegelstijging bedoeld, die bestaat uit de absolute stijging van de zeespiegel en de tektonische bodemdaling. Dit komt overeen met de Passende beoordeling voor de gaswinning Waddenzee (Ministerie van Economische Zaken, 2006), de Integrale bodemdalingstudie (Oost et al., 1998).

bevoegd gezag. De ecologische monitoring wordt nader besproken in paragraaf 3.3.6. Het monitoringprogramma voor de Waddenwinning is bijgevoegd als bijlage (D) aan deze Passende beoordeling. Aanpassingen aan dat programma t.b.v. de voorgenomen gaswinning Ternaard staan in paragraaf 9.5 en zijn opgenomen bij bijlage E.

Gaswinning volgens het HadK-principe wordt sinds 2007 uitgevoerd voor de MLV-winningen en de gaswinning onder Ameland (sinds 1986). De praktijkervaringen met gaswinning onder de Waddenzee heeft een aantal aandachtspunten opgeleverd:

- De voorspellingen van de bodemdaling zijn verbeterd in de Long-term subsidence studies en daarbij is het inzicht in de bodemdaling die doorgaat nadat de gaswinning is verminderd of stopgezet (het na-ijleffect) vergroot.
- De waargenomen ontwikkelingen van de hoogte en de vegetatie van de kwelders op Oost-Ameland laten zien dat de bodemdaling door gaswinning, in combinatie met andere factoren, kan leiden tot verlaging van kwelders en veranderingen van de vegetatie.
- Trends in het areaal droogvallende wadplaten dienen nader onderzocht te worden om de waargenomen dynamiek beter te begrijpen.

In paragraaf 3.3.10 worden deze aandachtspunten besproken en wordt duidelijk gemaakt hoe en waar deze in deze Passende beoordeling worden beschouwd.

Ten slotte wordt in Hoofdstuk 4 beknopt beschreven hoe de uitgangspunten van het HadK-principe worden toegepast bij de gaswinning Ternaard. Daar wordt ook duidelijk gemaakt dat het doorlopen van de meet- en regelcyclus voor de gaswinning Ternaard, in samenhang met de andere gaswinningen Waddenzee, de garantie oplevert dat de bodemdaling door de gaswinning Ternaard binnen de beschikbare gebruiksruimte wordt uitgevoerd.

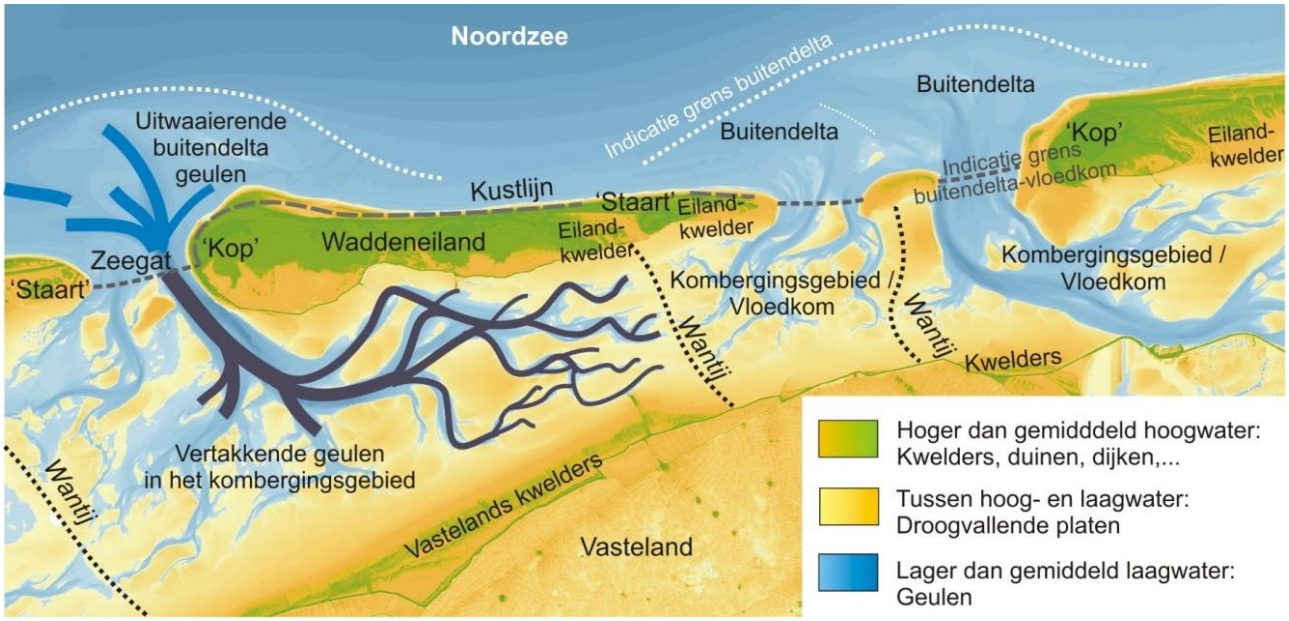
3.2 Dynamiek van de Waddenzee

3.2.1 Morfologie van de kombergingsgebieden

Voordat nader wordt ingegaan op de dynamiek van de Waddenzee wordt in deze paragraaf een aantal basisbegrippen geïntroduceerd, om te beginnen met het kombergingsgebied. Een kombergingsgebied is het gebied in de Waddenzee dat tijdens vloed wordt gevuld via het zeegat en tijdens eb wordt geleegd via het zeegat. Aan de vastelandzijde worden de kombergingsgebieden begrensd door een dijk. De oost- en westzijde van de kombergingsgebieden worden begrensd door wantijen: dit zijn relatief ondiepe gebieden ten zuiden van de Waddeneilanden die niet worden doorsneden door getijdegeulen.

Binnen de kombergingsgebieden worden op hoofdlijnen drie verschillende morfologische eenheden onderscheiden:

- Droogvallende wadplaten: aan de zeezijde van de kwelders liggen vrijwel overal wadplaten, die droogvallen bij laagwater. Op deze wadplaten in het intergetijdengebied zijn over het algemeen geen hogere planten aanwezig (de uitzondering is het tegenwoordig zeer schaarse zeegras).
- Geulen: de aanvoer en afvoer van water naar en van de wadplaten verloopt via de getijdegeulen, die een niveau hebben onder laagwater.
- Kwelders: de begroeide hogere delen van het waddengebied.

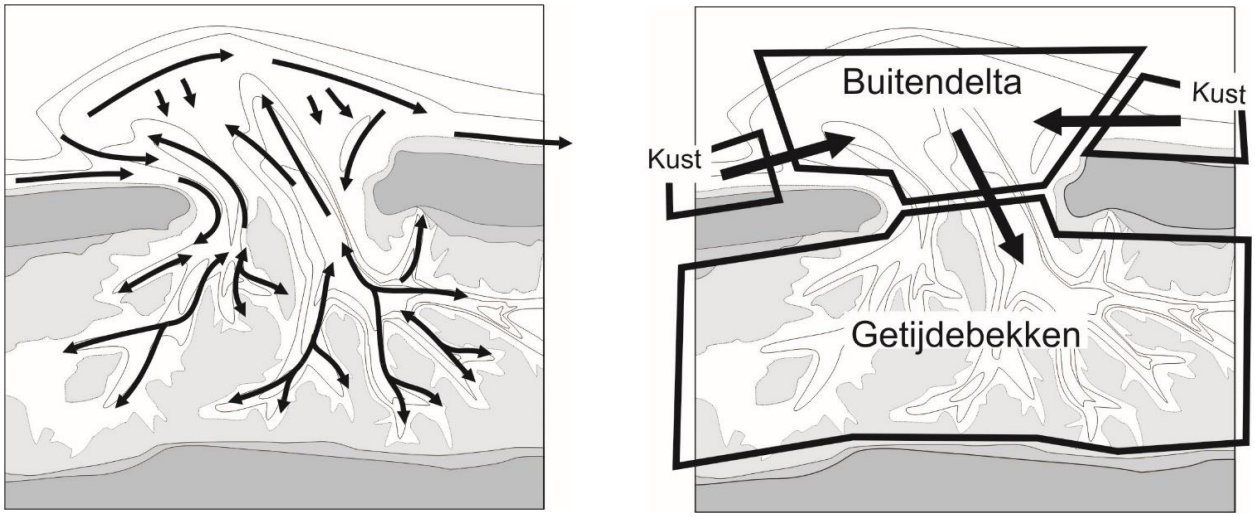


Figuur 3-2 Overzicht van de verschillende onderdelen van het hydromorfologische systeem van de Waddenzee, de Waddeneilanden en de Noordzee.

Aan de zeezijde van het zeegat van het kombergingsgebied ligt de buitendelta. Dat is een ten opzichte van het doorlopende kustprofielen uitstekend deel van de kust. Bij het kombergingsgebied van het Pinkegat ligt de buitendelta aan de oostzijde direct tegen de buitendelta van het Friesche zeegat. De buitendelta en de aangrenzende delen van de kust vormen samen met de kombergingsgebieden het sedimentdelende systeem.

3.2.2 Het sedimentdelende systeem en het transport van water, zand en slib

De dynamiek van de Waddenzee en de optredende veranderingen worden begrepen door de onderdelen van de Waddenzee te beschouwen als een sedimentdelend systeem (zie bijvoorbeeld Louters en Gerritsen, 1994; Wang et al, 2018). Sediment in de Waddenzee bestaat uit zand en slib. Het zand en slib wordt met het water getransporteerd en uitgewisseld tussen de onderdelen van het sedimentdelende systeem. Ook de buitendelta en de aangrenzende kusten maken deel uit van het sedimentdelende systeem. De complexiteit van het sedimentdelende systeem is zeer groot, omdat het transport van water, zand en slib door veel verschillende processen wordt beïnvloed. Het gaat dan bijvoorbeeld om de variaties in het getij door de verschillende astronomische cycli, de rol van wind en golven en de invloed van het spuien van zoetwater. Ook biologische processen spelen een rol, onder andere door het omgraven van het sediment (bioturbatie), de invloed op de slibdeeltjes en de invloed van biota op de lokale stroming en golfwerking.



Figuur 3-3 Schematisch bovenaanzicht van een getijdebekken met kust en buitendelta, met daarin de transporten van zand en slib (links) en de onderverdeling van het sedimentdelende systeem (rechts), naar Cleveringa e.a. (2004)

Voor het begrip van de lange termijn (van tientallen tot honderden jaren) response van de Wadden kan, op basis van waarnemingen aan verschillende grootschalige en langjarige veranderingen, veel van de complexiteit achterwege worden gelaten. In plaats van direct door te stappen naar het model voor de lange termijn response, wordt een beknopt beeld geschetst van de verschillende processen en de complexiteit die dit oplevert. Deze complexiteit is met name van belang vanwege de korte termijn variaties die optreden, bijvoorbeeld in het droogvallende plaatareaal en voor de monitoring die jaarlijks wordt uitgevoerd. Na de beschrijving van de complexe processen worden de stappen gezet naar het model voor de lange termijn response. Omdat de bodemdaling door gaswinning geleidelijk over een langere periode van enkele tientallen jaren plaatsvindt, is de lange termijn response van belang voor de beoordeling.

Bij ieder getij wordt tijdens vloed ieder kombergingsgebied in de Waddenzee gevuld met zeewater, dat via de zeegaten vanuit de Noordzee naar binnen stroomt. De belangrijkste stroming vindt plaats in de geulen, waar de waterdiepten het grootst zijn en de hoogste stroomsnelheden optreden. Naarmate de waterstand bij vloed toeneemt, stroomt er gaandeweg ook water over de platen. Eerst stromen de laagste delen van de platen over en met het stijgen van de waterstand stromen ook de hogere delen van de platen over. Bij eb stroomt het water via de zeegaten de Waddenzee uit. Gaandeweg vallen eerst de hoogste delen van de droogvallende platen droog, gevolgd door de middelhoge en uiteindelijk de lage delen. Met het water dat vanuit de Noordzee naar de Waddenzee stroomt, wordt ook zand en slib aangevoerd. Het transport van het zand vindt vooral plaats over de bodem (bodemtransport, ‘bedload’), terwijl het slib in de waterkolom blijft ‘zweven’ (‘suspended load’): de valsnelheid van de slibdeeltjes is dermate klein dat deze lang in de waterkolom aanwezig blijven. Overigens wordt ook een deel van het zand (voornamelijk de fijnere zandkorrels) zwevend getransporteerd en wordt een deel in een proces tussen bodemtransport en zwevend transport (salterend) getransporteerd. Een deel van het zand en slib dat naar de Waddenzee wordt aangevoerd tijdens vloed wordt daar afgezet en blijft achter in de Waddenzee. Tijdens eb neemt het water dat de Waddenzee uitstroomt ook weer zand en slib mee, naar de Noordzee. Het transport tijdens vloed en eb wordt het bruto transport genoemd en het verschil tussen deze twee is het netto transport.

De bruto transporten naar en van de Waddenzee en de resulterende netto transporten variëren per getij, onder invloed van verschillende fysische en biologische processen. De basis voor de variaties wordt gevormd door het getij. De niveaus van hoog- en laagwater voor het waterstandsstation bij Nes-Ameland zijn bijvoorbeeld bij springtij NAP +1,19 m en -1,33 m en bij doodtij zijn deze NAP +0,88 m en -0,94. Het getijverschil bij springtij is daarmee 2,52 m en bij doodtij is dat 1,82 m. Het verschil tussen beide is 0,70 m. Uitgaande van dat verschil wordt in het gehele kombergingsgebied van 61 km^2 van het Pinkegat (zie verderop in dit hoofdstuk) een watervolume van 43 x 10^6 m^3 meer aan- en afgevoerd bij springtij dan bij doodtij. Ten opzichte van de gemiddelde hoeveelheid die elke dag aan- en afgevoerd wordt van 118 x 10^6 m^3 is dat een groot verschil. De opstuwing en het verlagen door de wind kan decimeters tot meters waterstandsvariatie toevoegen aan de getijverschillen, afhankelijk van de windrichting en de -sterkte. De grote verschillen in het watertransport onder verschillende omstandigheden betekenen ook dat de bruto transporten van zand en slib verschillen.

In de beschrijving van het sedimentdelende systeem wordt uitgegaan van de aanvoer bij vloed en afvoer bij eb door de zeegaten en zijn de wantijen tussen de kombergingen gesloten: er vindt geen transport van water en zand en slib plaats over de wantijen tussen de kombergingen. In werkelijkheid zijn de wantijen niet gesloten, over de wantijen kan water van het ene naar het andere kombergingsgebied stromen (zie bijvoorbeeld Duran Matute, 2014). De omvang van die stroming varieert, omdat deze (sterk) afhankelijk is van de windrichting en windsterkte. Bij windrichtingen uit west tot noordwest, waarbij hogere waterstanden optreden, zal de stroming over het wantij groter zijn en gericht van west naar oost, dan bij dan bij rustige omstandigheden. Deze factor levert verdere variaties op in de bruto en de netto transporten van water, zand en slib naar en uit de kombergingsgebieden.

Verschillende organismen beïnvloeden de condities waarbij erosie en sedimentatie van zand en slib in de Waddenzee plaatsvinden. Op de kwelders speelt de aanwezigheid van vegetatie een belangrijke rol. Ook op de wadplaten en in de geulen spelen organismen een rol in de dynamiek van het sediment. De eencellige benthonische diatomeen (kiezelwieren) die op en in de bovenste laag sediment van de wadbodem leven zorgen voor het onderling verkleven van zand- en kleideeltjes. Het gevolg hiervan is dat het zand en slib moeilijker wordt los gespoeld door stromingen en golven dan in de situatie zonder deze benthonische diatomeeën (zie bijvoorbeeld Weerman, 2011). Ook in de waterkolom kunnen kleine sedimentdeeltjes aan het elkaar verkleven en grotere deeltjes met andere eigenschappen vormen, mede onder invloed van organismen.

Kokkels, mosselen en andere schelpdieren die met hun voedsel ook slibdeeltjes binnenkrijgen, scheiden deze onverteerbare deeltjes weer uit als pseudo feces, waarin de kleine deeltjes samen zijn gekleefd tot grotere deeltjes. Deze pseudo feces hebben eigenschappen die overeenkomen met zanddeeltjes met dezelfde korrelgrootte. Dat betekent onder andere dat de bezinksnelheid groter is en dat hogere stroomsnelheden nodig zijn om de deeltjes te transporteren. Deze deeltjes kunnen wel weer uiteenvallen in de oorspronkelijke fijnere deeltjes. De productie van deze deeltjes door mossels is één van de oorzaken voor de aanwezigheid van zeer slibrijke wadplaten in de nabijheid van mosselbanken (Donker, 2015).

Veel van de organismen die in de wadbodem leven, zorgen voor het mengen van de sedimentlaagjes. Dit proces wordt bioturbatie genoemd. Door het mengen, veranderen de eigenschappen die van belang zijn voor de erosie. Verschillende organismen beïnvloeden de erodeerbaarheid van het sediment, dat geldt bijvoorbeeld voor zandkokerwormen (*Lanice conchilega*), groot en klein zeegras (*Zostera marina en Zostera noltii*) en bankvormende schelpdieren, zoals mosselen (*Mytilus edulis*) en Japanse oesters (*Crassostrea gigas*), zie bijvoorbeeld Van der Zee (2014) en vele andere organismen. Vanwege de invloed van biota varieert de omvang van de sedimenttransporten niet alleen met de getijvariaties en de veranderende meteorologische condities, maar ook met de seizoenen.

Een deel van de optredende variaties in de sedimenttransporten is dus gekoppeld aan de seizoenen. Dat geldt in sterke mate voor de biologische processen, zoals de productie van pseudo-feces. Het geldt in mindere mate voor het optreden van hogere waterstanden en hogere golven, die gekoppeld zijn aan stormen. Deze treden -inderdaad- frequenter op in het stormseizoen, dat de herfst, winter en het vroege voorjaar omvat. Deze seizoenvariatie komt onder andere tot uitdrukking in de opbouw van sliblagen op delen van de wadplaten, bijvoorbeeld voor de vastelandskwelders en in de nabijheid van mosselbanken vanaf het voorjaar en in de zomer. Deze lagen blijven doorgaans aanwezig tot dat de eerste herfst of winterstorm zich voordoet, die zorgt voor een sterke of soms zelfs volledige erosie van deze laag. Het slib wordt tijdens zo'n storm herverdeeld, waarbij het in verschillende andere delen van de Waddenzee terecht kan komen, maar ook (deels) naar de Noordzee wordt getransporteerd.

Voor het sedimenttransport naar de kwelders geldt een iets ander verhaal, omdat dit sterk afhankelijk is van het optreden van hoge waterstanden. Alleen bij verhoogde waterstanden vindt uitwisseling plaats van sediment tussen de Waddenzee en de aangrenzende kwelders.

Het doel van deze uitgebreide beschrijving is om duidelijk te maken dat de variatie in de omstandigheden waaronder zand en slib worden getransporteerd naar en uit de kombergingsgebieden en tussen de verschillende onderdelen van de kombergingsgebieden zeer groot is. Dat maakt het voorspellen van de korte termijn (van dagen tot enkele jaren) autonome ontwikkeling, zoals de verplaatsing getijdegeulen, op

basis van de transporten van zand en slib die iedere dag optreden voorlopig[4] nog niet mogelijk. Ondanks de grote variaties die optreden in de dagelijkse condities is het wel goed mogelijk gebleken om de langjarige ontwikkelingen (van meerdere jaren tot tientallen jaren) van kombergingsgebieden en buitendelta te voorspellen, zowel voor waargenomen historische ontwikkelingen, als voor de toekomstige ontwikkelingen. In de denkmodellen en numerieke modellen voor de langjarige ontwikkelingen worden de korte termijn variaties, waaronder seizoenfluctuaties, in de meteorologische condities en het getij buiten beschouwing gelaten. Ook wordt niet gekeken naar de gedetailleerde morfologische eenheden, zoals de individuele geulen en droogvallende platen. In de denkmodellen en numerieke modellen voor de langjarige ontwikkelingen worden per kombergingsgebied alle platen gecombineerd en alle geulen gecombineerd en als zodanig beschouwd. Op deze schaal blijken er duidelijk wetmatigheden op te treden in de morfologische kenmerken van de kombergingsgebieden en in de ontwikkelingen van deze gebieden. Het voorspellen van de autonome ontwikkelingen is wel goed mogelijk met modellen die de variatie op korte tijd- en kleine ruimteschalen buiten beschouwing laten en gericht zijn op de lange tijd- en grote ruimteschalen. De beschouwing wordt daarom voortgezet op deze grote ruimte schaal (van kombergingsgebieden) en lange tijdschaal (tientallen jaren).

3.2.3 Langjarige ontwikkelingen op de schaal van het sedimentdelende systeem

Bij het beschouwen van de morfologische ontwikkelingen op de lange termijn van tientallen tot honderden jaren wordt de complexe morfologie in de kombergingsgebieden teruggebracht tot één element voor de geulen en één voor de droogvallende platen. Geul en plaat wisselen sediment uit met de buitendelta, die ook als één element wordt beschouwd. De buitendelta wisselt op zijn beurt sediment uit met de aangrenzende kustdelen. Samen vormen deze elementen per kombergingsgebied het sedimentdelende systeem van Waddenzee, buitendelta en kust (Figuur 3-3). In dit sedimentdelende systeem is het getijprisma de belangrijkste sturende factor. Het getijprisma is het watervolume dat tijdens een gemiddeld getij wordt geborgen in het kombergingsgebied. De omvang van het getijprisma wordt bepaald door de niveaus van hoog- en laagwater en het areaal en de gemiddelde hoogte van de droogvallende platen.

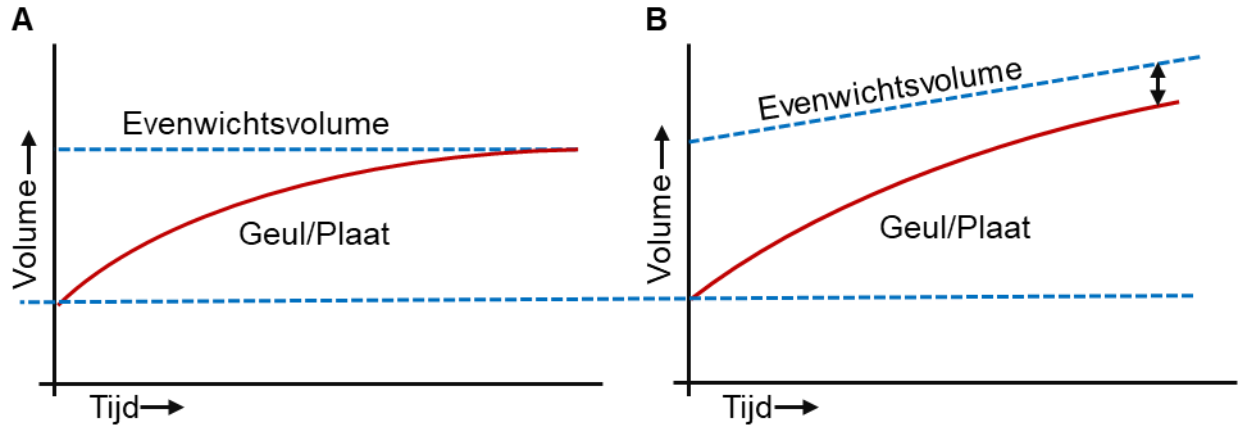
In de sedimentdelende systemen die worden gevormd door de kombergingsgebieden is sprake van vaste verhoudingen tussen de omvang van het getijprisma en de omvang van de geulen (uitgedrukt als het watervolume dat in de geulen wordt geborgen). In grotere kombergingsgebieden met een groot getijprisma, zijn de geulen groter en in kleinere kombergingsgebieden met een klein getijprisma zijn de geulen kleiner. Ook is sprake van een vaste relatie tussen de omvang van het getijprisma en de omvang van de droogvallende platen (uitgedrukt als het sedimentvolume dat in de droogvallende platen aanwezig is). Verder is de omvang van de buitendelta (ook uitgedrukt als het sedimentvolume, maar dan ten opzichte van het doorgetrokken kustprofiel van de aangrenzende kusten) gerelateerd aan de omvang van het getijprisma. Deze vaste verhoudingen tussen getijprisma en de onderdelen van het sedimentdelende systeem worden de evenwichtsrelaties genoemd.

De sedimentdelende systemen ontwikkelen zich in de richting van een evenwichtssituatie voor de verschillende onderdelen ervan. Die ontwikkelingen in de richting van het evenwicht bestaan uit sedimentatie op de platen en in de geulen in de Waddenzee. Dit is schematisch weergeven in de linker grafiek (A) in Figuur 3-4. Het sediment voor het bereiken van de evenwichtssituatie wordt geleverd door de buitendelta en de kust. Bij een stijgende zeespiegel is het bereiken van de evenwichtssituatie niet mogelijk, door de doorgaande verstoring die de stijgende zeespiegel oplegt. Deze situatie is schematisch weergegeven in de rechtergrafiek (B) in Figuur 3-4. De stijgende zeespiegel leidt tot een kleine maar doorgaande toename van de waterstanden, waaronder de hoog- en de laagwaterstand. Daarmee neemt het getijprisma in het kombergingsgebied toe, waardoor een afwijking ontstaat die het systeem verwijdert van de evenwichtssituatie. En dit brengt weer sedimentatie in de Waddenzee op gang, waarvoor het sediment wordt aangevoerd vanuit de kust. Deze langjarige doorgaande trend van sedimentatie in de kombergingsgebieden

[4] In het kader van het beleid en beheer van de kust wordt in het Kustgenese 2 programma onderzoek gedaan naar het voorspellen van de langjarige morfologische ontwikkelingen op basis van de waterbeweging- en sedimenttransportprocessen van getij op getij.

van de Waddenzee, gevoed door sediment uit de kust wordt wel de ‘zandhonger’ van de Waddenzee genoemd, die resulteert in een ‘zandvraag’ aan de Noordzeekust (Figuur 3-5).

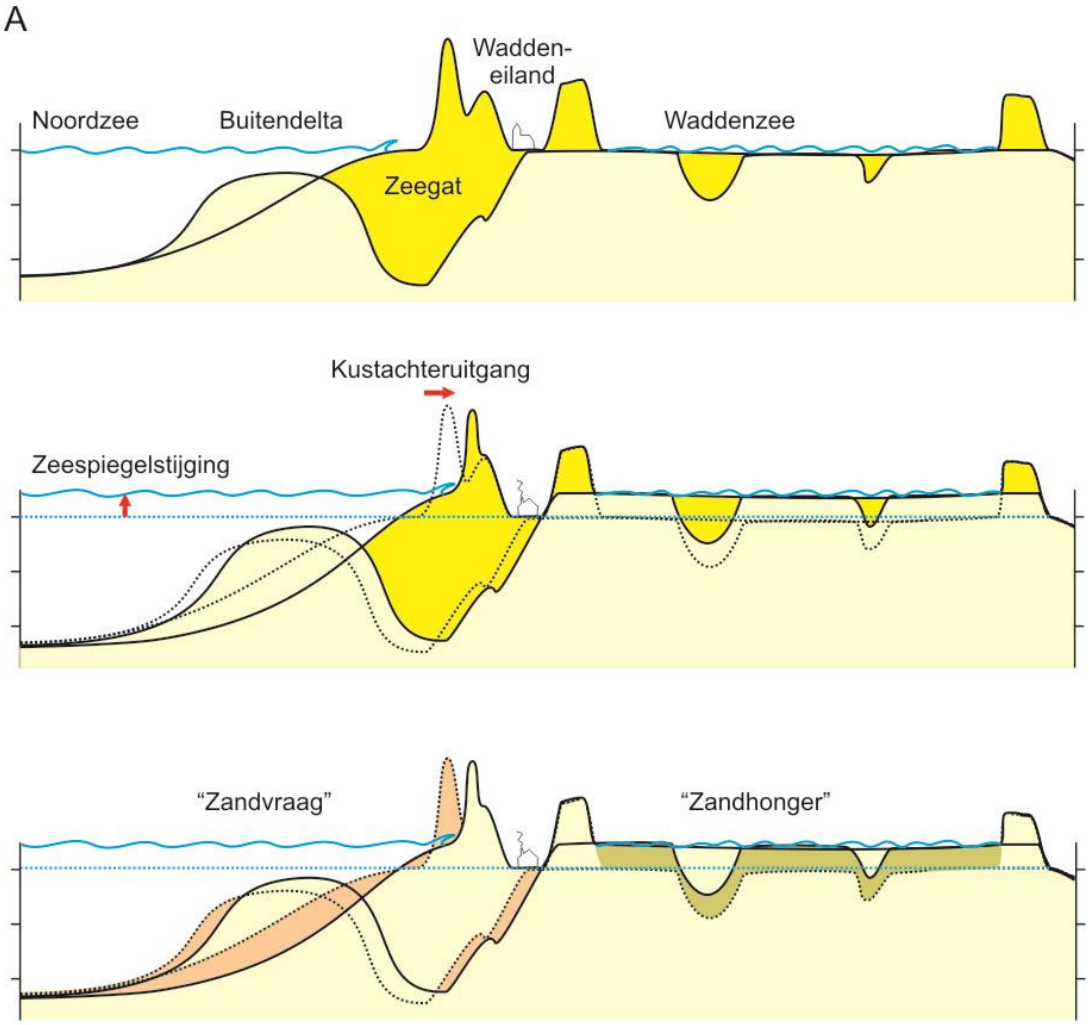
Ten opzichte van het schematische bovenaanzicht in Figuur 3-3 is bij de buitendelta van het Pinkegat sprake van een iets andere situatie, omdat ten oosten van deze buitendelta geen Waddeneiland met kustlijn ligt, maar de buitendelta van Friesche Zeegat. Ten oosten van de buitendelta van het Friesche Zeegat ligt Schiermonnikoog met zijn kustlijn.



Figuur 3-4 Grafieken met schematische weergave van A. Bereiken van morfologische evenwicht in de situatie zonder stijgende zeespiegel; en B. Niet bereiken van morfologiche evenwicht bij een stijgende zeespiegel.

De kennis van deze evenwichtsrelaties is gebaseerd op analyses van de getijdebekkens en buitendelta’s van de Waddenzee (onder andere Eysink en Biegel, 1992) en andere getijdebekkens in de wereld. De morfologische veranderingen die zijn opgetreden na afsluitingen van (delen van) getijdebekkens en zeearmen hebben laten zien hoe de morfologische ontwikkelingen naar een nieuw evenwicht plaatsvinden. De morfologische response van het kombergingsgebieden Zoutkamperlaag op de afsluiting van de Lauwerszee en die van de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie op de afsluiting van de Zuiderzee zijn gebruikt om langjarige morfologische veranderingen te modelleren op basis van de evenwichtsrelaties, bijvoorbeeld met het Asmita-model. De toepassing van het Asmita-model voor het Pinkegat en het Friesche zeegat is te vinden in Wang en Eysink, (2005).

Vanwege de grote omvang van de afsluitingen zijn de morfologische veranderingen die daarna zijn opgetreden ook groot. Vanwege de grote omvang van de veranderingen zijn deze goed meetbaar. Dit heeft meetgegevens opgeleverd die uiterst bruikbaar zijn om te vergelijken met de gemodelleerde responses. Ook de ontwikkeling van de Waddenzee bekkens in response op de stijgende zeespiegel is gemodelleerd met het Asmita-model (van Goor e.a., 2003; Kragtwijk e.a., 2004; Wang et al, 2018). Bij de langjarige response op de stijgende zeespiegel wordt ook rekening gehouden met het geleidelijk veranderen van de kenmerken van de kombergingsgebieden. Op de lange termijn zijn de wantijen die de kombergingsgebieden onderling begrenzen van plaats veranderd en hebben het ontstaan en de uitbreiding van kwelders ook gevolgen voor het getijprisma van de kombergingsgebieden (Eysink, 1979).



Figuur 3-5 Schematische dwarsdoorsnede van de Waddenzee met Waddeneiland en buitendelta (boven), de response op de stijgende zeespiegel in de Waddenzee en de gevolgen voor het eiland en de buitendelta (midden). Onderin is de sedimentatie (groen: "zandhonger") en de erosie in de kust en op de buitendelta (rood: "zandvraag") weergegeven (uit Cleveringa e.a., 2004)

Aanvullende informatie en gegevens over de morfologische ontwikkelingen van getijdebekkens in reactie op de stijgende zeespiegel zijn ontleend aan geologische studies aan de ontwikkeling van de kust gedurende het Holoceen (zie bijvoorbeeld Van der Spek & Beets, 1992 en Beets e.a., 1994, Wang et al., 2018). Een deel van deze kustontwikkeling vond plaats onder condities met een beduidend hogere snelheid van zeespiegelstijging dan de huidige en deze Holocene kustontwikkelingen geven inzichten die bruikbaar zijn bij versnelde zeespiegelstijging. Onder deze condities vond snelle sedimentatie plaats in de getijdebekkens die destijds langs de kust lagen (Van der Spek, 2004). Het sediment dat hiervoor nodig was, werd tenminste deels aangevoerd vanaf de kust, die dan ook snel landwaarts verplaatste. De uitkomsten van deze studies ondersteunen het denkmodel van 'zandhonger' en 'zandvraag' dat wordt gehanteerd voor de getijdebekkens in de Waddenzee.

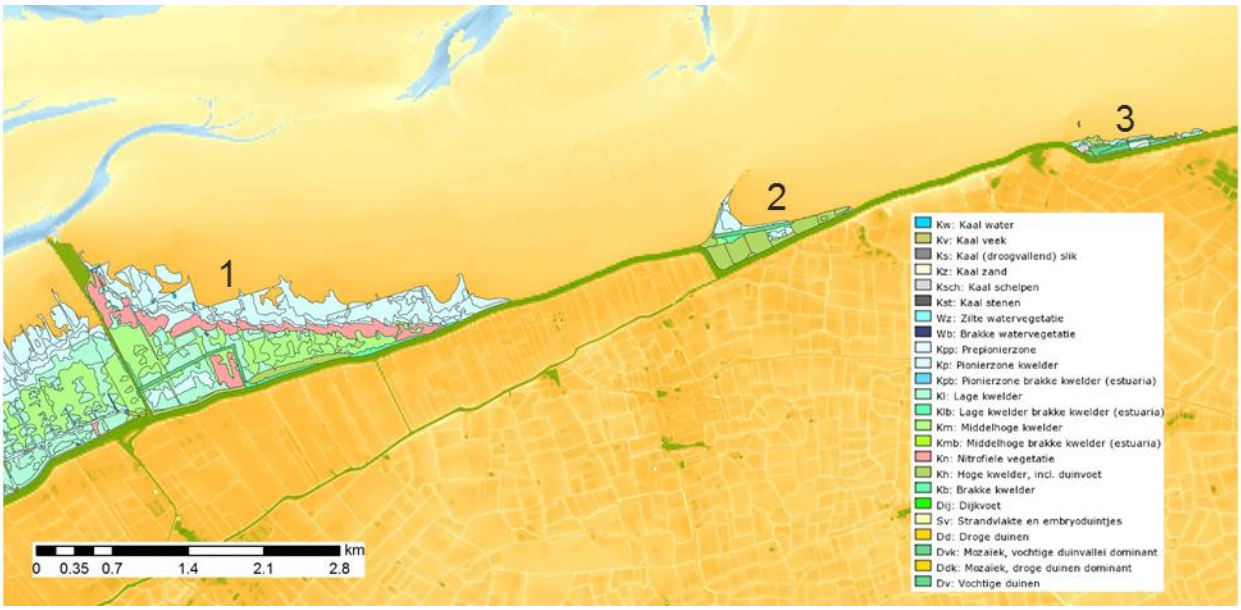
De lange termijn ontwikkeling van de kombergingsgebieden op de bodemdaling door de gaswinning wordt op dezelfde wijze beschouwd als de veranderingen door zeespiegelstijging en de afsluitingen. De bodemdaling vergroot het getijdeprisma in het kombergingsgebied en leidt daarmee tot een kleine verstoring, waardoor het kombergingsgebied iets verder van de evenwichtssituatie afraakt. Die kleine verstoring brengt een extra sedimentatie op gang op de platen en de geulen. Het sediment hiervoor is afkomstig vanaf de buitendelta en uiteindelijk van de kust (zand) en uit de Noordzee (slib).

De omvang van de bodemdaling door gaswinning, zoals die van dag tot dag optreedt onder de Waddenzee is zeer klein. En wanneer deze omvang wordt vergeleken met de grote variaties die optreden onder invloed van het getij, de meteorologische omstandigheden en de biologische processen, dan is deze ook zeer klein.

Ondanks de kleine omvang op *korte termijn* wordt, in het model dat de response van de kombergingsgebieden op de bodemdaling en de zeespiegelstijging beschrijft, uitgegaan van een merkbare response op de *lange termijn*. De response op de zeer geleidelijke processen bodemdaling (en ook van zeespiegelstijging) gaat om de optelsom van zeer kleine veranderingen die steeds dezelfde richting op gaan, tegenover de korte termijn variaties die alle kanten op gaan.

3.2.4 Kwelders

Kwelders zijn de begroeide hogere delen van het waddengebied. Binnen kwelders worden verschillende hoogtezones gedefinieerd. In Figuur 3-6 zijn deze zones in kaart aangegeven voor de vastelandskwelders. Kwelders zijn dermate hoog dat deze alleen bij springtij en stormcondities met verhoogde waterstanden overstromen. De laagste delen van de kwelder (de pionierzone) stromen vaak onder en de hogere delen doen dat minder. Alleen als kwelders overstromen, kan zand en slib vanuit de Waddenzee naar de kwelders worden getransporteerd. Het zand en slib dat naar de kwelders wordt getransporteerd, kan daar makkelijker dan op onbegroeide wadplaten tot afzetting komen, omdat de aanwezige vegetatie zorgt voor relatief lagere stroomsnelheden nabij de bodem.

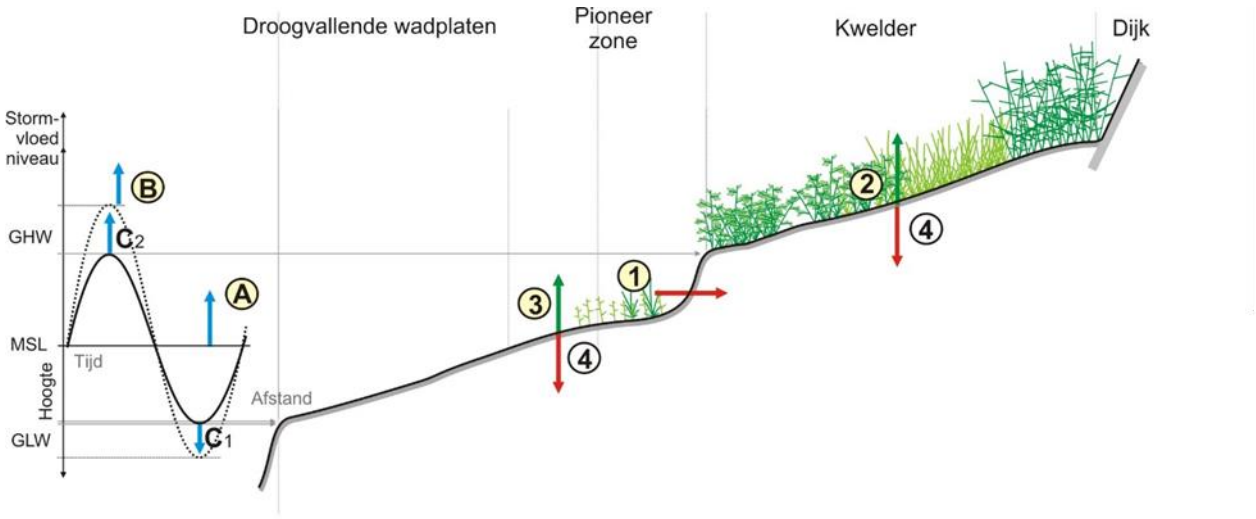


Figuur 3-6 Vegetatiezonering van de vastelandskwelders, met bij 1 de kwelders ten oosten van de veerdam Holwerd, bij 2 het kwelderfragment bij ' Skoar en bij 3 het kwelderfragment bij Wierum: de Kromme Horne (vegetatiekartering 2008, Bron Rijkswaterstaat). Kwelderfragmenten 2 en 3 liggen in het bereik van de bodemdaling door de gaswinning bij Ternaard.

De ontwikkeling van kwelders omvat een aantal morfologische veranderingen die plaatsvindt onder invloed van verschillende randvoorwaarden, die beide in Figuur 3-7 schematisch zijn weergegeven. Hieronder worden de morfologische veranderingen toegelicht, gevolgd door de randvoorwaarden. De nummering komt overeen met die in Figuur 3-7.

1. Erosie van het kwelderklif:
   Op de overgang van de pionierzone naar de (lage) kwelder kan erosie plaatsvinden. Deze afname van het kwelderareaal is éénrichtingsverkeer, uitbouw van de kwelder vindt niet vanaf de rand plaats. De belangrijkste factor die de erosie bepaalt, is de golfaanval die op de kwelderrand plaatsvindt. De hoogte en breedte van de wadplaten voor het kwelderklif zijn hiervoor van belang, zie hiervoor punt 3.
2. Verhoging of verlaging van de kwelders.
   Verhoging of verlaging van de kwelders, inclusief de pionierkwelder vindt plaats over het gehele areaal van de kwelder. De richting van het proces is afhankelijk van de balans tussen de netto aan- dan wel afvoer van sediment en de inklinking van de kwelderbodem. Over het algemeen is sprake van netto aanvoer van sediment (slib en zand) naar kwelders, als de kwelders overstromen. De hoogtetoename bij netto sedimentatie is afhankelijk van de aanvoer van het sediment en van de bodemdaling (zie punt 4) en de inklinking van het kweldersediment. In natuurlijke kwelders is sprake van ruimtelijke differentiatie van de sedimentatie, die samenhangt met de afstand tot de kreken en kreekjes. In kwelderwerken is ook sprake van ruimtelijke differentiatie die samenhangt met de afstand tussen wad en kwelder.

3. Verhoging of verlaging op de voorliggende droogvallende platen.
   De verhoging dan wel verlaging op de voorliggende droogvallende platen is zowel van belang voor de eventuele erosie van het kwelderklif, als voor de mogelijk doorontwikkeling van hoge wadplaat naar pionierzone. Of verhoging dan wel verlaging plaatsvindt, is afhankelijk van de netto sedimentatie of erosie die in de loop van de tijd plaatsvindt op de wadplaten. Hiermee is de ontwikkeling van de kwelders gekoppeld aan de autonome ontwikkeling van de droogvallende wadplaten.
4. Bodemdaling.
   Bodemdaling is de term die wordt gebruikt voor de daling van de diepere ondergrond, ook wel Pleistocene ondergrond (dit in tegenstelling tot inklinking of compactie van het ondiepe deel van de bodem). De bodemdaling bestaat uit twee componenten, namelijk de tektonische bodemdaling waar heel noordwest Nederland mee te maken heeft en die samenhangt met de grootschalige en extreem langjarige geologische ontwikkeling van Nederland en de regionale bodemdaling door de winning van gas (zie bijvoorbeeld Elschot et al., 2017). De tektonische bodemdaling is onderdeel van de relatieve zeespiegelstijging en dat is de zeespiegelstijging die wordt beschouwd in het meegroeivermogen van de kombergingsgebieden. De bodemdaling door de bestaande gaswinningen Ameland en Waddenzee is onderdeel van de autonome regionale ontwikkelingen.



Figuur 3-7 Schematische dwarsdoorsnede van een kwelder met morfologische veranderingen (cijfers) en randvoorwaarden (letters).

Verschillende randvoorwaarden bepalen de ontwikkelingen van kwelders. Bij deze randvoorwaarden is de beschikbaarheid van sediment (zand en slib) niet beschouwd, omdat hiervan voldoende aanbod is en de vraag door de sedimentatie op de kwelders bepalend is. De randvoorwaarden in Figuur 3-7 zijn:

A. *Stijgende zeespiegel.*
   De stijgende zeespiegel wordt hier gebruikt om de toename van de gemiddelde waterstand (het middenstandvlak) te beschouwen, de niveaus van hoog- en laagwater worden apart beschouwd bij C. Voor de ontwikkeling van de Waddenzee wordt de zeespiegel met zijn huidige langjarige gemiddelde stijging als een veranderend referentieniveau beschouwd. De sedimentatie en erosie op kwelders worden beschouwd ten opzichte van dit veranderende referentieniveau. Meer sedimentatie op een kwelder dan de stijging van de zeespiegel betekent dat de kwelder relatief hoger wordt. Bij een versnelde stijging van de zeespiegel, zoals die wordt verwacht (voorspeld) als gevolg van de wereldwijde klimaatveranderingen is meer sedimentatie nodig om mee te groeien met de stijgende zeespiegel.
B. *Stormvloedniveau.*
   Voor de ontwikkeling van kwelders zijn veranderingen in de niveaus en de frequentie van stormvloeden minstens zo belangrijk als veranderingen in het gemiddelde zeeniveau. Bij een toename van het niveau van stormvloeden, uitgedrukt als en toename van het aantal keren dat een bepaalde waterstand wordt overschreden, neemt het aantal keren dat de kwelder wordt overspoeld toe. De frequentie waarmee de kwelder wordt overspoeld is van belang voor ecologie, omdat verschillende kwelderplanten een verschillende zouttolerantie hebben. En het heeft een effect op de snelheid waarmee sedimentatie

plaatsvindt. Vaker overspoelen betekent dat vaker sediment wordt aangevoerd. Voor de natuurwaarden van de kwelder maakt het ook uit in welk seizoen de kwelder overstroomt. In het broedseizoen is een overstroming van de kwelder voor de broedvogels veel vervelender dan buiten het broedseizoen. Of dit voor de morfologische ontwikkelingen veel gevolgen heeft is niet bekend.

C. *Veranderingen in de hoog- en laagwaterstanden.*
Veranderingen in de hoogwaterstanden hebben directe gevolgen voor de frequentie van overstromen van de lagere delen van de kwelder (pionierzone en lage kwelder) en kunnen daar ook doorwerken op de ecologie en de sedimentatiesnelheden. Veranderingen in de laagwaterstanden hebben geen gevolgen voor de kwelders.

Voor de vastelandskwelders die onderdeel zijn van de kwelderwerken zijn het beheer en het gebruik voor de ontwikkelingen van de afgelopen tientallen jaren minstens zo belangrijk als de randvoorwaarden (van Duin e.a., 2016a). Kwelderwerken bestaan uit een rechthoekig patroon van houten dammetjes en geultjes (vroeger werden ook greppels gegraven en onderhouden, maar dit is niet meer gebruikelijk). Kwelderwerken waren tot de jaren ’60 aanwezig in het hele gebied vanaf de Veerdam bij Holwerd tot aan de Lauwerzee (Hoekstra et al., 1998). Van deze uitgebreide kwelderwerken resteren tegenwoordig alleen nog de delen voor de drie resterende kwelders, namelijk de kwelders ten oosten van de veerdam Ameland, het kwelderfragment bij ‘t Skoar en het kwelderfragment de Kromme Horne bij Wierum. De kwelderwerken beperken de rol van golven en zorgen voor gestructureerde drainage. De waterstanden worden niet beïnvloed door de kwelderwerken. De kwelderwerken bevorderen de sedimentatie van zand en slib in de kwelder, de pionierzone en de voorliggende zone, waardoor daar meer sediment terecht komt dan in de situatie zonder kwelderwerken.

Onder het beheer worden de werkzaamheden aan de rijshoutendammen en het greppel en geulenpatroon verstaan. Het gebruik bestaat uit beweiding, met verschillende intensiteiten. De beweiding is ook van belang voor de ontwikkeling van de kwelders bij Ameland (Dijkema, 2011; de Groot et al., 2016).

Het beheer van de kwelderwerken is in de periode 1960-2014 sterk veranderd (Van Duin et al., 2016a). In eerste instantie was het beheer intensief en gericht op zo hoog mogelijke aanslibbing, zodat het areaal bruikbare landbouwgrond zo snel mogelijk toenam. Dat intensieve beheer omvatten het plaatsen van een dicht netwerk van dammetjes en greppels, waar zeer regelmatig onderhoud op werd toegepast. In tweede instantie verschoof het beheer naar de natuurwaarden van de kwelders. De intensiteit van het beheer nam af. De dichtheid en totale lengte van rijshouten dammetjes nam af en de aanleg en het onderhoud van de greppels werd gestaakt. De in de tijd en ruimte variërende condities die dit heeft opgeleverd hebben inzicht gegeven in de relaties tussen de aanwezigheid van dammetjes en hun condities en de opslibbingsnelheid. Intensief beheer leidt tot de hoogste opslibbingsnelheden en uitbreiding van het kwelderareaal.

Beweiding van de kwelder heeft invloed op de vegetatie, waarbij de intensiteit van de beweiding een duidelijke rol speelt. In sommige situaties, met een intensieve beweiding, neemt de vegetatie dichtheid zo veel af dat erosie kan gaan optreden. Beweiding wordt vooral gezien (en soms gebruikt) als stuurfactor voor de gewenste vegetatieontwikkelingen.

De ontwikkeling van de kwelders is via twee routes verbonden met het sedimentdelende systeem. De eerste route heeft betrekking op het transport van sediment. Kwelders fungeren onder de huidige omstandigheden over het algemeen als een plek waar netto sedimentatie plaatsvindt en dit geldt ook voor de kwelders in het studiegebied. Het zand en slib dat op de kwelders wordt afgezet is afkomstig uit de Waddenzee. Het areaal van de kwelders in het studiegebied is dusdanig beperkt ten opzichte van het totale areaal van het kombergingsgebied Pinkegat, dat deze sinkfunctie voor sediment in de autonome ontwikkeling buiten beschouwing wordt gelaten. De sedimentbalans van Vermaas en Marges (2015) laat zien dat de omvang van de sedimentatie op de kwelders relatief beperkt is ten opzichte van de andere sedimentatie en erosie in de kombergingsgebieden Borndiep en Pinkegat, en op de buitendelta en de Noordzee, ondanks de grote omvang van de kwelders in het Borndiep.

De andere route waarmee de kwelders zijn verbonden met het sedimentdelende systeem heeft betrekking op het areaal van de kwelders in relatie tot het areaal van de droogvallende platen en de geulen en het getijprisma. Een uitbreiding van het areaal van de kwelder gaat ten koste van het areaal dat beschikbaar is voor platen en geulen. De afname van het areaal platen en geulen door uitbreiding van de kwelders heeft als gevolg dat het getijprisma van het kombergingsgebied afneemt. Bij een kleiner getijdeprisma passen kleinere geulen en daarvoor is sediment nodig. Uitbreiding van het kwelderareaal heeft een daarom een

extra sedimentvraag in het kombergingsgebied tot gevolg (deze factor is door Eysink, 1979 en Oost e.a., 1998 in de sedimentbalansen voor de kombergingsgebieden de beschouwd onder ‘verlanding’). Het omgekeerde is ook het geval: bij een afname van het kwelderareaal, waardoor het areaal platen en geulen toeneemt, komt sediment beschikbaar. Deze route wordt in de voorliggende studie buiten beschouwing gelaten, omdat het areaal van de kwelders waaronder bodemdaling door de gaswinning Ternaard plaats zal vinden, stabiel is en de bodemdaling dit niet zal veranderen, zoals verderop in deze Passende beoordeling zal worden toegelicht.

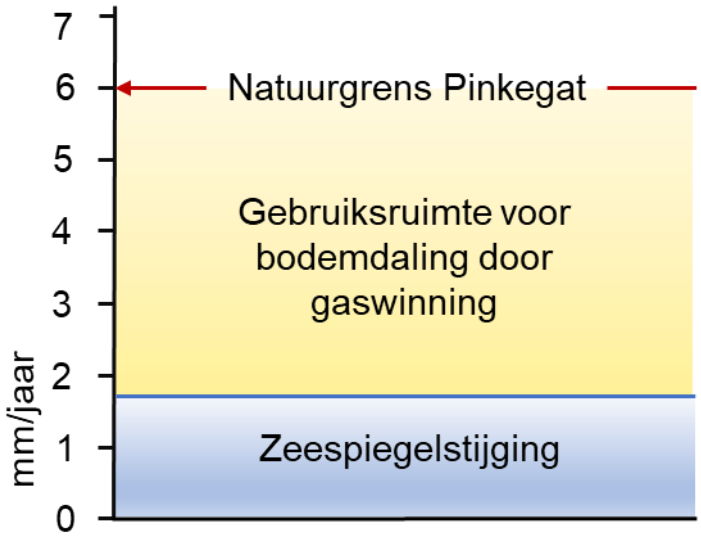
3.3 De Hand aan de Kraan-systematiek

Uitgangspunt bij de waddenwinningen is dat er wordt gewerkt volgens de HadK-systematiek. Dit houdt in dat de gaswinning wordt stilgelegd of beperkt wanneer vooraf vastgestelde grenzen worden of dreigen te worden overschreden. Wat deze grenzen precies zijn en hoe dit werkt wordt toegelicht in de onderstaande paragrafen. Het HadK-principe is ontwikkeld bij het MER en de Passende beoordeling voor de Gaswinning Moddergat Lauwersoog Vierhuizen (hierna: MLV) ((NAM, 2006 & Ministerie van Economische Zaken, 2006). De HadK-systematiek is als voorwaarde opgenomen in het instemmingsbesluit op het Winningsplan (MLV). Het is een toetsingskader voor bodemdaling onder de Waddenzee, waarmee voorafgaand aan de gaswinning wordt afgesproken aan welke randvoorwaarden de bodemdaling moet voldoen (de Waal et al., 2012). De HadK-systematiek is dus een borgstelling om schade aan wadplaten te voorkomen en is daarmee een uitwerking van het voorzorgsbeginsel.

3.3.1 De drie uitgangspunten van de Hand aan de Kraan-systematiek

Uitgangspunt bij de waddenwinningen is dat er wordt gewerkt volgens het HadK-principe. Dit houdt in dat de gaswinning wordt stilgelegd of beperkt wanneer vooraf vastgestelde grenzen worden of dreigen te worden overschreden. Wat deze grenzen precies zijn en hoe dit werkt wordt toegelicht in deze paragraaf. De HadK-systematiek voor de gaswinning Ternaard is als voorwaarde opgenomen in het instemmingsbesluit op het Winningsplan Ternaard.

De HadK-systematiek is gebaseerd op drie uitgangspunten. Het eerste uitgangspunt is het meegroeivermogen van de Waddenzee (zie paragraaf 3.3.2). Binnen de HadK-systematiek wordt er gewerkt met een conservatief gekozen meegroeivermogen. Dat noemen we de Natuurgrens. Deze natuurgrens wordt in de volgende alinea behandeld. Daarna volgt het tweede uitgangspunt, de zeespiegelstijging. Voor mijnbouw onder de Waddenzee stelt de Minister van EZK eens per vijf jaar een nieuw zeespiegelstijgingsscenario vast (zie paragraaf 3.3.3). Het verschil tussen de snelheid van zeespiegelstijging en de natuurgrens is de *gebruiksruimte* die mag worden opgevuld door de snelheid van bodemdaling (zie paragraaf 3.3.4). Bodemdaling is het derde uitgangspunt. De mate waarin de bodemdaling de gebruiksruimte opvult, noemen we ook wel de *belasting* van de gebruiksruimte. In de onderstaande Figuur 3-8 wordt schematisch weergegeven hoe de gebruiksruimte wordt vastgesteld.



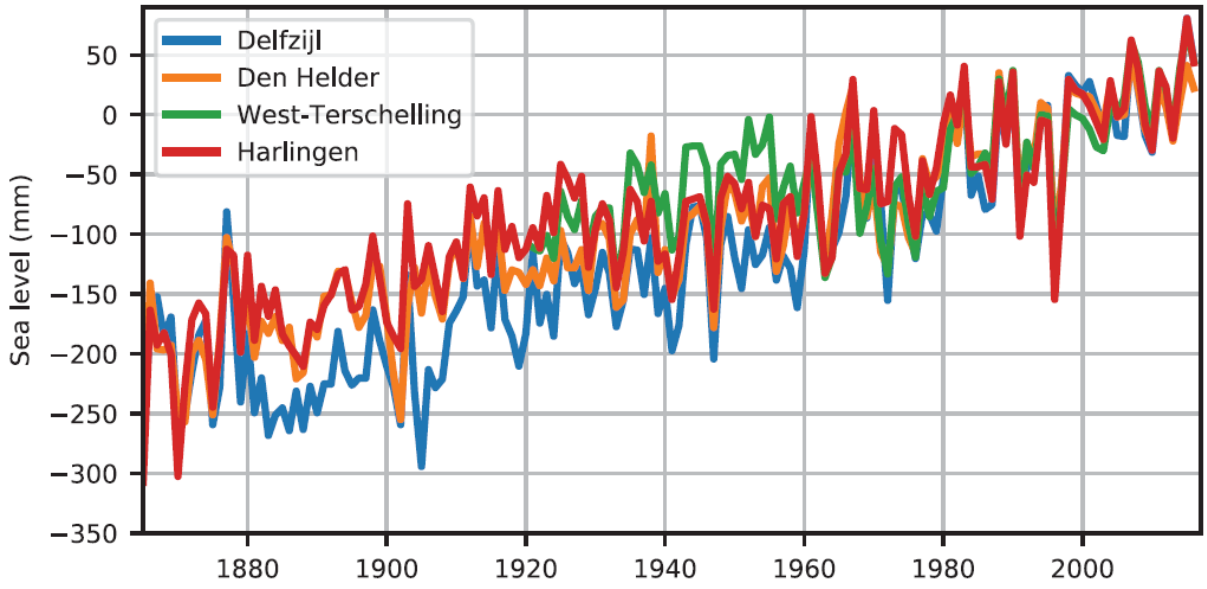
Figuur 3-8 Schematische weergave van de relaties tussen de natuurgrens als maat voor het meegroeivermogen van een kombergingsgebied, de zeespiegelstijging en de gebruiksruimte voor gaswinning onder dat kombergingsgebied. De snelheid van zeespiegelstijging in deze figuur is de huidige waargenomen snelheid, ontleend aan Baart et al 2018).

3.3.2 Uitgangspunt 1: Het meegroeivermogen van de Waddenzee

In de voorgaande paragrafen (3.2.1, 3.2.2 en 3.2.3) wordt toegelicht dat door sedimentaanvoer vanuit de Noordzeekustzone de Waddenzee kan meegroeien met de zeespiegelstijging en met bodemdaling door gaswinning. Dat meegroeivermogen is niet overal gelijk. Grotere kombergingsgebieden kennen een lager meegroeivermogen dan kleinere kombergingen (Oost et al., 1998; Wang et al., 2018). De kombergingen waaronder de huidige waddenwinningen plaatsvinden, zijn het relatief kleine Pinkegat en de grotere Zoutkamperlaag. Het gasveld Ternaard ligt onder het Pinkegat en voor een zeer klein deel onder het aangrenzende Borndiep. Wetenschappers zijn van mening dat het meegroeivermogen van het Pinkegat relatief groot is. In een recente studie schrijft men over meer dan 30 mm per jaar (Wang et al., 2018). Als uitgangspunt voor de HadK-systematiek wordt uitgegaan van een meegroeivermogen voor het Pinkegat van 6 mm per jaar, conform de Passende beoordeling voor de gaswinning Waddenzee (Ministerie van Economische Zaken, 2006). Het meegroeivermogen van 6 mm/jaar wordt als een zeer veilige natuurgrens gezien.

3.3.3 Uitgangspunt 2: De snelheid van zeespiegelstijging

Een deel van het meegroeivermogen van de wadplaten in de Waddenzee is nodig om de stijgende zeespiegel bij te houden. Over de afgelopen 50 jaar beschouwd stijgt de zeespiegel in het Waddengebied met gemiddeld 1,8 mm per jaar. Zie bijvoorbeeld Figuur 3-9. Eens in de 5 jaar laat de Minister van Economische Zaken en Klimaat onderzoeken hoe deze stijgingssnelheid zich ontwikkelt en hoe deze zal verlopen in de vijf jaren die volgen. In tegenstelling tot allerlei andere zeespiegelstijgingsscenario's, hoeft er dus maar vijf jaar vooruit voorspeld te worden. Omdat iedere vijf jaar wordt geactualiseerd, vormt het beleidsscenario voor zeespiegelstijging een realistische schatting van de daadwerkelijke stijging van de zeespiegel in het Waddengebied.



Figuur 3-9 Waargenomen jaargemiddelde zeespiegel van vier waterstandsstation uit de Waddenzee (uit Vermeersen et al., 2018).

Omdat het toekomstig versneld stijgen van de zeespiegel een zorg is, biedt het beleidsscenario voor zeespiegelstijging naast een 5-jarige prognose, ook een prognose voor de jaren daarna. Die prognose noemen we het richtscenario. In dit richtscenario is te zien wat er in de toekomst verwacht wordt, maar nog niet goed voorspeld kan worden. Op basis van het richtscenario kan worden bekeken wanneer de zeespiegelstijging de natuurgrens overschrijdt. Op basis van het richtscenario wordt bekeken wanneer de zeespiegelstijging de natuurgrens dreigt te overschrijden. Voordat daadwerkelijke overschrijding zou plaatsvinden, wordt gestopt met de gaswinning.

Over het vigerende richtscenario is discussie ontstaan omdat dit lager uitkomt dan verwachtingen die bijvoorbeeld door het KNMI zijn gepubliceerd (KNMI, 2015). Naar aanleiding daarvan heeft de Waddenacademie een studie laten uitvoeren naar zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust. Deze studie van Vermeersen et al. (2018) voorspelt een versnelling van de zeespiegelstijging die groter is dan het richtscenario uit het beleidsbesluit. Voor de voorliggende Passende beoordeling is de discussie over het richtscenario niet bepalend voor de uitkomst, omdat het hanteren van de HadK-systematiek betekent dat de winning plaatsvindt binnen de grenzen die door het meegroeivermogen en het zeespiegelstijgingsscenario. In 2021 vindt de volgende actualisatie van het beleidsscenario plaats.

3.3.4 Uitgangspunt 3: De bodemdalingssnelheid

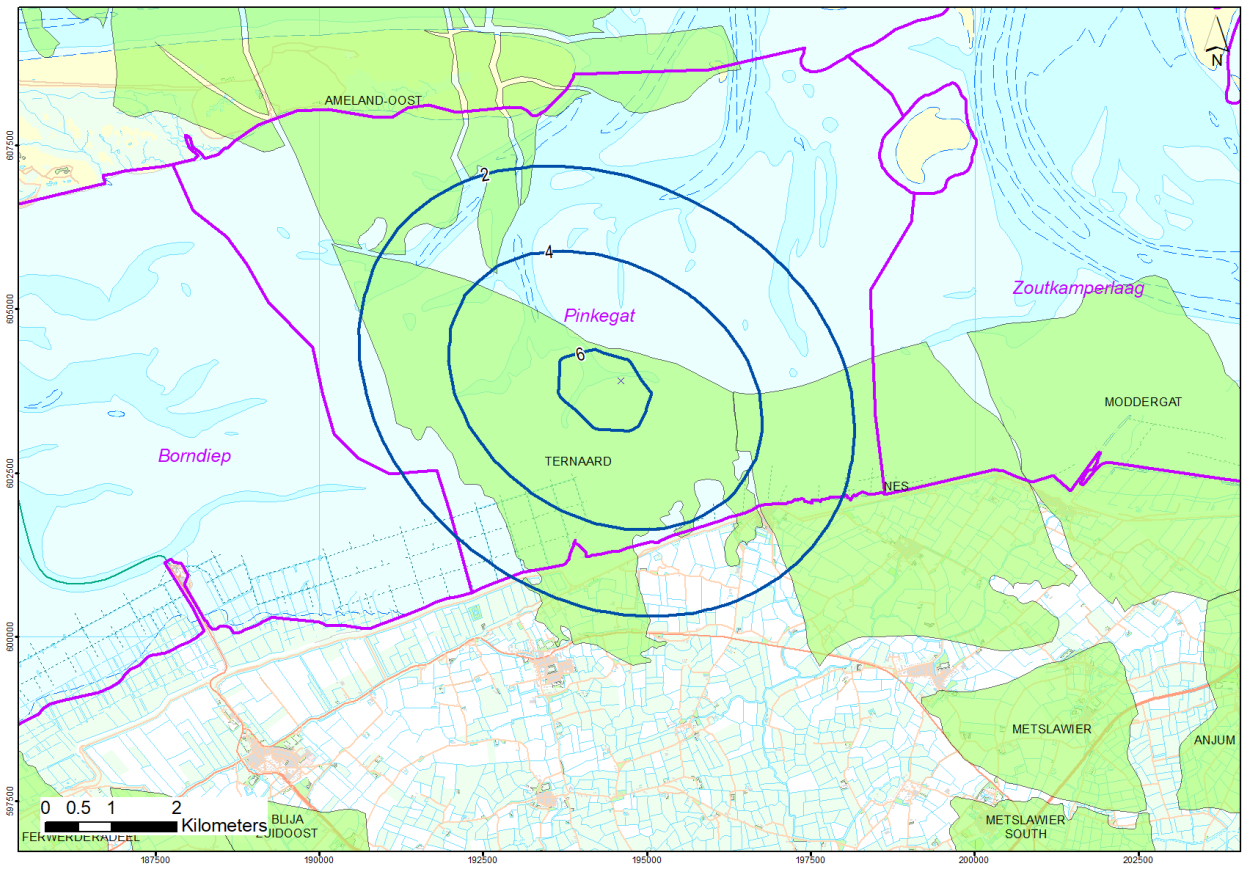
In Figuur 3-8 is te zien dat de bodemdalingssnelheid door gaswinning, opgeteld bij de snelheid van zeespiegelstijging[5] niet groter mag zijn dan de vastgestelde natuurgrens. Voor het kombergingsgebied Pinkegat is de natuurgrens bepaald op 6 millimeter per jaar. Als je daar ca. 1,8 millimeter per jaar aan zeespiegelstijging van aftrekt houd je ongeveer 4,2 millimeter per jaar over. De gebruiksruimte is dan 4,2 millimeter per jaar. De gemiddelde bodemdalingssnelheid onder het Pinkegat door alle gaswinningen samen, mag niet meer bedragen dan 4,2 millimeter per jaar.

In de bovenstaande alinea wordt gesproken over gemiddelde bodemdalingssnelheid. Het bepalen van de gemiddelde bodemdalingssnelheid voor het kombergingsgebied Pinkegat werkt als volgt. Er is bodemdaling door gaswinning onder het Pinkegat door winning uit de gasvelden Moddergat, Nes en Ameland. Op basis

[5] Dit is de relatieve bodemdaling, waar de autonome tektonische bodemdaling onderdeel van uitmaakt (Fokker et al., 2018). Omdat de tektonische bodemdaling in de berekeningen van de gebruiksruimte onderdeel uitmaakt van de relatieve zeespiegelstijging, wordt deze niet nogmaals in de berekening van de gebruiksruimte gebruikt.

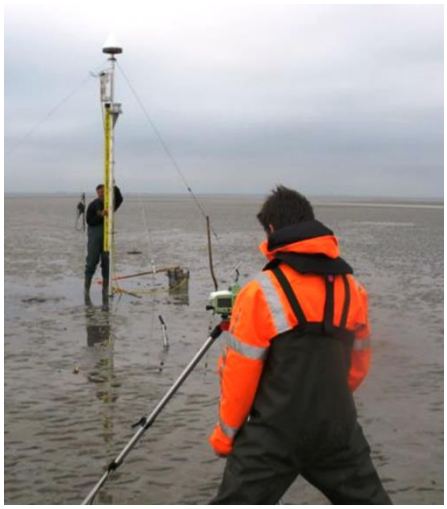
van geomechanische modellering wordt berekend hoe groot deze bodemdalingssnelheid waar onder het gebied is. Het gebied is opgedeeld in vakjes. Voor ieder vakje wordt de bodemdalingssnelheid berekend. Door alle vakjes te middelen wordt de gemiddelde dalingssnelheid berekend. Dit is echter nog niet het hele verhaal. Er wordt namelijk ook in de tijd gemiddeld. Omdat de gaswinning niet constant is en omdat de Waddenzee een dynamisch gebied is, wordt er gewerkt met een zesjarig gemiddelde. De dynamiek van de Waddenzee wordt mede bepaald door langjarige cycli in het getij, zoals de 18,6-jarige cyclus. De getijslag neemt toe en weer af met een periode van 18,6 jaar, waardoor met enige vertraging ook de omvang van de geulen toeneemt en dan weer afneemt. In de Passende beoordeling voor de gaswinning Waddenzee (Ministerie van Economische Zaken, 2005) is vastgesteld dat deze periode van 18,6 jaar te lang is om praktisch bruikbaar te zijn voor het HadK-principe en daarom is voor een middeling over zes jaar gekozen. Voor alle duidelijkheid, de cyclus van 18,6 jaar in het getij is niet de enige variabele die leidt tot dynamiek in het wadengebied. Ook de variaties in de meteorologische condities, langjarige trends in de morfologische ontwikkelingen en bijvoorbeeld het verschuiven van (delen van) het wantij leiden tot veranderingen in de morfologie voor het berekenen van de belasting van de gebruiksruimte op een bepaald moment, betreft het de gemiddelde belasting van drie jaar ervoor en drie jaar erna.

De bodemdalingssnelheid wordt berekend aan de hand van modellen van de diepe ondergrond. Een eerste model maakt een driedimensionale geologische beschrijving van de diepe ondergrond onder een groot deel van het Waddengebied. Een tweede model berekent hoe het drukverloop in de gasreservoirs en aansluitende watervoerende lagen zal verlopen. Een derde model berekent hoe dat drukverloop leidt tot compactie van het gasreservoir en hoe dat uiteindelijk doorvertaald naar bodemdaling aan het aardoppervlak. Dit laatste model noemen we het geomechanisch model. De met de modellen voorspelde bodemdaling aan het einde van de winning is weergegeven in Figuur 3-10, zie voor een nadere toelichting het Winningsplan (NAM, 2019)



Figuur 3-10 Dalingscontour (cm) van de gaswinning Ternaard in 2050, horende bij de voorgenomen gaswinning in tabel 2.1 uit paragraaf 2.1.2.

Het geomechanisch model wordt tijdens de winning gekalibreerd en geverifieerd aan de hand van bodemdalingsmetingen op het land en op het wad. Op het wad zijn daarvoor stalen palen diep in de wadbodem geplaatst; de zogenaamde peilmerken (Figuur 3-11).



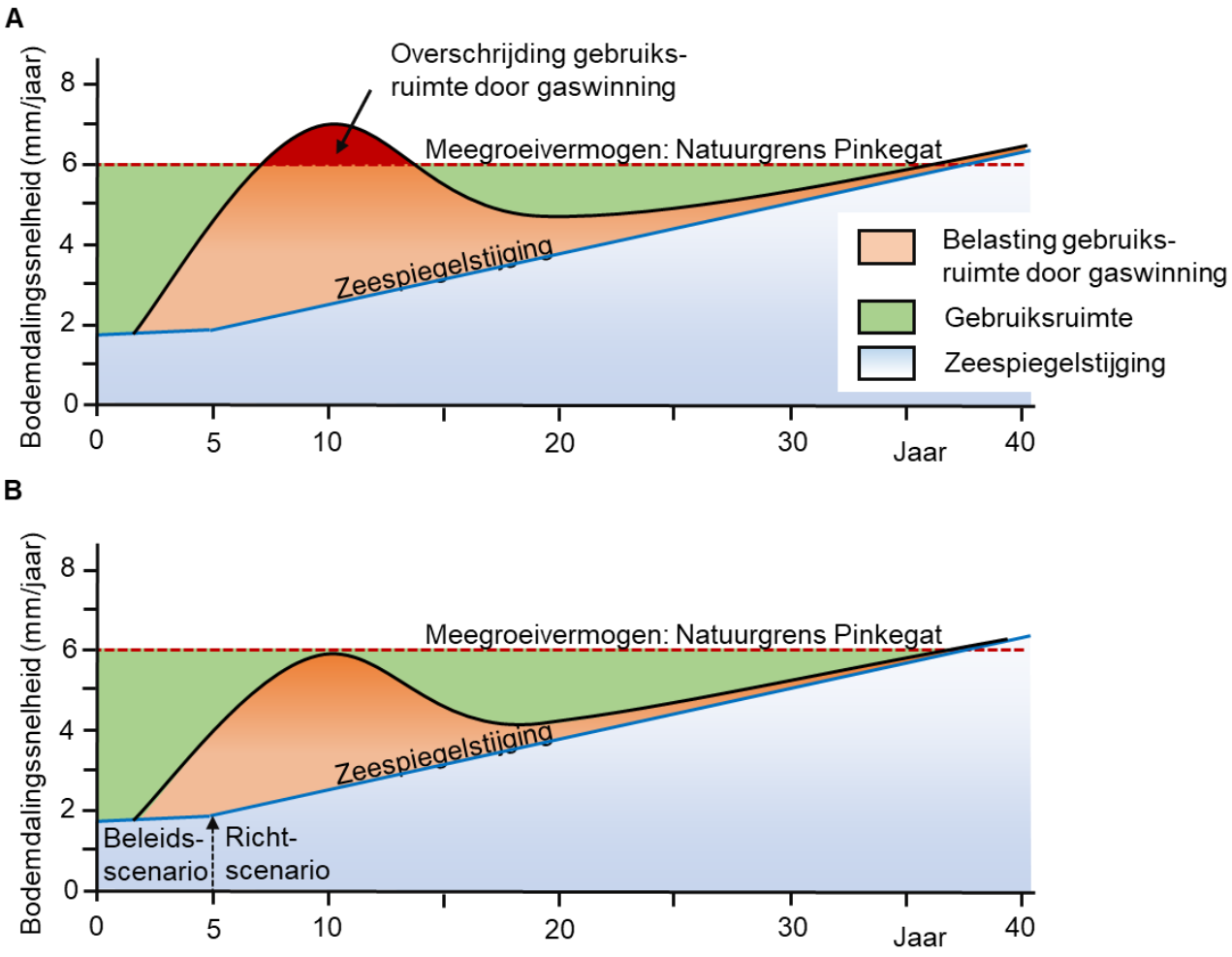
Figuur 3-11 Inmeten van een peilmerk: 6 meter lange palen staan helemaal onder het sedimentoppervlak. Ze dalen mee met de diepe bodemdaling. Minimaal eens per drie jaar wordt de kop van de paal uitgegraven en wordt er een gps-antenne op de paal gezet waardoor de gps-ontvanger permanent boven water staat. Door vijf dagen lang aaneengesloten te meten ontstaat een zeer nauwkeurige bepaling van de hoogte. Deze nauwkeurige bepaling is nodig om de kleine hoogteveranderingen door bodemdaling te registreren. Op de palen wordt niet de bodemhoogteverandering van het wad gemeten.

3.3.5 De Meet- & Regelcyclus

De technische details met betrekking tot de HadK-systematiek zijn vastgelegd in het Meet- & Regelprotocol. Dit protocol is als voorwaarde opgenomen in het instemmingsbesluit op het Winningsplan (MLV). Ieder jaar wordt de zogenaamde Meet- & Regelcyclus doorlopen en wordt de Meet- & Regelrapportage aan het bevoegd gezag (het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat) aangeleverd. In die rapportage laat NAM zien hoe ze ervoor zorgt dat de bodemdalingsnelheid onder de Waddenzee de gebruiksruimte niet overschrijdt of dreigt te overschrijden.

Figuur 3-12 is een fictief voorbeeld dat bedoeld is om uit te leggen hoe de HadK-systematiek werkt en toont in twee grafieken de snelheid van zeespiegelstijging, de belasting van de gebruiksruimte door de geprognotiseerde bodemdalingsnelheid en de natuurgrens. Op de Y-as staat in millimeters per jaar de snelheid van de zeespiegelstijging, de bodemdalingssnelheid (gemiddelde over het komberginsggebied) en de natuurgrens (het meegroeivermogen). Op de X-as staat de tijd in jaren. De zeespiegelstijging is het lichtblauwe vak, waarbij de eerste vijf jaar sprake is van een versnelde zeespiegelstijging (het beleidsscenario) en daarna een versnelling plaats (het richtscenario). Bovenop de zeespiegelstijgingsnelheid is een groen vlak zichtbaar. Dit vlak representeert de beschikbare gebruiksruimte die overblijft als van het meegroeivermogen de zeespiegelstijging wordt afgetrokken. Vanwege de versnelling van de zeespiegelstijging, neemt de beschikbare gebruiksruimte af tot nul, als de snelheid van zeespiegelstijging groter wordt dan het meegroeivermogen.

Figuur 3-12 bestaat uit twee delen, A en B. Dit zijn twee berekeningen van de belasting van de gebruiksruimte.Voor A geldt een productiescenario waardoor de gebruiksruimte zou worden overschreden. Voor deel B geldt een aangepast winningscenario waardoor die overschrijding niet optreedt. In deel B wordt de gasproductie, zodat de Natuurgrens van 6 mm/jaar niet wordt overschreden. Dit is een voorbeeld van de preventieve werking van de HadK-systematiek. Dit geheel nameten, berekenen en rapporteren noemen we de Meet- & Regelcyclus.



Figuur 3-12 Twee fictieve grafieken van de gebruiksruimte en de versnelde zeespiegelstijging in het Pinkegat als voorbeeld voor de werking van de HadK-systematiek (gebasseerd op het fictieve voorbeeld dat is opgenomen in het MER Gaswinning Waddenzee, NAM, 2006). In deel A is de totale belasting van de gebruiksruimte te groot en wordt de natuurgrens overschreden. Dit is niet toegestaan en daarom wordt de gasproductie aangepast, door een nieuw productieplan op te stellen. Deel B toont een herberekening op basis van dat nieuwe productieplan. Nu past de bodemdaling door gaswinning wel binnen de gebruiksruimte.

3.3.6 Ecologische monitoring

Naast het Meet- & Regelprotocol kent de gaswinning Waddenzee ook een voorgeschreven monitoringprogramma (opgenomen als bijlage D bij deze Passende beoordeling). Dus enerzijds is er de HadK-systematiek die voorkomt dat effecten op de natuur kunnen optreden, anderzijds is er een ecologisch monitoringprogramma dat het uitblijven van deze effecten dient te bevestigen. Het monitoringprogramma is dus een extra controle voor het geval dat de HadK-systematiek niet zou werken. Dit monitoringprogramma is opgenomen als voorwaarde in de Natuurbeschermingswetvergunning voor gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.

Het monitoringprogramma is gericht op het verzamelen van data op basis waarvan de ontwikkeling van een aantal instandhoudingsdoelstellingen voor de Waddenzee kan worden gevolgd. De focus hierbij ligt op instandhoudingsdoelen die, indien er daadwerkelijk bodemdaling aan het wad- of kwelderoppervlak zou plaatsvinden, daar nadelig door beïnvloed zouden kunnen worden. Vooruitlopend op het beoordelingskader in Hoofdstuk 5 worden deze hieronder kort besproken.

Areaal droogvallende wadplaten - Met als doel het areaal droogvallende wadplaten te berekenen, wordt er twee keer per jaar met een laser (LiDAR) vanuit een vliegtuig de hoogte van de wadplaten in Pinkegat en Zoutkamperlaag ingemeten. Deltares analyseert op basis van deze gegevens waar de wadplaten groeien en

waar ze eroderen. Naast deze vlakdekkende methode wordt een aantal platen in detail gevolgd in de tijd met spijkermetingen. Deze metingen worden nader toegelicht in het monitoringprogramma (Bijlage D).

Voor alle duidelijkheid: met de monitoring van de platen met LiDAR wordt niet vastgesteld of het sedimentatievolume in het kombergingsgebied voldoende groot is voor het bijhouden van de zeespiegelstijging en de bodemdaling door de gaswinning. Ook de vaklodingen die door Rijkswaterstaat worden uitgevoerd zijn niet gericht op het vaststellen van deze sedimentatie. De nauwkeurigheid[6] waarmee met deze metingen het netto sedimentatievolume kan worden vastgesteld, is ten opzichte van de omvang van deze sedimentatie te beperkt. Onder andere vanwege deze beperking aan het meten van de morfologische ontwikkelingen, is de berekening van de gebruiksruimte ingesteld als onderdeel van de HadK-systematiek.

Draagkracht voor een aantal vogelsoorten - De draagkracht van de wadplaten voor daarop foeragerende vogels wordt bepaald door een groot aantal factoren en is tamelijk specifiek voor de verschillende vogelsoorten. Vanwege de mogelijke relatie met bodemdaling door gaswinning focust het monitoringprogramma op de voedselbeschikbaarheid en voedselbereikbaarheid van een aantal soorten. Om deze proxy voor draagkracht te berekenen is een ecologisch model gebouwd waarin een aantal databronnen samenkomen. Ten eerste de hierboven genoemde hoogteligging van het wad, die bepalend is voor de droogvalduur van het voedsel. De -niet voorspelde en verwachte- gevolgen van bodemdaling zouden via veranderingen in de droogvalduur door verlaging van de wadplaten door bodemdaling tot uiting komen. Ten tweede zijn ook de waterstanden bepalend voor de droogvalduur. Deze worden op basis van metingen in de vaste waterstandsstations van Rijkswaterstaat berekent met het programma Intertides (Rappoldt & Ens, 2013; Ens et al., 2015). Ten derde wordt, op basis van het dieet van een vogelsoort, de hoeveelheid voedsel geschat uit bodemdiereninventarisaties zoals SIBES (Compton et al. 2013) en de schelpdierinventarisaties (Van den Ende et al. 2018; Perdon et al., 2018). Door het combineren van deze monitoringdata en kennis van de voedselecologie van de vogels en hun prooidieren wordt de draagkracht van het gebied jaarlijks bepaald (Ens et al. 2015, 2016, 2017, 2018).

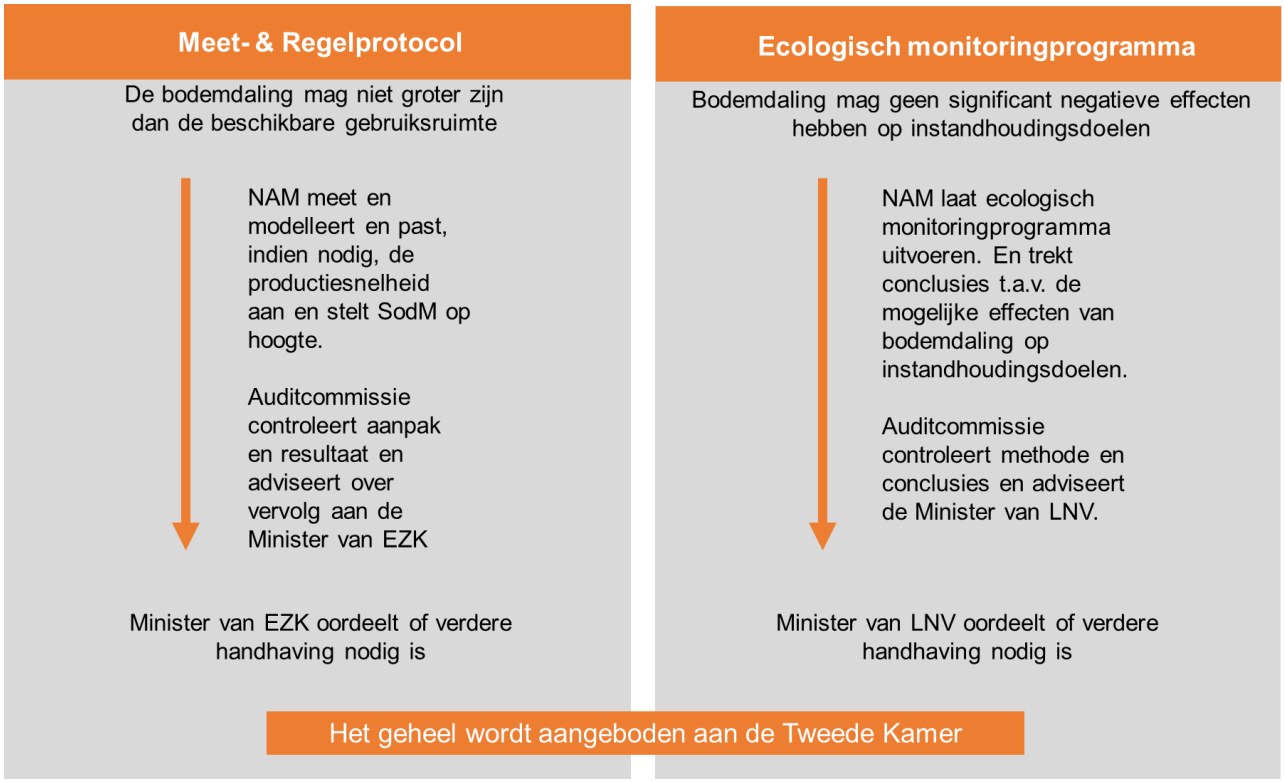
Areaal en kwaliteit van kwelderhabitats - De kwelder die onder invloed staat van de gaswinning MLV, is de Paesumerlannen. Op deze kwelder van 485 ha bij Paesens en Moddergat, wordt de opslibbingsnelheid gemeten en wordt de ontwikkeling van de vegetatie gemonitord (van Duin, 2018). Op basis van deze gegevens wordt beoordeeld hoe verschillende kwelderhabitats zich ontwikkelen. Nota bene, de voorspelde bodemdaling door de gaswinning Ternaard sterkt zich niet uit tot onder kwelder Paesumerlannen.

Het monitoringprogramma in bijlage D ziet ook op de ecologische ontwikkeling van het Lauwersmeergebied. Dat is voor deze Passende beoordeling over de voorgenomen gaswinning Ternaard, verder niet van belang, omdat de bodemdaling door de Ternaard Gaswinning niet onder het Lauwersmeergebied plaatsvindt. Tegelijkertijd met de Meet- & Regelrapportage rapporteert NAM ieder jaar de voortgang van de ecologische monitoring aan de Ministeries van EZK en LNV (zie bijvoorbeeld NAM, 2018). Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 3.3.7.

3.3.7 Bevoegdheid, taakverdeling en rapportage

Zoals in de bovenstaande paragrafen reeds is aangegeven, is de HadK-systematiek uitgewerkt in het Meet- & Regelprotocol. Daarin wordt op basis van drie sturende variabelen, namelijk: de bodemdalingssnelheid, de zeespiegelstijgingssnelheid en de natuurgrens bepaald of de gasproductie moet worden bijgestuurd. Tevens kunnen afwijkingen in ecologische variabelen, waarvoor niet redelijkerwijs kan worden uitgesloten dat het om een effect van bodemdaling door gaswinning gaat, leiden tot een het beperken van de gaswinning. Het Meet- en Regelprotocol en het Ecologische monitoringsprogramma zijn naast elkaar weergegeven in Figuur 3-13, omdat dit twee separate routes vormen die de HadK bewaken.

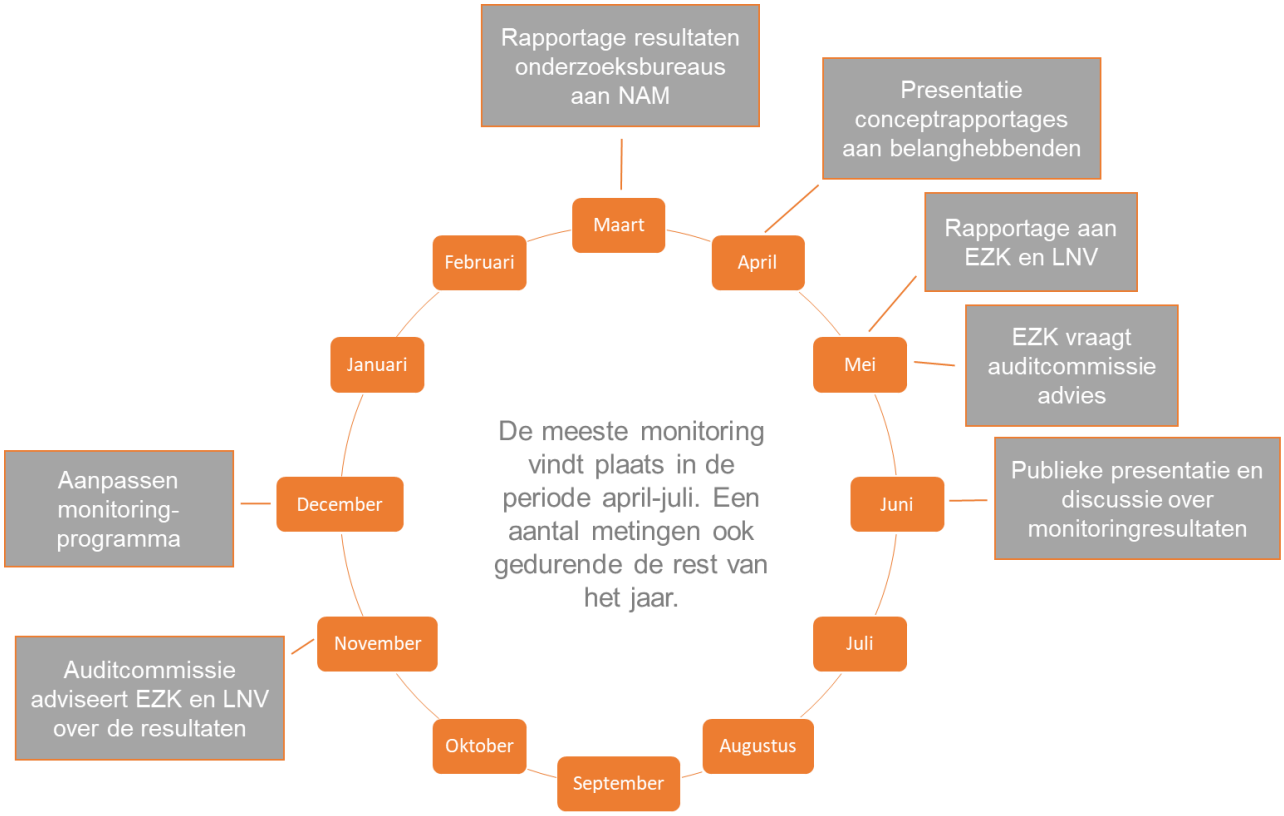
[6] De nauwkeurigheid waarover hier wordt gesproken is een ruimer begrip dan de nauwkeurigheid van de metingen zelf (en die is weer ruimer dan de statistische meetfout). Het omvat bijvoorbeeld ook de natuurlijke variaties die optreden in het bodemvolume, bijvoorbeeld doordat de poriënruimte tussen de sedimentdeeltjes bij opeenvolgende metingen verschilt en doordat op delen van wadplaten onder rustige omstandigheden een sliblaag kan opbouwen, die in sommige metingen wel en in andere metingen niet wordt opgemeten.



Figuur 3-13 Flowchart van de metingen (links) en monitoring (rechts), de rapportages en de rol van de auditcommissie en de Ministeries.

Figuur 3-13 toont de twee routes die kunnen leiden tot het aanpassen van de gasproductie onder de Waddenzee. Links staat de HadK-systematiek waarin NAM conform het Meet- & Regelprotocol de voorgenomen bodemdalingssnelheid/productiesnelheid controleert en eventueel bijstelt, door de productiesnelheid aan te passen. De Auditcommissie controleert en adviseert de Minister van EZK, die kan besluiten handhavend op te treden als daar aanleiding toe is. Rechts staat het ecologische monitoringprogramma. De NAM rapporteert over de resultaten (zie NAM, 2018). De Auditcommissie controleert de monitoringresultaten en beoordeelt de conclusies. Als een effect van bodemdaling door gaswinning op instandhoudingsdoelstellingen niet redelijkerwijs kan worden uitgesloten, kan de Minister van LNV besluiten om de gasproductie onder de Waddenzee te temporiseren of te staken. Over de resultaten uit de Meet- & Regelrapportage en ecologische monitoring rapporteren de Ministers van EZK en LNV jaarlijks gezamenlijk aan de Tweede Kamer.

Jaarlijks wordt dus gerapporteerd over de meet en regelcyclus en de monitoring. Naast formele rapportageverplichtingen worden belanghebbenden actief van de voortgang en resultaten op de hoogte gehouden. Hoe dit proces door het jaar heen verloopt is te zien in de onderstaande figuur (Figuur 3-14).



Figuur 3-14 Jaarcyclus voor de rapportage over de ecologische monitoring en resultaten uit de Meet- & Regelcyclus.

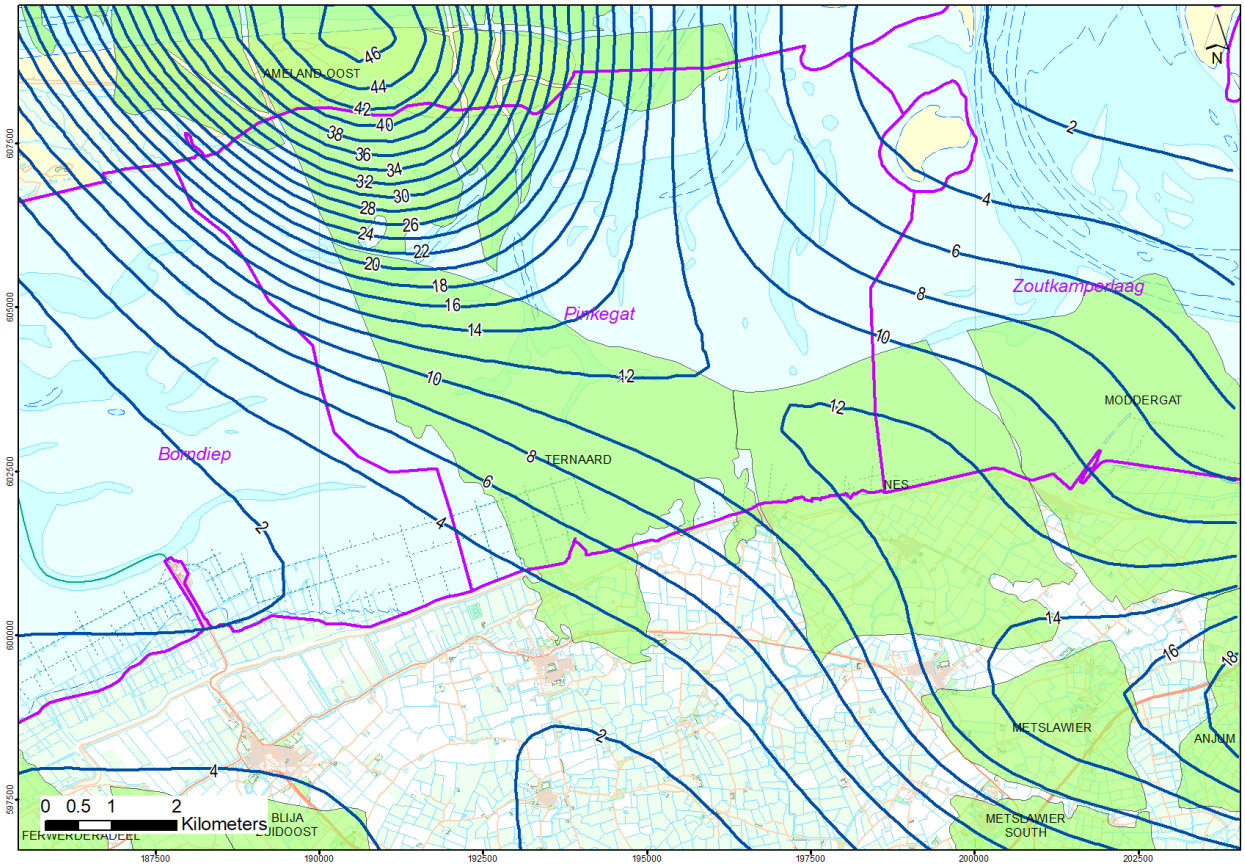
3.3.8 Extra volume zandsuppleties

Zoals beschreven in paragraaf 3.2.2 zorgt de sedimentuitwisseling tussen de Waddenzee en de Noordzeekustzone ervoor dat bodemdaling in de Waddenzee zich niet aan het wadoppervlak manifesteert. Het volume bodemdaling wordt dus aangevuld omdat er netto meer zand in de Waddenzee achterblijft. Dit zand komt echter wel ergens vandaan, namelijk uit de buitendelta en vooroever en andere delen van de Noordzeekustzone. De Noordzeekustzone tot aan de 20 meter dieptelijn noemen we het kustfundament. Om het kustfundament op peil te houden, voert Rijkswaterstaat zandsuppleties uit. Het volume aan zandsuppletie komt overeen met de oppervlakte van de Delta, Waddenzee en het Kustfundament, vermenigvuldigd met de zeespiegelstijging. Op dit moment is dat zo'n 12 miljoen kuub zand per jaar.

Het bodemdalingsvolume in de Waddenzee wordt aangevuld met zand vanuit het kustfundament en dit zandvolume dient door middel van zandsuppletie in het kustfundament te worden teruggebracht. Dat kan door suppletie van zand uit de diepere Noordzee (beneden de -20 meter dieptelijn) in het kustfundament. Conform de werkwijze bij de gaswinning Waddenzee wordt via de vergunningvoorschriften en het instemmingsbesluit de verplichting tot een extra volume zandsuppletie als voorwaarde opgelegd bij de gaswinning Ternaard. Daarmee wordt dit extra volume zandsuppletie behandeld als onderdeel van het project gaswinning Ternaard. De omvang van het extra volume zandsuppletie is afhankelijk van de daadwerkelijke omvang van de gaswinning. Hoe in deze Passende beoordeling het extra volume zandsuppletie wordt beschouwd, is opgenomen in paragraaf 6.2.7.

3.3.9 Gaswinning Ternaard en de Hand aan de Kraan-systematiek

Het gasveld Ternaard ligt ten westen van de gasvelden Moddergat en Nes, grotendeels onder het kombergingsgebied Pinkegat. De voorgenomen gaswinning Ternaard wordt opgenomen in het Meet- & Regelprotocol voor gaswinning onder de Waddenzee. Dat betekent dat de bodemdaling die de gaswinning Ternaard veroorzaakt, ieder jaar wordt beoordeeld en gereguleerd in cumulatie met die van de gaswinningen Nes, Moddergat en Ameland. Figuur 3-15 toont de voorspelde bodemdaling die het gevolg is van de verschillende gaswinningen, waaronder die van Ternaard. Ook voor Ternaard is dan de HadK-systematiek van toepassing. Daarmee wordt voorkomen dat de gaswinning Ternaard kan leiden tot een afname van het areaal droogvallende wadplaten of de droogvalduur daarvan.



Figuur 3-15 Dalingscontour (cm) van alle gaswinningen, met inbegrip van de gaswinning Ternaard, in 2050.

Tevens zal de gaswinning Ternaard opgenomen worden in het ecologisch monitoringprogramma voor gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Dit houdt in dat jaarlijks zal worden bestudeerd en gerapporteerd of classificerende natuurwaarden, behorend tot het Natura 2000-gebied Waddenzee, niet in kwaliteit of omvang achteruitgaan. Wanneer dat wel het geval is, zal aannemelijk moeten worden gemaakt dat dit niet het effect is van de gaswinning Ternaard. Lukt dat niet, dan is het aan de Minister van LNV om te bepalen of er sprake is van significante schade aan instandhoudingsdoelstellingen en of de gaswinning moet worden aangepast (zie ook Figuur 3-13). Door de gaswinning Ternaard mee te nemen in deze monitoring en rapportage cyclus vindt er een jaarlijkse controle plaats die uitwijst of de conclusies uit deze Passende beoordeling nog steeds van kracht zijn.

Opname van Ternaard in de bovengenoemde meet- en monitoringprogramma's leidt tot een aantal wijzigingen in die programma's. Ten behoeve van het Meet- & Regelprotocol worden er veel hoogtemetingen uitgevoerd. Op het land zijn dit waterpassingen. Deze waterpassingen vinden reeds plaats in Ternaard en omgeving. Op het wad zijn dit GPS-metingen op peilmerken (Figuur 3-11). Ter voorbereiding op de voorgenomen gaswinning Ternaard is het aantal peilmerken in de Waddenzee uitgebreid. Deze nieuwe peilmerken worden reeds ingemeten ten einde een goede nulmeting te hebben. Ook is er op het land, boven de zuidelijke uitloper van het gasveld een gps-logger geplaatst die continu de bodemdaling meet. Dergelijke loggers staan ook in Moddergat, Anjum en Ameland. Ze dienen ter signalering. De resultaten worden dan ook maandelijks aan SodM gerapporteerd.

Naast de bovengenoemde extra geodetische metingen, zal ook het ecologische monitoringprogramma worden uitgebreid. Een aantal metingen, zoals de wadplaathoogte, vogels en bodemdieren worden reeds op kombergingsniveau uitgevoerd, zodat uitbreiding niet nodig is. Voor de erosie/sedimentatie metingen (Spijkermetingen) is het programma reeds uitgebreid zodat deze metingen ook boven het gasveld Ternaard

plaatsvinden. Daarnaast zal er monitoring plaatsvinden om de ontwikkeling van de kwelderfragmenten 't Skoar en de Kromme Horne bij Wierum te bestuderen. Deze aanpassingen zijn te vinden in bijlage E.

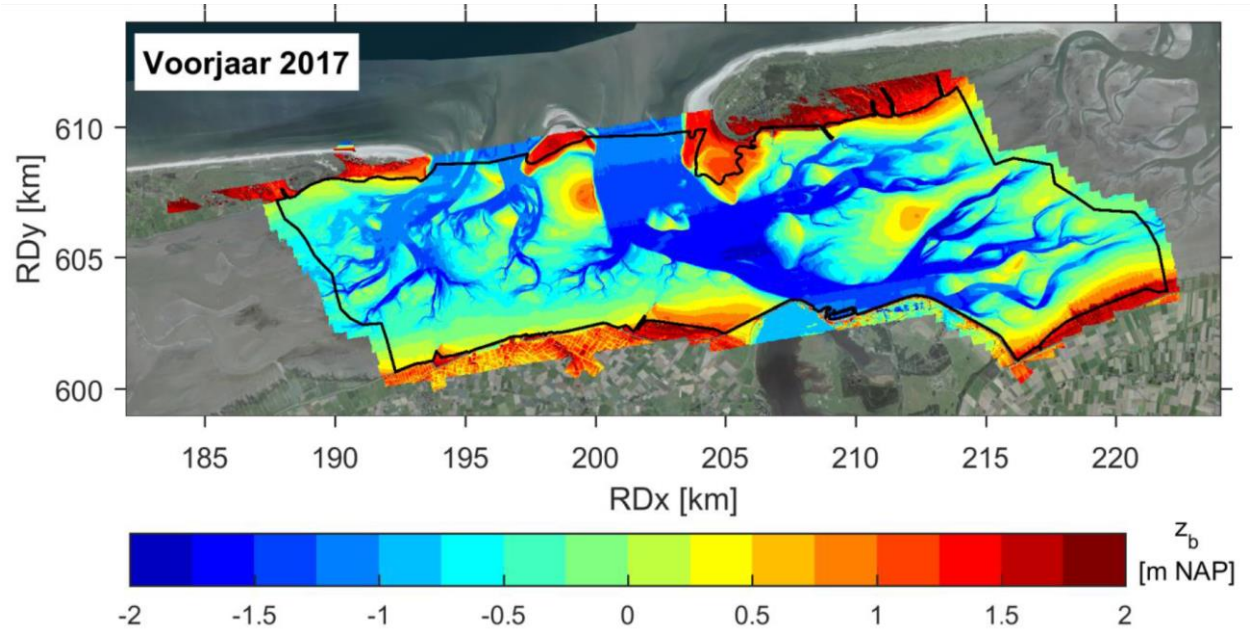
3.3.10 Hand aan de Kraan systematiek in de praktijk

De afgelopen 11 jaar is de HadK-systematiek van toepassing op de Gaswinning MLV. Het toepassen van Hand-aan-de-Kraan suggereert dat gedurende deze 11 jaar aan 'de gaskraan' is gedraaid. Dat is in deze periode niet nodig geweest, omdat de gasproductie van de verschillende gasvelden zorgvuldig is gestuurd, zodat de Natuurgrens van het Pinkegat niet is overschreden door de bodemdaling. Het sturen van de gasproductie gaat onder andere door het plannen van het boren van nieuwe productieputten. Als de productie in gasvelden met bodemdaling onder het Pinkegat niet was beperkt door de beschikbare gebruiksruimte, dan was de afgelopen jaren meer of sneller gas gewonnen uit deze velden. Door het uitvoeren van productieberekeningen, modelberekeningen van de bijbehorende bodemdaling en het verzamelen van drukgegevens van de gasvelden worden prognoses gemaakt van de bodemdaling, waarop wordt toegezien door de SODM en het ministerie van EZK. De sturing van de gasproductie van de verschillende velden vindt bij de NAM plaats en is daarmee minder zichtbaar voor de buitenwereld. Wel worden de toegepaste methoden en technieken beoordeeld door SODM en EZK.

Zichtbaar aan de HadK-systematiek bij de Gaswinning MLV is het omvangrijke dossier aan meet- en monitoringsinformatie[7]. Bij de Waddenzee gaswinning Ameland wordt ook gemeten en gemonitord[8]. De jaarlijkse rapportages over de bodemdaling en ecologische parameters leiden tot jaarlijkse evaluaties met de Auditcommissie en belanghebbenden en beoordeling door de bevoegd gezagen. Onderwerp van de evaluaties zijn de geobserveerde trends in monitoringdata en de kwaliteit van meten en modelleren. De evaluaties leiden regelmatig tot aanvullende onderzoeksinspanning waardoor de kwaliteit van de metingen en de conclusies toenemen. In deze paragraaf wordt een aantal recente voorbeelden behandeld.

Monitoring van de wadplaten
Tweemaal per jaar laat NAM de hoogte en ligging van de wadplaten in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag inmeten. Dit gebeurt met een laserscanner vanuit een vliegtuig en deze methode heet LiDAR. Bij de LiDAR-metingen wordt vanuit een vliegtuig de hoogte in een brede baan onder het vliegtuig ingemeten. De eigenlijke meting wordt uitgevoerd met een bundel laserlicht, waarvan de weerkaatsing op het oppervlak wordt gebruikt om de afstand tussen vliegtuig en oppervlak te bepalen. In combinatie met de plaatsbepaling van het vliegtuig wordt dan de hoogte ten opzichte van NAP berekend. Het oppervlak waarvan de hoogte wordt bepaald, hoeft niet een wadplaat te zijn, ook de hoogte van het wateroppervlak in de Waddenzee wordt ingemeten. De LiDAR-hoogtemetingen worden daarom uitgevoerd tijdens laagwater, als de wadplaten zijn drooggevallen. Van de getijdegeulen wordt dan de hoogte van het wateroppervlak ingemeten. In de kaart in Figuur 3-16 is dit zichtbaar als het vertakkende geulpatroon met donkerblauwe kleuren. Het meest recente rapport van Deltares (Van der Lugt et al., 2019) over de LiDAR-metingen geeft een uitgebreid overzicht van het meetproces en de verwerking van de gegevens.

[7] Beschikbaar via https://www.nam.nl/gas-en-oliewinning/wadden.html
[8] Beschikbaar via https://www.waddenzee.nl/themas/bodemdaling-ameland/



Figuur 3-16 Kaart van de LiDAR-hoogteopname voorjaar 2017 (Schrijvershof et al., 2018).

De bovengenoemde LiDAR-metingen vinden plaats sinds 2010. Op basis van commentaren en aanwijzing van de Auditcommissie (3.3.7) zijn de metingen en het proces van data-analyse de afgelopen jaren sterk verbeterd. Hierdoor is meetfout afgenomen en de betrouwbaarheid en bruikbaarheid van de metingen vergroot.

De gemeten trend in het areaal wadplaten sinds 2010 is licht negatief (Schrijfershof et al., 2018). In eerste instantie is aan deze trend weinig aandacht besteed omdat de onderzoekers van mening waren dat deze binnen de meetfout van de meetmethode lag en daarmee niet te onderscheiden was van een artefact. Op aanwijzing van de Auditcommissie is Deltares toch gaan analyseren wat een mogelijke verklaring van het geobserveerde fenomeen zou kunnen zijn. Schrijfershof et al. (2018) vinden een indicatie dat de geobserveerde negatieve trend te relateren is aan de hoogte van de laagwaterstand. Ze verklaren dit als volgt. Bij een zeer laag laagwater vindt er een betere drainage van de wadplaten plaats, waardoor er minder water op de wadplaten blijft staan. Dit leidt tot een gemiddeld lagere ligging van het gemeten wadoppervlak. Toevalligerwijs correleert dit fenomeen in zekere mate met de meetjaren (co-lineairiteit) waardoor er een sprake lijkt te zijn van een verandering in de tijd. Er zijn echter meer factoren die de hoeveelheid water die tijdens laagwater op de wadplaten achterblijft bepalen. Denk daarbij aan de windrichting. De relatie tussen de laagte van de laagwaterstand en de gemeten omvang van het areaal droogvallende wadplaten (boven NAP) is daardoor niet erg sterk. Deltares wijst erop dat de gemeten trend in wadplaathoogte niet geleidelijk is. Er zitten “sprongen” in de data die overeenkomen met veranderingen in de meettechniek (nieuwere laserscanner).

In bovenstaande voorbeeld is te zien hoe in een vroeg stadium een trend in een morfologische parameter, die direct gerelateerd is aan de ecologische waarde van het gebied (areaal droogvallende wadplaten) wordt geïdentificeerd en bediscussieerd en dat dit leidt tot nadere studie met als doel de trend en de mogelijke rol van bodemdaling door gaswinning daarin te begrijpen. De komende jaren zal dit onderzoek doorgaan.

Ontwikkelingen van de kwelders De Hon en Neerlands Reid op Ameland
De gaswinning Ameland heeft een eigen ecologisch monitoringprogramma dat wordt opgesteld en gecoördineerd door de begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland. Deze commissie begeleid de monitoring sinds de start van deze gaswinning in 1986.

Onder de kwelders De Hon en Neerlands Reid aan de oostzijde van Ameland is de bodem plaatselijk meer dan 30 cm gedaald. Tijdens overstromingen van de kwelder laat de zee sediment achter waardoor deze

weer ophoogt. Eilandkwelders ontvangen echter minder sediment dan de vastelandskwelders. De bodemdaling wordt op Ameland dan ook niet overal gecompenseerd door die opslibbing. De verlaging van het kwelderoppervlak ligt dan ook tussen de 0 en de 20 cm. De eerste 25 jaar leidde dit niet tot veranderingen in de vegetatie. De laatste jaren zijn er lokaal wel duidelijke veranderingen geconstateerd. Uit nader onderzoek blijkt dat in deelgebieden de overstromingsfrequenties zijn toegenomen. Ook in het broedseizoen lijkt dat het geval te zijn. Het Ministerie van LNV heeft de monitoringsresultaten beoordeeld en geconcludeerd dat er op dit moment geen sprake is van significante schade aan de instandhoudingsdoelen van het gebied. Wel vraagt LNV dat het monitoringprogramma zodanig wordt aangepast dat op korte termijn meer inzicht komt in het effect van de toegenomen overstromingskans in het broedseizoen. Ook dit is een voorbeeld van de rol en werking van de ecologische monitoring en jaarlijkse rapportage daarover.

In relatie tot de voorgenomen gaswinning Ternaard zijn er geen zorgen over het effect van bodemdaling onder de kwelders. Bodemdaling onder de kwelders door de gaswinning Ternaard treedt alleen op onder het kwelderfragment bij ‘ Skoar en onder het kwelderfragment bij Wierum: de Kromme Horne. Onder de nabijgelegen kwelder ten oosten van de veerdam Holwerd, de Paezummerlannen en de kwelders van Ameland treedt geen bodemdaling op door de gaswinning bij Ternaard. De hoeveelheid bodemdaling die bij de kwelderfragmenten waaronder de bodemdaling door de gaswinning Ternaard zal plaatsvinden, is namelijk veel kleiner dan bij de eilandkwelders op Ameland het geval is. Desalniettemin zal de bodemdaling en ecologische ontwikkeling van de kwelders ’t Skoar en Kromme Horne worden gemonitord in aanvulling op het bestaande monitoringsprogramma v0or de MLV-gaswinning en zal hierover jaarlijks worden gerapporteerd aan betrokken partijen.

Tijdsafhankelijke bodemdaling
Met tijdsafhankelijke bodemdaling refereren we naar het zogenaamde na-ijlen van bodemdaling, ook nadat de gaswinning wordt gestopt. Deze tijdsafhankelijke bodemdaling werd geobserveerd voor het gasveld Ameland. Het leidde ertoe dat de modellen niet naar tevredenheid de bodemdaling bij Ameland konden beschrijven. Op aanwijzen van SODM is in 2011 een studie opgestart met als doel vast te stellen welke processen in de diepe ondergrond hieraan ten grondslag lagen en wat de betekenis hiervan zou zijn voor bodemdaling onder de Waddenzee op lange termijn. Deze studie droeg de naam “Long-Term Subsidence” (LTS). In de studie is, onder begeleiding van een internationale commissie van experts, het totaal aan mogelijke processen bestudeerd. Denk hierbij onder meer aan zoutkruip, gesteentekruip en depletie (=drukdaling) van watervoerende lagen (aquifers). In de studie is gekeken wat deze processen betekenen voor bodemdaling in het Waddengebied op langere termijn. Daarnaast heeft een casestudie voor het gasveld Ameland plaatsgevonden. Deze casestudie bestond uit het ontwikkelen en toepassen van een rekenmethode waarmee op basis van de bodemdalingsmetingen aan het aardoppervlak het meest waarschijnlijke bodemdalingsmodel automatisch kon worden gekozen. Tevens biedt deze rekenmethode een overzicht van alle modelvariaties en de waarschijnlijkheid daarvan. De resultaten uit de LTS-studie zijn overgenomen in de Meet- & Regelanalyses en -rapportages. Daardoor wordt nu standaard de voorspelde na-ijling van de bodemdaling gerapporteerd. Ook voor de gaswinning Ternaard wordt de opgedane kennis en kunde uit de LTS-studie in de modellering van de bodemdaling toegepast. De betekenis van het na-ijleffect van bodemdaling is in paragraaf 8.2.2 van deze Passende beoordeling beoordeeld.

4 WERKEN BINNEN DE GEBRUIKSRUIMTE

In dit hoofdstuk wordt inzichtelijk gemaakt hoe de bodemdaling die optreedt als gevolg van de voorgenomen gaswinning Ternaard in combinatie met de bestaande gaswinningen, past binnen de gebruiksruimte. Dit leiden we in, door eerst de te nemen stappen uit de HadK-systematiek kort te herhalen. Vervolgens wordt de cumulatieve belasting van de gebruiksruimte door verschillende gaswinningen inzichtelijk gemaakt.

De stappen van de HadK-systematiek

1. Het vaststellen van het meegroeivermogen, uitgedrukt als de maximale relatieve zeespiegelstijging snelheid (=zeespiegelstijgingsscenario + gemiddelde bodemdalingssnelheid) in het kombergingsgebied van een zeegatsysteem, die kan worden gecompenseerd door sedimentaanvoer van buitenaf, zonder significante effecten voor het areaal droogvallende platen. Deze stap is uitgevoerd in het MER en de Passende beoordeling (NAM, 2006 & Ministerie van Economische Zaken, 2006) voor de Gaswinning MLV.
2. Het vaststellen van de gebruiksruimte; dit is de ruimte die overblijft van het meegroeivermogen na aftrek van de snelheid van zeespiegelstijging. De vastgestelde gebruiksruimte is een veilige grens voor de gecombineerde gevolgen van zeespiegelstijging en bodemdaling door delfstoffenwinning. Het vaststellen van de gebruiksruimte vindt iedere vijf jaar opnieuw plaats, bij het beschikbaar komen van het actuele zeespiegelstijgingsscenario.
3. Het vooraf vaststellen van de maximale bodemdalingssnelheid die gemiddeld over het kombergingsgebied door alle winningen kan worden bijgehouden per kombergingsgebied, zonder dat veranderingen optreden aan het geomorfologische evenwicht in de Waddenzee. Dit vindt in de voorliggende Passende beoordeling plaats voor de voorgenomen winning Ternaard en de beide andere winningen (Ameland en MLV) die leiden tot bodemdaling in het kombergingsgebied van het Pinkegat.
4. Het uitvoeren van de gaswinning volgens het winningsplan, waarbij de verwachte bodemdalingssnelheid binnen deze grens blijft.
5. Het door middel van meten en monitoren vaststellen van de daadwerkelijk opgetreden bodemdaling en het ontbreken van gevolgen voor de Waddenzee.
6. Het zo nodig bijsturen van de bodemdaling door de productie te beperken (“het dichtdraaien van de kraan”).

Met de stappen 1 tot en met 4 in de HadK-systematiek wordt op voorhand de bodemdaling door gaswinning beperkt, zodat geen gevolgen zullen optreden in de Waddenzee, ook niet bij een versneld stijgende zeespiegel. De stappen 5 en 6 geven een extra waarborg dat er inderdaad geen gevolgen zullen optreden.

In deze voorliggende Passende beoordeling gasboring en gaswinning Ternaard wordt, net als bij de Gaswinning MLV, de beschikbare gebruiksruimte als een harde grens gehanteerd. De bodemdaling door alle gaswinning in de beïnvloede kombergingsgebieden zal de gebruiksruimte van de betreffende kombergingsgebieden niet overschrijden, door de productie van de verschillende gaswinning zodanig te beperken dat de gezamenlijke bodemdaling binnen de beschikbare gebruiksruimte blijft. Dit geldt voorafgaand aan de winning (de stappen 1, 2 en 3 in het bovenstaande overzicht) en tijdens de winning (de stappen 4,5 en 6).

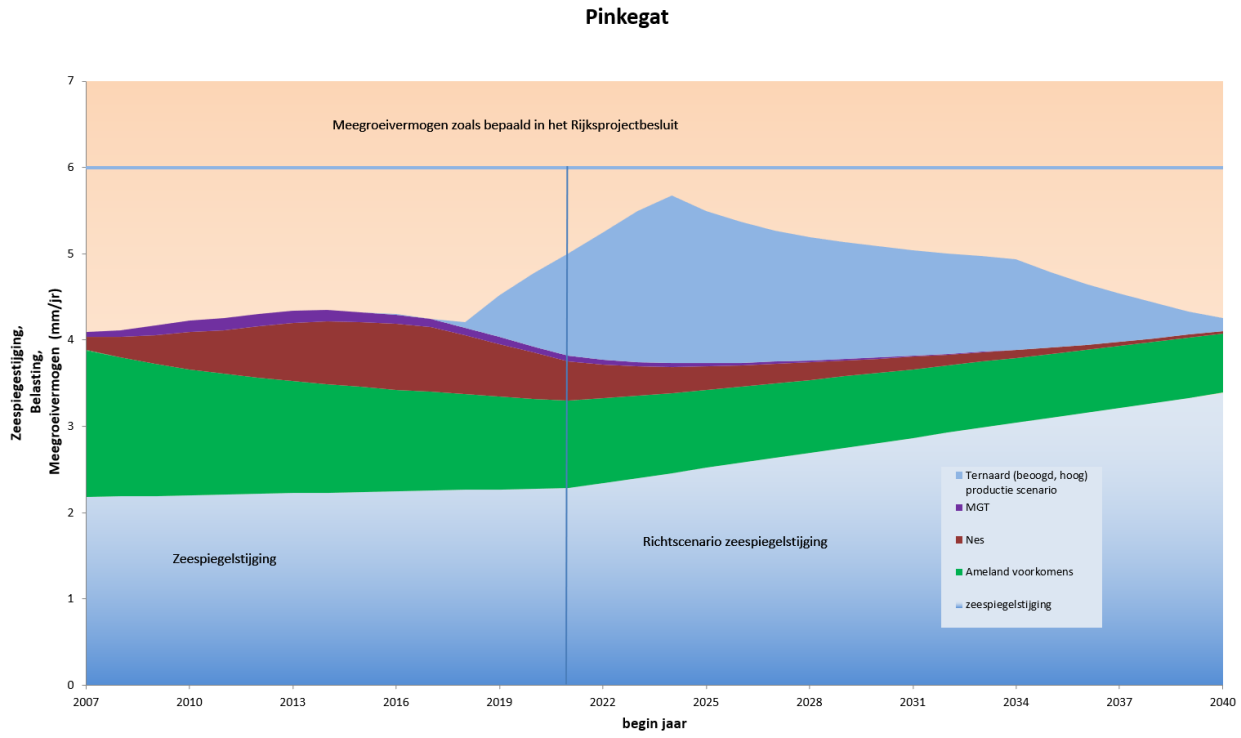
Voorafgaand aan de winning

Alle gaswinning omvat de gaswinningen Ameland, Waddenzee en de voorgenomen gaswinning Ternaard. Figuur 4-1 toont de voorspelde belasting van de gebruiksruimte door de bodemdaling als gevolg van de verschillende winningen voor het kombergingsgebied Pinkegat. In deze grafiek wordt de optelsom gemaakt van de zeespiegelstijging met de bodemdaling door respectievelijk de gaswinning Ameland (AME), Nes en Moddergat (MGT), met daarbij de bodemdaling door de gaswinning Ternaard.

In de grafiek in Figuur 4-1 is de voorgenomen gaswinning Ternaard getoond. Deze voorgenomen gaswinning Ternaard is het scenario dat in deze Passende beoordeling wordt beoordeeld, met een winning van circa 7,57 miljard m^3 gas. Bij deze voorgenomen gaswinning Ternaard wordt de natuurgrens van 6 mm/jaar voor het kombergingsgebied Pinkegat niet overschreden. De omvang van de bodemdaling blijft bij deze voorgenomen gaswinning binnen de beschikbare gebruiksruimte.

Voor de volledigheid wordt in Figuur 4-2 ook de belasting van de gebruiksruimte door de gaswinning Ternaard in het kombergingsgebied van het Borndiep getoond. De belasting van de gebruiksruimte door de voorgenomen winning Ternaard in de grafiek begint nog voordat de boring is uitgevoerd en de bodemdaling

zal plaatsvinden. Dat is het gevolg van de berekeningswijze van de belasting van de gebruiksruimte, waarbij de opgetreden bodemdaling wordt gemiddeld over een periode van zes jaar, die is ingevoerd om rekening te houden met langjarige fluctuaties in de morfologie vanwege de 18,6-jarige cyclus in het getij (zie voor een beschrijving van de berekeningswijze de Passende beoordeling voor de gaswinning MLV, Ministerie van Economische Zaken, 2006). Bij het Borndiep is de belasting van de gebruiksruimte door de beperkte omvang van de bodemdaling veel kleiner dan bij het Pinkegat. Vanwege de zeer kleine omvang (van maximaal 0,03 mm/jaar) is in de grafiek vrijwel niet zichtbaar dat deze iets boven het zeespiegelstijgingsscenario ligt.



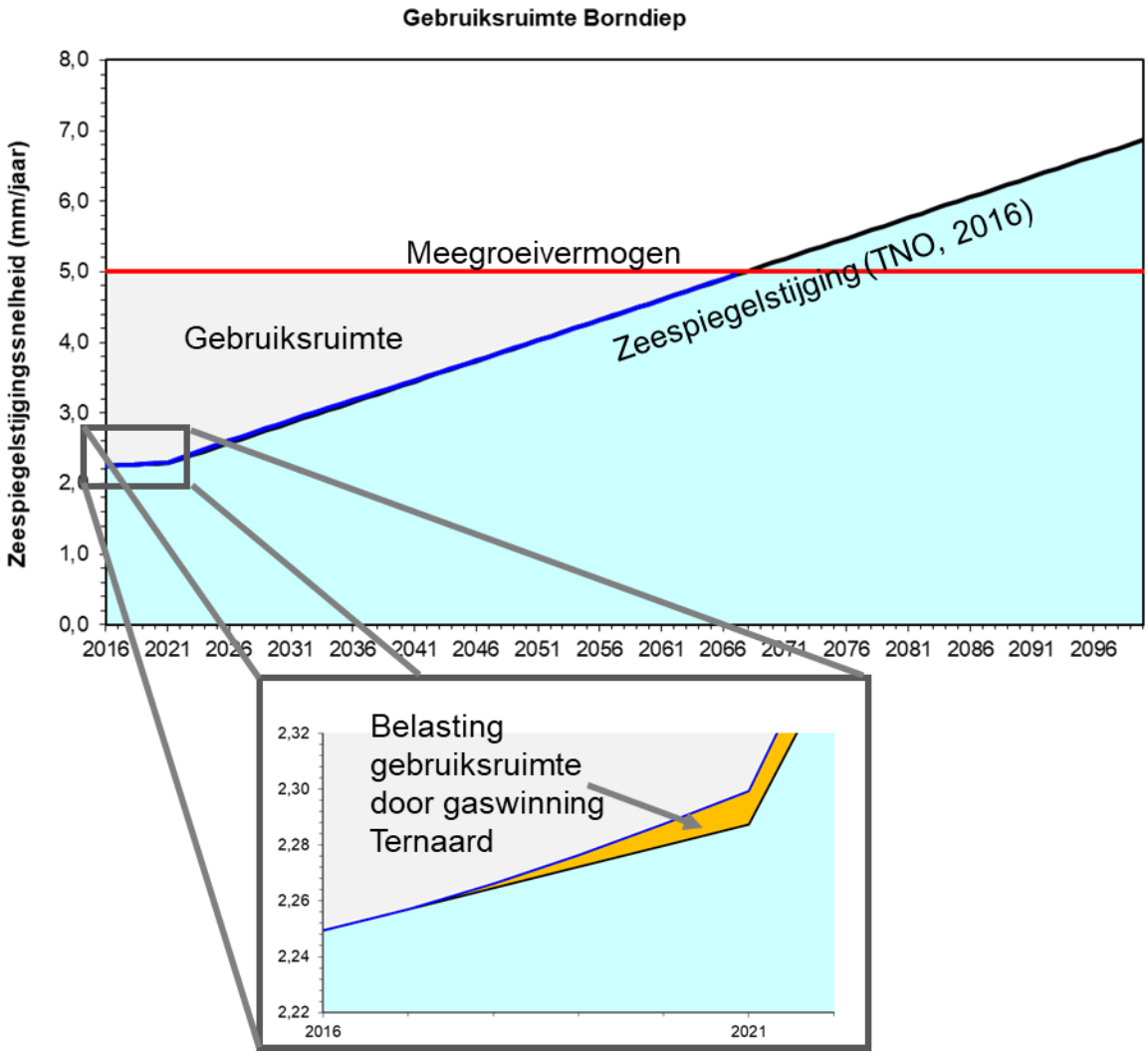
Figuur 4-1 Grafiek met de voorspelde belasting Ternaard bij de voorgenomen gaswinning binnen de gebruiksruimte voor de Ternaard bodemdaling en de bestaande gaswinning Ameland en MLV (Nes, MGT) voor het kombergingsgebied Pinkegat (zeespiegelstijgingsscenario TNO 2016).

Tijdens de winning

De gaswinning zal plaatsvinden volgens het Winningsplan, waarin is vastgelegd dat de bodemdaling van de verschillende gaswinningen binnen de gebruiksruimte blijft. Maandelijks wordt over gemeten bodemdaling gerapporteerd aan SODM. De prognose van de bodemdaling wordt jaarlijks geactualiseerd op basis van de gasproductie en de gemeten bodemdaling. Daartoe wordt het dalingsmodel opnieuw toegepast, om de waargenomen bodemdaling te bepalen op basis van het werkelijk geproduceerde gas en wordt de toekomstige bodemdaling berekend. Zo nodig, bij een dreigende overschrijding van de natuurgrens, wordt bijgestuurd om de omvang van de bodemdaling door de productie te beperken (“het dichtdraaien van de kraan”). Bij actualisatie van het zeespiegelstijgingsscenario (waarvan in 2021 de eerstvolgende is voorzien, en daarna iedere vijf jaar), wordt de beschikbare gebruiksruimte opnieuw vastgesteld en worden zo nodig aanpassingen in de gasproductie gedaan. Op deze wijze wordt, vanwege de Meet- & Regelcyclus, steeds voldaan aan de randvoorwaarde dat de bodemdaling door de gaswinningen Ameland en Waddenzee en de gaswinning Ternaard binnen de gebruiksruimte plaatsvindt.

Voor de voorliggende Passende beoordeling is als randvoorwaarde gehanteerd dat de gaswinning Ternaard binnen de beschikbare gebruiksruimte van de Waddenzee plaatsvindt. Deze randvoorwaarde geldt op voorhand, door de keuze van het gaswinningsscenario (Voorgenomen gaswinning Ternaard in Figuur 4-1) en tijdens de winning door het toepassen van de HadK-systematiek. Omdat de omvang van de bodemdaling door alle gaswinning binnen de beïnvloede kombergingsgebieden, waaronder die door de voorgenomen gaswinning bij Ternaard, binnen de gebruiksruimte blijft, zal het geomorfologische evenwicht en de sedimentbalans van de Waddenzee in stand blijven. Het hanteren van deze randvoorwaarde betekent dat

geen effecten zullen optreden op de kenmerkende morfologische elementen en processen in de Waddenzee. In de hoofdstukken 7 en 8 worden de effecten van de bodemdaling op de Waddenzee beoordeeld.



Figuur 4-2 Grafiek met de voorspelde belasting van de gebruiksruimte voor de Voorgenomen gaswinning Ternaard (de blauwe lijn) voor het kombergingsgebied Borndiep. De rode lijn is de natuurgrens van 5 mm/jaar voor het Borndiep. De bovengrens van het lichtblauw gekleurde vlak geeft het zeespiegelstijgingsscenario TNO 2016. Het grijze vlak is de nog beschikbare gebruiksruimte.

5 BEOORDELINGSKADER

5.1 Wet natuurbescherming

Natura 2000 is het netwerk van natuurgebieden in de Europese Unie, die worden beschermd op grond van de Vogelrichtlijn (1979) en de Habitatrichtlijn (1992). De richtlijnen bepalen welke typen natuur en soorten beschermd moeten worden. De EU-lidstaten hebben daarvoor speciale beschermingszones aangewezen en zijn verplicht instandhoudingsmaatregelen te nemen voor de bescherming van deze gebieden. De Vogelrichtlijn en de Habitatrichtlijn zijn in Nederland geïmplementeerd in de Wet natuurbescherming (2017). Deze wet kent voor de bescherming van de Natura 2000-gebieden onder andere een vergunningenstelsel:

Voor het uitvoeren van een project is, indien aan de orde, een vergunningaanvraag noodzakelijk. Hierbij is een Passende beoordeling nodig waarin de effecten op Natura 2000-gebieden getoetst worden.

De wet laat het niet toe om een plan vast te stellen of zonder vergunning een project uit te voeren dat -gelet op de instandhoudingsdoelstellingen van een Natura 2000-gebied- de kwaliteit van de natuurlijke habitats of habitats van soorten in dat gebied kan verslechteren of een significant verstorend effect kan hebben op de soorten waarvoor dat gebied is aangewezen (art 2.7 lid 2). Wanneer het een project betreft dat niet direct verband houdt met, of nodig is voor het beheer van een gebied, en dat afzonderlijk of in cumulatie significante gevolgen kan hebben voor een Natura 2000-gebied, wordt de vergunning niet verleend nadat uit een Passende beoordeling is gebleken dat de natuurlijke kenmerken van het gebied niet worden aangetast (art 2.7 lid 3 onder a en art 2.8 lid 1). Een uitzondering is een project dat een herhaling of voortzetting is van een ander project, of deel uitmaakt van een ander plan, waarvoor al een Passende beoordeling is gemaakt en een nieuwe Passende beoordeling geen nieuwe gegevens of inzichten op kan leveren (art 2.8 lid 2).

Wanneer de zekerheid dat de natuurlijke kenmerken van het gebied niet worden aangetast niet is verkregen, mag de vergunning alleen worden verleend wanneer er geen alternatieve oplossing is, er een dwingende reden van groot openbaar belang wordt gediend en er compenserende maatregelen worden getroffen (de ADC-toets) (art 2.8 lid 4). Wanneer er sprake is van significante gevolgen voor een prioritair habitat of prioritaire soort en de dwingende reden van groot openbaar belang is een reden van sociale of economische aard, dient in aanvulling op de ADC-toets door de Minister van LNV een advies gevraagd te worden aan de Europese Commissie voordat de vergunning wordt verleend (art 2.8 lid 5). De te nemen compenseren maatregelen moeten onderdeel uitmaken van de vergunning voor het betreffende project (art 2.8 lid 7). Een eventueel in te richten compensatiegebied dient de status van Natura 2000-gebied te krijgen (art 2.8 lid 8).

5.2 Effecten van stikstofdepositie

Bij de aanleg van gaswinningsinstallaties in Ternaard (Fryslân) komt stikstof vrij die kan leiden tot een toename van depositie van stikstof in naburige Natura 2000-gebieden.

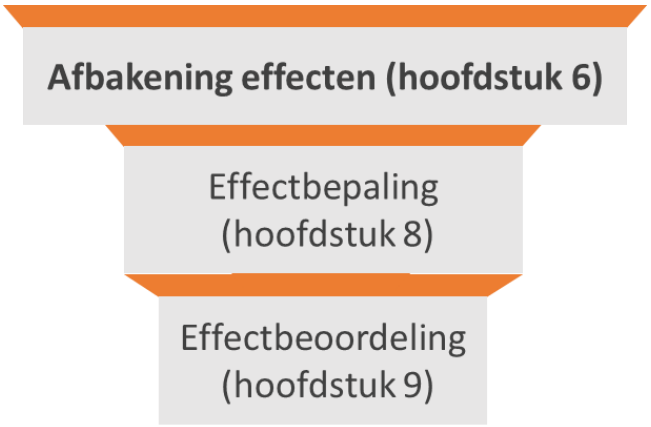
De effecten van deze toename van stikstofdepositie kunnen binnen de vigerende wet- en regelgeving niet langer beoordeeld worden op basis van het Programma Aanpak Stikstof (PAS), dat voorzag in ontwikkelingsruimte voor projecten die een toename van stikstofdepositie in Natura 2000-gebieden. De effecten door stikstofdepositie ten gevolge van het project Ternaard moeten daarom eigenstandig worden beoordeeld.

5.2.1 Zelfstandige beoordeling stikstofdepositie

Nu niet langer een beroep gedaan kan worden op het PAS en de passende beoordeling van het PAS evenmin nog gebruikt kan worden, moet eigenstandige beoordeling van de stikstofdepositie plaatsvinden. In deze beoordeling wordt op ecologische gronden een onderzoek gedaan naar de eventueel optredende effecten van stikstofdepositie. Dit is de individuele projectbeoordeling stikstofdepositie. Deze individuele projectbeoordeling stikstofdepositie is onderdeel van deze passende beoordeling.

6 AFBAKENING EFFECTEN

In het voorgaande hoofdstuk staat het kader dat de Wet natuurbescherming geeft voor de beoordeling van de effecten van de gasboring en gaswinning Ternaard. In de hoofdstukken 6 en 8 wordt toegewerkt naar de beoordeling van de effecten. In het voorliggende hoofdstuk 6 vindt de eerste afbakening plaats van de effecten van de gasboring en gaswinning Ternaard. Hierbij wordt vastgesteld welke mogelijke effecten met zekerheid niet zullen optreden tijdens de gasboring en gaswinning Ternaard. Aan het einde van dit hoofdstuk 6 in paragraaf 6.3 rest een beperkt aantal effecten waar meer in detail naar dient te worden gekeken. Dat gebeurt vervolgens in Hoofdstuk 8, waar de effectbepaling wordt uitgevoerd.



6.1 Natura 2000

6.1.1 Mogelijke effecten

De geplande boring en gaswinning en de hiervoor benodigde werkzaamheden leiden tot een aantal effecten op de omgeving en mogelijk ook op beschermde natuurwaarden. De werkzaamheden of processen die een effect kunnen hebben op natuurwaarden zijn opgenomen in Tabel 6-1, waarbij deze gekoppeld zijn aan zogenaamde storingsfactoren. Deze vertaling naar storingsfactoren is gemaakt omdat verschillende activiteiten tot dezelfde storingsfactor kunnen leiden, gelijktijdig kunnen optreden en elkaar daarbij ook kunnen versterken. Van habitattypen en soorten die in de Natura 2000-gebieden beschermd worden is bekend in welke mate ze gevoelig zijn voor storingsfactoren. Hierbij is gebruik gemaakt van de indeling uit de effectenindicator Natura 2000 (Ministerie van EZK, 2017). Deze is aangevuld met het onderdeel bodemdaling. De mogelijke gevolgen van bodemdaling zijn breed en omvatten meer dan één storingsfactor (oppervlakteverlies van wadplaten, vernatting van kwelders, wijziging sedimentsamenstelling, et cetera). De effecten van bodemdaling worden dan ook apart beschreven in paragraaf 6.2.6 Ook de gevolgen van het extra volume zandsuppleties zijn apart beschreven in paragraaf 6.2.7.

Tabel 6-1 Potentiële effecten per fase

Fase en activiteit	Verstoring door geluid	Verstoring door licht	Visuele verstoring	Oppervlakteverlies	Bodemdaling[1]	Verandering populatiedynamiek (sterfte)	Vermesting en verzuring	Verdroging en vernatting
Aanlegfase								
Bouwrijp maken productielocatie	●	●	●	●			●	

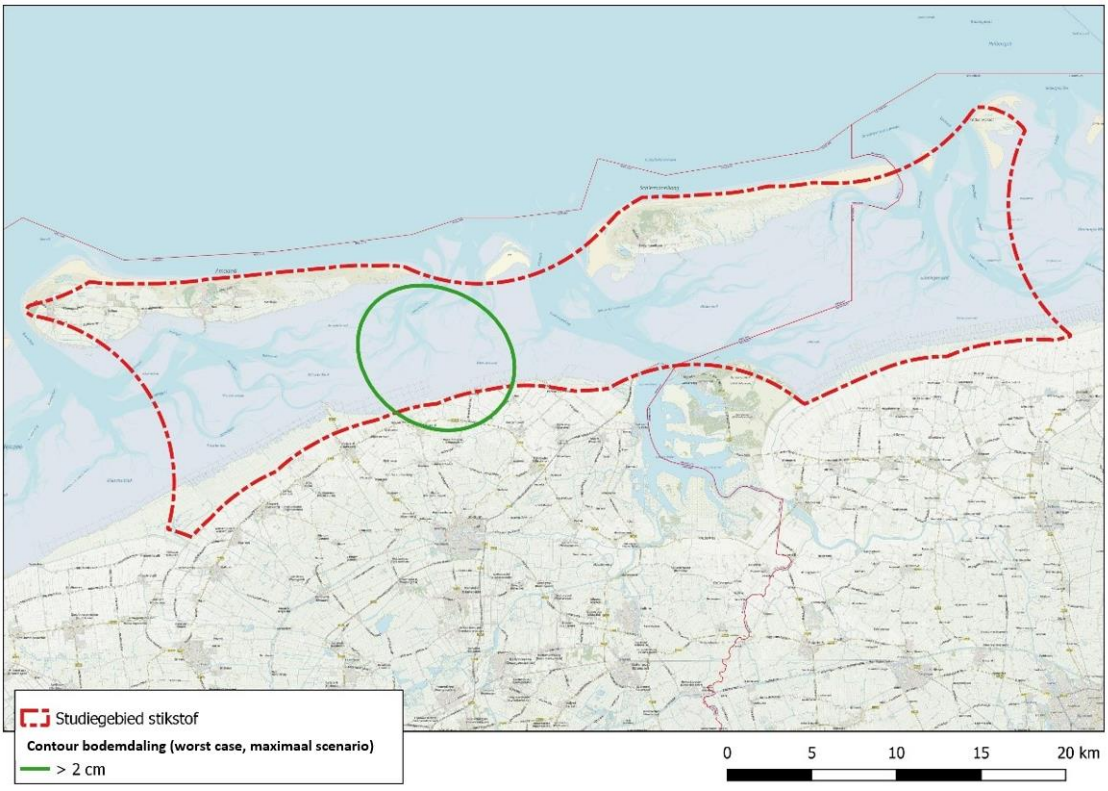
Transport materieel	●	●	●				●	
Opbouw boorinstallatie en aanleg transportleiding	●	●	●	●			●	●
Boren nieuwe put	●	●	●				●	
Affakkelen	●	●	●			●	●	
Winningsfase								
Gaswinning				●[1]	●			●[1]
Zandsuppleties	●	●	●	●		●	●	

[1] Deze mogelijke gevolgen van de gaswinning (bijvoorbeeld oppervlakteverlies van wadplaten, vernatting van kwelders en verandering sedimentsamenstelling) worden beschreven bij de effectketen van bodemdaling in paragraaf 6.2.6.

6.1.2 Studiegebied Natura 2000

Het studiegebied is het gebied waar effecten kunnen optreden als gevolg van de activiteit. De omvang hiervan wordt bepaald door de reikwijdte van de effecten.

Het studiegebied is groter dan het plangebied als gevolg van externe werking. Het studiegebied wordt voor wat betreft de morfologische effecten met name bepaald door de bodemdalingscontour en bestaat uit het noordelijke deel van Friesland, de Waddenzee ter hoogte van Ternaard en Wierum en het oostelijke deel van het Waddeneiland Ameland (Figuur 3-1). Het onderzoeksgebied voor verzuring en vermesting (stikstofdepositie) wordt bepaald door de reikwijdte van de stikstofdepositie. In onderstaande paragrafen wordt de daadwerkelijke reikwijdte van de verwachte effecten bepaald, de onderstaande afbeelding toont het studiegebied, met daarin aangegeven de contour van de berekende bodemdaling en de reikwijdte van de stikstofdepositie in de aanlegfase.



Figuur 6-1 Studiegebied

Wanneer een effect reikt tot in een Natura 2000-gebied en op die plek leidt tot verslechtering en/of verstoring, is een nadere effectbeoordeling noodzakelijk. Indien geen sprake is van overlap tussen het effectbereik en beschermde waarden, is een verdere beoordeling niet aan de orde. Het betreffende effect komt dan ook niet terug in de effectbeoordeling. In het navolgende is dit voor alle mogelijke effecten beschreven.

6.2 Effecten en reikwijdte

6.2.1 Oppervlakteverlies tijdens aanleg

Het onderdeel oppervlakteverlies beperkt zich tot de directe effecten van de ingreep, oppervlakteverlies treedt alleen op gedurende de aanlegfase op het vasteland. De mogelijk afname van het areaal van wadplaten en kwelders als gevolg van bodemdaling worden in paragraaf 6.2.6 beschreven.

Oppervlakteverlies is een belangrijk effect, omdat het kan leiden tot afname van het areaal vegetaties of beschikbaar leefgebied. Dit kan leiden tot een afname van de draagkracht van een gebied (minder foerageerruimte, plekken om te rusten et cetera) en daarmee in potentie tot een verminderde fitheid van individuen (minder voedsel, minder rust, meer stress). En dit kan vervolgens weer doorwerken in een verminderd reproductiesucces, het verlaten van het gebied of een hogere mortaliteit. Uiteindelijk leidt dit tot een verkleining van de populatie. Door verkleining van leefgebied wordt een populatie kwetsbaar voor veranderingen ten gevolge van bijvoorbeeld predatie, extreme seizoensinvloeden of ziekten. Het is belangrijk dat functionele eenheden intact blijven. Voor habitattypen zijn ondergrenzen voor een duurzame oppervlakte bekend (Broekmeyer et al., 2005).

Omdat de productielocatie niet in een Natura 2000-gebied ligt, kan op voorhand gesteld worden dat van negatieve effecten, als gevolg van oppervlakteverlies, op de instandhoudingsdoelen van het Natura 2000-gebied Waddenzee geen sprake kan zijn.

De locatie ligt in intensief gebruikt agrarisch gebied. Dit vormt geen leefgebied van beschermde soorten. Ook wordt het terrein, na aanleg van de transportleiding, weer in oorspronkelijke staat hersteld, waardoor het alleen om een tijdelijk effect gaat. Het leidingtracé kruist wel diverse watergangen waar mogelijk lokaal (tijdelijke) dammen in aangelegd worden voor de transportleiding (indien niet onder de watergangen door geboord wordt). Het oppervlak van deze dammen is dusdanig klein ten opzichte van de totale lengte aan watergangen dat het verwaarloosbaar is. Ook zijn uit deze watergangen geen beschermde soorten bekend (NDFF, uitleesdatum februari 2017). Van aantasting van potentieel leefgebied is dan ook van geen sprake.

Gesteld wordt dat de fysieke ingreep nergens in beschermde natuurgebieden (Natura 2000) of leefgebieden van beschermde soorten plaatsvindt. Van negatieve effecten op de instandhoudingsdoelen van Natura 2000-gebieden of de gunstige staat van instandhouding van soorten is hierdoor geen sprake. Een nadere beoordeling van oppervlakteverlies als gevolg van de aanleg is dan ook niet aan de orde. In paragraaf 6.2.6 wordt de mogelijke afname van het areaal van wadplaten en kwelders als gevolg van bodemdaling beschreven.

6.2.2 Verstoring tijdens aanleg

Toelichting

Geluid, licht en visuele effecten (aanwezigheid en bewegingen van mensen, installaties en voertuigen) kunnen diersoorten verstoren. Deze verstoringen kunnen leiden tot stress en/of vluchtgedrag van individuele dieren, wat er vervolgens toe kan leiden dat dieren het leefgebied voor kortere of langere tijd verlaten, dat de reproductie te ver achterblijft om een goede populatie in stand te houden of dat er een toename van sterfte plaatsvindt. Er kan gewenning aan verstoring optreden, in het bijzonder bij continue verstoring door bijvoorbeeld geluid (Broekmeyer *et al.*, 2005). Vaak treden verstoringen door geluid, licht en visuele effecten gelijktijdig op en is de specifieke oorsprong van stress en/of vluchtgedrag niet altijd goed te duiden.

Verstoring door licht, geluid of bewegingen kan alleen optreden in de aanlegfase door bijvoorbeeld bouwmachines en vrachtverkeer. Gedurende de winningsfase is nauwelijks sprake van emissies van geluid,

licht of anderzijds bewegingen. Bovengronds is gedurende de winning slechts een kleine installatie aanwezig en de enige activiteit is een wekelijkse controle door een werknemer. Daarnaast vindt één á twee keer per jaar onderhoud plaats. Hiervoor wordt een installatie over de put geplaatst, waarna werkzaamheden verricht worden die tot doel hebben om zand dat in de put aanwezig is te verwijderen en hiermee de toestroming van gas te verbeteren. Deze aanwezigheid van een installatie en de verstoring door geluid, licht en beweging door het onderhoud zijn van dusdanig beperkte aard in omvang en duur, dat deze als niet relevant worden beschouwd en niet worden beoordeeld. Hieronder wordt de verstoring tijdens de aanlegfase door geluid, licht en visuele verstoring beschouwd.

Geluid

Effectomschrijving
Belangrijke geluidsbronnen zijn hei- en bouwwerkzaamheden bij de aanleg, gebruik van voertuigen, boortoren en geluid afkomstig van het affakkelen. Voor de aanlegfase zijn de geluidsemissies afgezet tegen geluidseisen in het Bouwbesluit 2012. Om te voldoen aan het Bouwbesluit dient de geluidsemissie te voldoen aan een dagwaarde van 60 dB(A) en een langtijdgemiddeld beoordelingsniveau van 45 dB(A) in de avond- en 40 dB(A) in de nachtperiode. Voor de boorfase wordt vanuit het Barmm een geluidsbelasting onder de 60 dB(A) vereist[9]. Geluidsgolven verspreiden zich via de lucht, wat tot op een bepaalde afstand kan leiden tot (verhoging van de) geluidsbelasting, die tot verstoring van daar aanwezige dieren kan leiden. Activiteiten in en nabij het water kunnen leiden tot verhoging van de geluidsbelasting onder water, wat verstoring of gehoorbeschadiging bij zeedieren kan leiden. Omdat beide productielocaties op ruime afstand (> 750 meter) van de Waddenzee liggen, is alleen geluid dat door de lucht verplaatst relevant.

Bij het beoordelen van de effecten van verstoring door geluid is onderscheid gemaakt tussen verstoring door continue bronnen en verstoring door impulsgeluiden.

Voor verstoring door continue geluidsbronnen in de verschillende projectfasen wordt de (gecumuleerde) 24-uursgemiddelde geluidscontour gebruikt. De geluidscontouren zijn op 1,5 meter en op 0,3 meter hoogte berekend. Voor op het wad levende soorten is vooral de 0,3 meter hoogte relevant, omdat dit op een vergelijkbare hoogte is als de lichaamsgrootte van op het wad aanwezige vogels en zeehonden. Uit de berekeningen blijkt dat buitendijks echter nauwelijks verschil is tussen de geluidbelastingen op 0,3 en 1,5 meter hoogte. Hier is dan ook geen onderscheid in gemaakt. Alle resultaten van geluidsberekeningen zijn in de vorm van contourkaarten opgenomen in Bijlage A.

Afhankelijk van de soort en het gedrag van de soort gelden de volgende drempelwaarden voor verstoring (Reijnen & Foppen, 1991[10]), buiten deze grenzen is verstoring uitgesloten:
- Broedvogels (van open gebied): 47 dB(A) op 30 cm hoogte.
- Foeragerende vogels: 51 dB(A) op 30 cm hoogte.
- Rustende zeehonden: 45 dB(A) op 30 cm hoogte.

Voor verstoring door impulsgeluiden, zoals die worden veroorzaakt door heiwerkzaamheden in de voorbereidingsfase, gelden andere drempelwaarden vergeleken met continue bronnen, omdat de aard van de geluidsbelasting ander is (hoge, maar korte pieken). Hiervoor is de LAmax berekend. Over de gevoeligheid van dieren voor impulsgeluiden is niet veel literatuur beschikbaar. In twee, al wat oudere, studies zijn de effecten van knalgeluiden onderzocht:
- Effecten van schietoefeningen vanaf Fort Erfprins op natuurwaarden in het zeegat van Texel. (Smit et al, 2007).
- Vuurwerk en Natuur, effecten van evenementenvuurwerk op beschermde natuurwaarden in Zeeland (Van Apeldoorn & Smit, 2006).

Beide rapporten geven een inschatting van de effecten van knalgeluid (schietoefeningen resp. vuurwerk) op onder meer vogels. Daarbij wordt een vrij breed overzicht gegeven van de op dit punt beschikbare literatuur.

Als eerste wordt geconstateerd dat er geen onderzoek bekend is waaruit algemene drempelwaarden of andere algemeen geldende vuistregels voor de effecten van knalgeluid kunnen worden afgeleid. De meeste

[9] Het gaat hierbij om gewogen gemiddelden, niet om waarden die voor verstoring van natuurwaarden toegepast worden.
[10] Dit onderzoek geldt specifiek voor autoverkeer op snelwegen, waarin een correlatief verband is aangetroffen (hoe meer geluid, hoe minder vogels). Bij industrie gaat het om bronnen die niet bewegen. Mogelijk leidt dit tot meer gewenning (Broekmeyer et al, 2005).

studies geven afstanden vanaf de bron aan tot waarop effecten (uitgedrukt in opvliegen, over de grond verplaatsen, onrust) merkbaar zijn. Zelden worden daarbij bronniveaus of geluidsniveaus genoemd op de locatie waar het effect wordt waargenomen. Doordat deze gegevens ontbreken kunnen moeilijk drempelwaarden of vuistregels worden opgesteld. Opvallend is dat auteurs van beide rapporten geen bindende uitspraken durven doen over de effecten van de onderzochte schietoefeningen en vuurwerkevenementen bij gebrek aan voldoende gegevens.

Over de specifieke effecten van impulsgeluid als gevolg van heien op (water)vogels is eveneens zeer weinig bekend, wat het trekken van wetenschappelijk onderbouwde conclusies over de effecten van heien bemoeilijkt. Onderzoek in Engeland wees uit dat er weinig reactie van vogels was op geluid van heien met geluidvolumes tot 84 dB(A) (Institute of Estuarine & Coastal Studies, 2009). De situaties waar wel verstoring optrad waren gecorreleerd met visuele verstoring door aanwezigheid van mensen (Institute of Estuarine & Coastal Studies, 2009). Omdat de werkzaamheden achter de dijk van de Waddenzee plaatsvinden, treedt een dergelijke visuele verstoring voor de vogels in de Waddenzee niet op. Verder moet bedacht worden dat de heiwerkzaamheden voor de gaswinning Ternaard slechts van korte duur zijn (tien tot vijftien dagen), waardoor geen sprake is van een permanent effect of een effect dat een heel seizoen duurt. Na afronding is het gebied in de omgeving weer geschikt voor vestiging.

Uit bovengenoemde onderzoeken worden de volgende algemene conclusies getrokken, die van toepassing zijn op het beoordelen van de effecten van heien op de productielocatie:

- Een drempelwaarde van 60 dB(A) lijkt een reële waarde voor de worst-case situatie (uit onderzoek blijkt geen effect bij meer dan 60, wel effect bij 100 dB(A)). Aangenomen wordt dat bij knalgeluiden van meer dan 60 dB(A) een reactie bij foeragerende, rustende en broedende vogels waargenomen zal worden.
- Bij herhaald terugkerende drempeloverschrijdende knallen kan langdurige of min of meer permanente mijding van het verstoorde gebied optreden. Bij welke frequentie dit optreedt, valt niet met zekerheid te zeggen; een expert-judgement is dat bij wekelijks optredende drempeloverschrijdende knallen er langdurige mijding van 1 à 2 dagen door een deel van de foeragerende en rustende vogels op zal treden. Bij meer frequente drempeloverschrijdende knallen wordt min of meer permanente mijding door een deel van de rustende en foeragerende vogels verwacht. Nestverlating van broedende vogels wordt eveneens verwacht.

Effectbereik
Voor het MER ten behoeve van de gaswinning Ternaard is een modelberekening gedaan voor locatiealternatief L1 (bestaande productielocatie tegen de kern aan). Omdat de gekozen productielocatie (L2) op een vergelijkbare afstand tot aan de Waddenzee ligt, gelden dezelfde afstanden qua reikwijdte en verwacht effect eveneens voor onderhavige effectbeoordeling.

Uit deze geluidberekeningen van de verschillende fases blijkt dat de 45 dB(A)$_{24eq}$-contour van de aanleg van zowel de productielocatie als de transportleiding tot maximaal 150 meter reikt vanaf de bron (Bijlage A). De 45 dB(A)$_{24eq}$-contour van de boring (ook onderdeel van aanleg) reikt tot circa 300 meter vanaf de bron.

De LA_{max} 60 dB(A)-contour van de heiwerkzaamheden ligt op circa 700 meter van de bron, tegen de Waddenzeedijk aan, maar reikt niet over de kwelders of het wad (Bijlage A). Tevens liggen ter hoogte van Ternaard binnendijks geen belangrijke hoogwatervluchtplaatsen (Ministerie van I&M, 2016a).

Gesteld kan worden dat drempelwaarden van geluidsverstoring nergens reiken tot in Natura 2000-gebieden. Van negatieve effecten op de instandhoudingsdoelen van het Natura 2000-gebied Waddenzee is dan ook geen sprake. Een verdere effectbepaling en -beoordeling van geluidsverstoring is daarom niet aan de orde.

Licht

Bij de effecten van licht moet onderscheid worden gemaakt tussen gevolgen voor de verlichtingssterkte (de mate waarin een gebied minder donker wordt) en de zichtbaarheid van het licht (lichtsterkte). De afstand waarop een lichtbron gezien wordt is vele malen groter dan de afstand waarop een lichtbron nog bijdraagt aan de mate van verlichting van een gebied. Vooral de verlichtingssterkte is relevant voor natuur, omdat deze kan leiden tot fysiologische en gedragsveranderingen bij dieren. Voor de verlichtingssterkte geldt dat negatieve effecten niet uitgesloten kunnen worden boven de drempelwaarde van 0,1 lux (Molenaar, 2003).

De 0,1 lux-grens van zowel de aanlegwerkzaamheden van de productielocatie als van de transportleiding naar Moddergat ligt op circa 115 meter vanaf de grens van de werklocaties. Dit is inclusief het lichteffect van

affakkelen. Overigens is de verwachting dat werkzaamheden voor de transportleiding alleen overdag plaats vinden, zodat dit geen verstoring door licht zal veroorzaken. De verlichtingsgrens van 0,1 lux reikt niet tot in een Natura 2000-gebied. Ook zijn binnen de contour geen belangrijke hoogwatervluchtplaatsen aanwezig (Wiersma en Van Dijk, 2009; Ministerie van I&M, 2016a). Omdat de aanlegwerkzaamheden achter de zeedijk plaatsvinden, is de zichtbaarheid van de verlichting vanaf de Waddenzee beperkt.

De drempelwaarden voor lichtverstoring (0,1 lux) reikt niet tot in Natura 2000-gebieden. Van negatieve effecten op de instandhoudingsdoelen van Natura 2000-gebieden of de gunstige staat van instandhouding is hierdoor geen sprake. Een nadere effectbepaling en -beoordeling van licht is dan ook niet aan de orde.

Visuele verstoring
Een toename van visuele verstoring kan optreden door de plaatsing van de boorinstallatie of verkeersbewegingen bij de aanleg van de transportleiding. Voor het bepalen van de reikwijdte wordt uitgegaan van een bij eerdere onderzoeken vastgestelde maximale verstoringsafstand bij een soort(groep). Van boorinstallaties zijn geen specifieke gegevens bekend. Van hoogspanningsmasten wordt voor veel vogelsoorten uitgegaan van 150 meter en voor kritische soorten van open gebieden (weidevogels) wordt een afstand van 200-300 meter aangehouden (Ballasus & Sossinka, 1996, Steinborn et al., 2011 en Voslamber & Liefting, 2011). Daarnaast kan verstoring optreden als gevolg van de bewegingen van mensen. In Krijgsveld et al (2008) wordt voor soorten van open gebieden (ganzen en steltlopers) afstanden tot 300 meter genoemd. Als maximale afstand wordt hier 300 meter aangehouden, gezien dat de soorten die in de periferie van het gebied bij Ternaard aanwezig zijn en die aangewezen zijn voor het Natura 2000-gebied Waddenzee vooral soorten van open gebied zijn.

De locatie ligt op circa 750 meter afstand van de Waddenzee. Van visuele verstoring van aangewezen waarden van de Waddenzee kan hierdoor geen sprake zijn. Dit geldt ook voor de transportleiding, het tracé ligt op minimaal 800 meter afstand van de Waddenzee. Ten opzichte van de Waddenzee vinden de werkzaamheden bovendien achter de Zeedijk plaats, waardoor van verstoring door beweging of aanwezigheid van mensen en materieel niet optreedt. Ook zijn binnen de contour geen belangrijke hoogwatervluchtplaatsen aanwezig (Wiersma en Van Dijk, 2009; Ministerie van I&M, 2016a).

Gesteld wordt dat visuele verstoring niet kan optreden omdat de werkzaamheden buiten de verstoringsafstand plaatsvinden en tussen de projectlocatie en de Waddenzee een hoge zeedijk ligt die het zicht ontneemt. Van negatieve effecten op instandhoudingsdoelen van Natura 2000-gebieden is hierdoor geen sprake. Een nadere effectbepaling en -beoordeling van visuele verstoring is dan ook niet aan de orde.

6.2.3 Verandering populatiedynamiek (sterfte) tijdens aanleg

Effectomschrijving
Een verandering van de populatiedynamiek[11] is geen op zichzelf staand effect. De veranderingen in populatiedynamiek hangen samen met invloeden van de voorgenomen activiteit op het sterftecijfer of de mortaliteit van soorten. Wanneer de mortaliteit onder dieren groot is als gevolg van deze invloeden, dan heeft dit mogelijk een effect op de omvang van de populatie. De norm die gebruikt wordt om de significantie van dit effect te beoordelen is de 1%-mortaliteitsnorm.

Wanneer sterfte als gevolg van de plannen hoger is dan 1% van de autonome sterfte binnen de populatie, zijn significante effecten op de populatie niet zonder meer uit te sluiten. Zie voor een meer uitgebreide uitleg van de 1%-mortaliteitsnorm Kader 1.

Bij de gaswinning in Ternaard zou door het affakkelen in de aanlegfase sterfte kunnen optreden onder vogels en dit zou door kunnen werken in veranderingen in de populatiedynamiek van soorten. In de gebruiksfase wordt niet afgefakkeld en treden geen effecten op via veranderingen in de populatiedynamiek.

[11] De storende factor verandering in populatiedynamiek treedt op indien er een direct effect is van een activiteit op de populatie-opbouw en/of populatiegrootte. Er wordt hier vooral gedoeld op de situatie wanneer sprake is van sterfte van individuen.

De locatie en de fakkel liggen buiten het Natura 2000-gebied Waddenzee ligt. Slachtoffers onder vogels kunnen ook soorten betreffen met een instandhoudingdoel in de Waddenzee.

Kader 1 De 1%-mortaliteitsnorm

De 1%-norm voor additionele sterfte (1%-mortaliteitsnorm) is een door de Raad van State geaccepteerde toetsingsnorm voor het beoordelen van sterfte onder vogels door windturbines. Per vogelsoort wordt de gemiddelde jaarlijkse sterfte bepaald voor het betreffende gebied:

1% mortaliteitsnorm = jaarlijkse sterfte in Natura 2000-gebied x draagkracht Natura 2000-gebied x 0,01

De jaarlijkse sterfte is gebaseerd op de soortspecifieke data op www.bto.org met betrekking tot de jaarlijkse overleving. Indien er als gevolg van de activiteit minder dan 1% van de autonome sterfte optreedt, wordt niet gesproken over een significant negatief effect. Wanneer wel een overschrijding plaatsvindt, dan kan een nadere analyse noodzakelijk zijn om de relatie nader te onderzoeken.

Deze “1%-mortaliteitsnorm” wordt algemeen in Nederland toegepast om de significantie van een ingreep die sterfte tot gevolg heeft te bepalen. In de “Leidraad bepaling significantie” van het Steunpunt Natura 2000 (2010) wordt deze norm ook genoemd als een bruikbaar instrument om de significantie van een ingreep te bepalen. De 1%-mortaliteitsnorm is ontwikkeld door het ORNIS-comité (een groep vogel-experts die door de Europese Commissie als gezaghebbend wordt gezien) en is in verschillende gevallen door de Afdeling Bestuursrechtspraak van de Raad van State als zodanig erkend, zie bijvoorbeeld de uitspraak van 1 april 2009 (zaaknummer ECLI:NL:RVS:2009:BH9250), een zaak die specifiek op sterfte veroorzaakt door windturbines betrekking had.

Effectbereik

De duur van het affakkelen hangt sterk af van hoe de clean-up aan het einde van de aanlegfase verloopt. In de beoordeling is uitgegaan van een standaard affakkelperiode bij een test van drie maal 8 uur verdeeld over 36 uur en éénmaal 24 uur continu.

Het exacte moment van ontbranden van de fakkel is vooraf niet goed te voorspellen; de vlam ontstaat vrij plotseling. Hierdoor bestaat een zeer kleine kans dat één of enkele vogels tijdens het affakkelen in de vlam terecht komen en sterven. Wanneer er eenmaal sprake is van een vlam, vormt deze geen risico meer voor vogels. In tegenstelling tot effecten bij een boorplatform op zee, is uitputting van vogels die ’s nachts door het licht van de vlam worden aangetrokken en rond blijven zwermen, bij een productielocatie op land geen knelpunt omdat in de omgeving voldoende land-, rust- en foerageerplekken beschikbaar zijn. Dit betekent dat er slechts enkele malen kortstondig een risico is, namelijk op het moment van ontstaan van de vlam bij het affakkelen.

Wanneer rekening wordt gehouden met het aantal keer affakkelen en de locatie ten opzichte van de Waddenzee, is de kans dat een vogel sterft in de vlam nihil. Het aantal potentiële slachtoffers is dusdanig klein, dat dit als niet meetbaar beschouwd wordt. Het inzetten van bijvoorbeeld een vogelwachter biedt door de zeer korte tijd dat slachtoffers kunnen vallen geen meerwaarde en is niet nodig.

Van de vogelsoorten die in de Waddenzee leven, lopen vooral soorten die ook gebruik maken van het binnendijkse gebied risico op dit incidenteel effect. Dit zijn vooral de soorten die in de Waddenzee broeden of rusten en in het binnenland foerageren. Van de broedvogels zijn dit bruine kiekendief en velduil, van de niet-broedvogels vooral plantenetende soorten als diverse soorten ganzen, kleine zwaan en smient. De broedvogels komen in de omgeving van Ternaard in zeer lage dichtheden voor, het risico op een incident met de fakkel is voor deze soorten nihil. Ganzen, zwanen en eenden (smienten) die in het binnenland foerageren vliegen in groepen. Het risico op een incident bij het ontsteken van de fakkel is voor deze groepen iets groter.

De combinatie van het beperkt aantal malen dat gefakkeld wordt, de lage dichtheid van langs vliegende vogels en het lage aantal van eventuele slachtoffers maakt het risico op overschrijden van de 1%-mortaliteitsnorm voor één van de betrokken soorten verwaarloosbaar klein.

Op voorhand kan gesteld worden dat de 1%-mortaliteitsnorm van geen enkele soort overschreden zal worden door een incidenteel en individueel sterfgeval. Van negatieve effecten op de instandhoudingsdoelen

van het Natura 2000-gebied Waddenzee, of de gunstige staat van instandhouding is dan ook geen sprake. Een bepaling en beoordeling van de effecten van sterfte door affakkelen is daarom niet nodig.

6.2.4 Verzuring en vermesting tijdens aanleg

Verzuring van bodem of water is een gevolg van depositie ten gevolge van de uitstoot (emissie) van vervuilende gassen door bijvoorbeeld industrie en verkeer. De uitstoot bevat onder andere zwaveldioxide (SO_2), stikstofoxide (NO_x), ammoniak (NH_3) en vluchtige organische stoffen (VOS). Deze stoffen komen via lucht of water in de grond terecht en leiden tot het zuurder worden van het biotische milieu. Vermesting is de letterlijke verrijking van ecosystemen met name met stikstof en fosfaat. Het kan gaan om aanvoer door de lucht (droge en natte neerslag van ammoniak en stikstofoxiden) of nitraat- en fosfaataanvoer door het oppervlakte- of grondwater. De effecten van beide zijn niet altijd te scheiden, omdat een deel van de verzurende stoffen ook vermestend werkt (aanvoer van stikstof). Vermesting en verzuring kan zowel effect hebben op habitattypen als op het leefgebied van habitatrichtlijnsoorten.

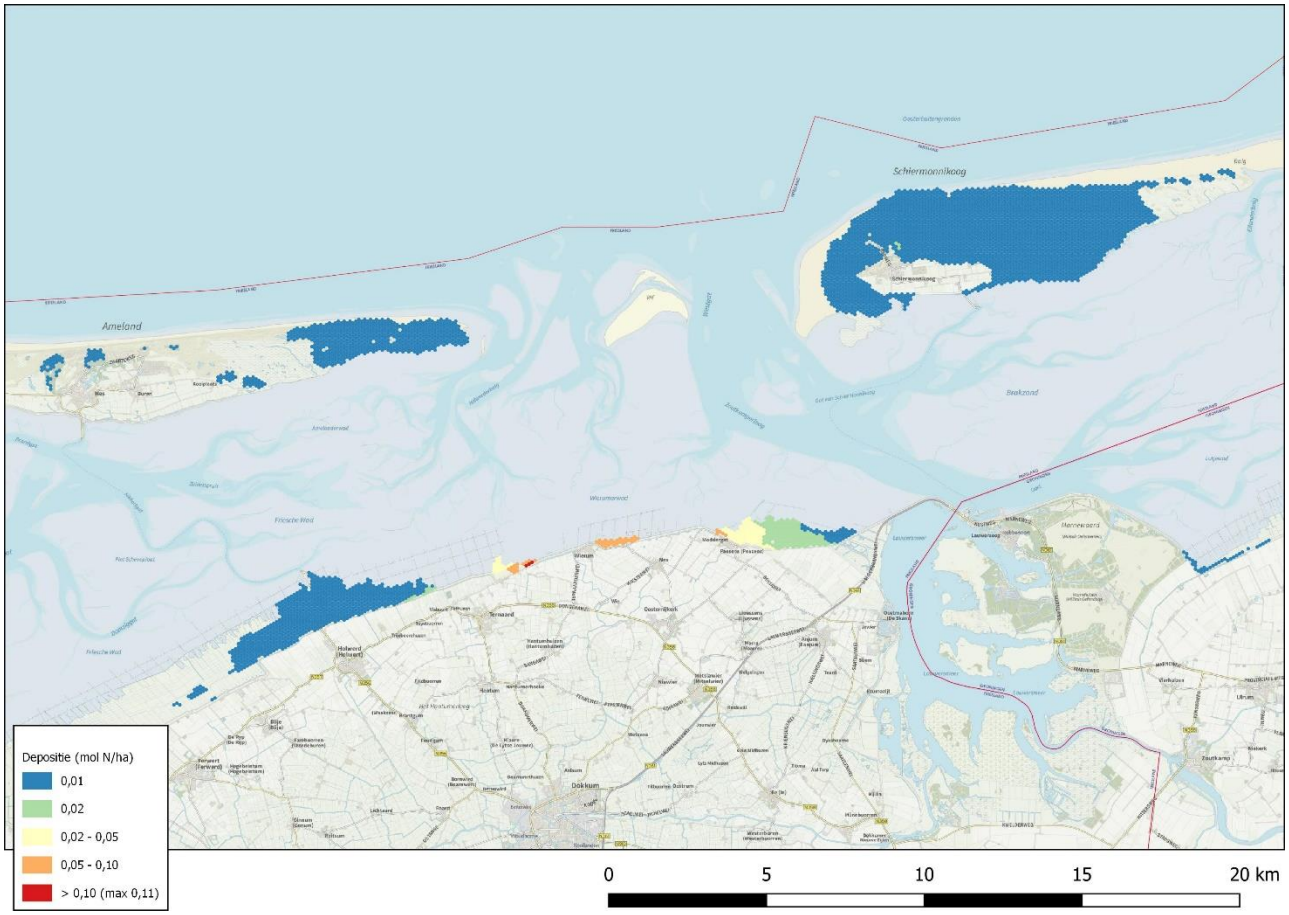
Emissies zijn alleen aan de orde gedurende de aanlegfase, tijdens de winningsfase is geen sprake van relevante emissies en depositie. De aanlegfase kan verdeeld worden over de productielocatie en het transportleidingtracé en bestaat hoofdzakelijk uit bouwverkeer en -machines.

Ten behoeve van het onderdeel verzuring en vermesting als gevolg van stikstofdepositie, is de depositie als gevolg van de aanlegwerkzaamheden onderzocht door de stikstofemissies te berekenen. De berekeningen zijn uitgevoerd met het hiervoor ontwikkelde model AERIUS. De effecten van stikstof worden beoordeeld voor de stikstofgevoelige natuurwaarden (habitattypen en leefgebieden van soorten) binnen Natura 2000-gebieden.

Uit de AERIUS-berekening (zie voor een beschrijving van de uitgangspunten Bijlage B, zie ook Figuur 6-1) blijkt dat het gebied met een toename van stikstofdepositie reikt tot in de Natura 2000-gebieden Waddenzee, Noordzeekustzone, Duinen Ameland en Duinen Schiermonnikoog. Voor deze gebieden wordt dan ook beoordeeld of stikstofdepositie leidt tot negatieve effecten op de instandhoudingsdoelen van dit Natura 2000-gebied. De depositie treedt tijdelijk op en is zeer laag. Onderstaande tabel en afbeelding tonen de depositie op de genoemde gebieden.

Tabel 2 Tijdelijke depositie (maximaal) op overbelaste delen Natura 2000-gebieden (Depositie in mol N/ha) De maximale depositie op het Natura 2000-gebied Waddenzee is hoger op het niet overbelaste deel, en bedraagt daar maximaal 0,11 mol N/ha

Natura 2000-gebied	Depositie op overbelast gebied
Waddenzee	0,07
Duinen Schiermonnikoog	0,02
Duinen Ameland	0,01
Noordzeekustzone	0,01



Figuur 6-2 Depositie op stikstofgevoelige habitats in de omliggende Natura 2000-gebieden.

6.2.5 Verdroging en vernatting tijdens aanleg

Verdroging kan optreden wanneer voor de bouw tijdelijke bronbemaling toegepast wordt. Daarnaast kan de aanwezigheid van objecten onder de grond van invloed zijn op de freatische grondwaterstromingen en grondwaterstanden.

De gevolgen voor de waterbeweging in buitendijks gelegen gebieden (Waddenzee: kwelders en platen) door veranderingen in de (hydro)morfologie als gevolg van bodemdaling, zijn beschreven onder in paragraaf 6.2.6 Bodemdaling. Tijdens de gaswinning kan de bodemdaling binnendijks leiden tot verdroging of vernatting. Onder het vasteland van Friesland, buiten het Natura 2000-gebied Waddenzee, kan een bodemdaling optreden van maximaal enkele centimeters. Deze daling valt binnen de marge van het te hanteren waterpeil in de polders, waardoor geen peilwijziging uitgevoerd zal worden. Per saldo is door de bodemdaling sprake van vernatting. Voor eventueel aanwezige vogels die gebruik maken van de polder als hoogwatervluchtplaats kan de vernatting een positief effect hebben doordat meer plas-drasomstandigheden ontstaan en de voedselbeschikbaarheid verbetert. Doordat het gebruik van de percelen, als gevolg van het plan, echter niet wijzigt en dit hoofdzakelijk agrarisch is, zal van een daadwerkelijke kwaliteitsverbetering niet snel sprake zijn. Omdat verdroging en vernatting tijdens de winning niet leidt negatieve effecten op de instandhoudingsdoelen van het Natura 2000-gebied Waddenzee, of de gunstige staat van instandhouding, wordt deze verstoring tijdens de winning niet nader beoordeeld.

Voor de realisatie van de productielocatie en het aanleggen van de transportleiding is tijdelijke bemaling nodig. Hierdoor daalt de grondwaterstand lokaal licht in de directe omgeving van de locatie. Als gevolg hiervan ontstaat mogelijk tijdelijk een vochttekort bij grondwaterafhankelijke vegetaties. Daarnaast treden er veranderingen op doordat de aard en de beschikbaarheid van voedingsstoffen veranderen. Doordat de doorluchting van de bodem toeneemt, wordt meer organisch materiaal afgebroken. Op deze manier kan verdroging tevens tot vermesting leiden. Bij vernatting is er sprake van hogere grondwaterstanden en/of kwel door menselijk toedoen (dit kan ook door het dalen van de bodem). Door verdroging en vernatting kan een gebied ongeschikt worden voor planten en dieren en zo leiden tot veranderingen in de soortensamenstelling

en uiteindelijk in het aanwezige habitat (Broekmeyer et al., 2005). Binnendijks heeft de tijdelijke bemaling alleen een potentieel effect op lokaal aanwezige flora en fauna. Omdat het voor de productielocatie en het transportleidingtracé hoofdzakelijk intensief agrarisch in gebruik zijnde percelen betreft, komen beschermde soorten die afhankelijk zijn van natte omstandigheden hier niet voor.

Wijzigingen in grondwaterstand beperken zich tot het (grondwater van het) binnendijkse gebied. Dit betreft gebied dat niet als Natura 2000-gebied begrensd is. Gezien de afstand van de locatie en het transportleidingtracé tot aan het Natura 2000-gebied Waddenzee zijn effecten als gevolg van deze tijdelijke daling uit te sluiten. Van negatieve effecten, als gevolg van verdroging of vernatting, op natuurlijke kenmerken van Natura 2000-gebieden is hierdoor geen sprake. Een nadere effectbepaling en -beoordeling van verdroging en vernatting is dan ook niet aan de orde.

6.2.6 Bodemdaling tijdens winning

De gaswinning leidt tot een daling van de diepe ondergrond. In hoofdstuk 3 is beschreven hoe deze bodemdaling van de diepe ondergrond doorwerkt op de ligging van de wadbodem en de kwelders. Van het winningsscenario zijn bodemdalingscontouren berekend (Figuur 3-10 en Figuur 6-1). De verschillende bodemdalingsschotels uit het winningsplan zijn gebruikt voor de ruimtelijke afbakening van de effecten. Hieruit blijkt dat binnen het Natura 2000-gebied Waddenzee een daling op zal treden. Bij de verschillende bodemdalingsschotels uit het winningsplan ligt de noordelijke grens van de verwachte bodemdaling ten zuiden van het eiland Ameland, ook bij de meest noordelijk gelegen bodemdalingsschotel. Het grootste deel van de bodemdaling die in de loop van de tijd optreedt in de diepe ondergrond, ligt onder het kombergingsgebied van het Pinkegat. Een klein deel ligt onder het kombergingsgebied van het Borndiep. Daarmee is de reikwijdte van de bodemdaling in de Waddenzee de kombergingsgebieden Pinkegat en Borndiep. De kombergingsgebieden strekken zich uit vanaf de Friese vastelandsdijk tot aan de Waddenzeedijk op Ameland en omvatten de droogvallende platen en de getijdegeulen.

De beide kombergingsgebieden omvatten ook de kwelders, maar deze maken niet allemaal deel uit van het studiegebied. Van de kwelders binnen de twee kombergingsgebieden maken alleen de kwelders waaronder bodemdaling zou kunnen optreden deel uit van het studiegebied. Het studiegebied omvat het kwelderfragment bij ‘Skoar en het kwelderfragment de Kromme Horne bij Wierum (Figuur 3-6). Het studiegebied omvat niet de kwelders ten oosten van de veerdam Ameland en de eilandkwelder van Ameland. Ook de 2 cm contour van de bodemdalingsschotel van meest noordelijk gelegen bodemdalingsschotel uit het Winningsplan (NAM, 2019) ligt ten zuiden van de kwelderrand van het Neerlands Reid en de Hon op Ameland. Wel is bij die bodemdalingsschotel sprake van overlap met het hoge wad aan de oostzijde van de Hon. Dit gebied is dermate hoog dat hier pioniervegetatie kan vestigen. Dit gebied maakt wel onderdeel uit van het studiegebied.

Het functioneren van het ecosysteem in de Waddenzee wordt in sterke mate bepaald door de abiotische condities, zoals de bodemligging, de waterbeweging en de sedimentsamenstelling. Mogelijke effecten door bodemdaling zijn wijzigingen van de bodemsamenstelling (sediment en dichtheid), veranderingen in oppervlak of ligging van droogvallende platen of wijzigingen van oppervlak of samenstelling van kwelders (verlaging, afkalving). Wijzigingen in oppervlak of samenstelling van droogvallende platen kunnen bijvoorbeeld een effect hebben op de beschikbaarheid of bereikbaarheid van voedsel voor steltlopers. Een afname van het kwelderoppervlak kan leiden tot een afname van (potentieel) beschikbaar broedgebied.

Voor de voorliggende Passende beoordeling is als randvoorwaarde gehanteerd dat de gaswinning Ternaard binnen de beschikbare gebruiksruimte van de Waddenzee plaatsvindt, door het toepassen van de HadK-systematiek (zie hoofdstukken 3 en 4). In Hoofdstuk 8 zal worden beoordeeld wat de effecten zijn van bodemdaling op de hydromorfologie van de Waddenzee, met inachtneming van het hanteren van de randvoorwaarde van gaswinning binnen de beschikbare gebruiksruimte.

6.2.7 Extra volume zandsuppleties tijdens winning

Procedureel

In paragraaf 3.3.8 is beschreven hoe de bodemdalingsschotel van de gaswinning na verloop van tijd geheel opgevuld zal worden met sediment uit de kustzone. Dit betekent een extra sedimentverlies voor de kustzone en hiervoor geldt, in het vigerende kustbeleid, dat dit zal worden aangevuld met zandsuppleties. Het zand voor deze suppleties zal buiten de grenzen van het kustfundament gewonnen worden, dat wil zeggen op

waterdieptes groter dan -20 m op de Noordzee. De inbedding van het extra volume aan zandsuppleties in de voorliggende Passende beoordeling sluit aan bij de wijze waarop dit bij de gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen heeft plaatsgevonden. Rijkswaterstaat is de initiatiefnemer voor alle zandsuppleties aan de Nederlandse kust, omdat deze suppleties worden uitgevoerd vanwege de wettelijke taken in het kader van de Waterwet. Door Rijkswaterstaat wordt, bij zandsuppleties die worden uitgevoerd vanwege de kustlijnzorg in het kader van de Waterwet, een deel van het suppletievolume geoormerkt als extra volume voor de gaswinning Ternaard.

Voor de uitvoering van de zandsuppleties dient aan alle wettelijke vereisten (vergunningen, ontheffingen) te worden voldaan. Vanuit de Wet natuurbescherming dient vastgesteld te worden of de betreffende zandsuppletie kan worden aangemerkt als een activiteit die is vrijgesteld van de vergunningplicht onder specifieke voorwaarden, vanwege het Natura 2000-beheerplan Noordzeekustzone voor de periode 2016-2022 (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2016b; of een opvolger daarvan). Voor het extra volume van de zandsuppleties voor gaswinning geldt geen vrijstelling onder specifieke voorwaarden op basis van het vigerende Natura 2000-beheerplan Noordzeekustzone. Voor dit extra volume zandsuppletie vanwege gaswinning dient de zekerheid te worden verkregen dat dit de kwaliteit van de natuurlijke habitats of habitats van soorten in het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone niet kan verslechteren of een significant verstorend effect kan hebben op de soorten waarvoor dat gebied is aangewezen. Het effect van het benodigde extra volume aan zandsuppletie vanwege de gaswinning Ternaard maakt daarom deel uit van de voorliggende Passende beoordeling.

Het vigerende programma voor de zandsuppleties van Rijkswaterstaat loopt tot en met 2019 en het nieuwe landelijke suppletieprogramma, met een verwachte looptijd van vijf jaar, is nog niet vastgesteld. De bodemdaling door de gaswinning Ternaard en de daarbij behorende zandsuppleties hebben een grotere tijdshorizon, die doorloopt tot tenminste 2050. Op het moment van het opstellen van deze Passende beoordeling is het niet mogelijk om exact vast te stellen wanneer en welk extra volume voor de bodemdaling bij welke zandsuppletie van Rijkswaterstaat zal worden uitgevoerd, omdat de planning van de zandsuppleties door Rijkswaterstaat een tijdshorizon heeft die tot maximaal zes jaar voortuit kijkt. In deze Passende Beoordeling is het daarom niet mogelijk om vast te stellen wanneer (jaar, seizoen), op welke locatie (tussen welke strandpalen op Ameland), wat voor type (strandsuppletie, onderwatersuppletie, buitendeltasuppletie) en met wat voor schip of schepen de suppleties worden uitgevoerd. Het betreft immers een periode van tientallen jaren (zie figuur 6-1). Dit soort informatie over de uitvoering per suppletie is wel nodig voor het vaststellen van de natuureffecten. Rijkswaterstaat stelt elke 3 tot 5 jaar het landelijke meerjarige suppletieprogramma vast, op basis van meetgegevens van de ontwikkeling van de kust. Nadat het volgende landelijke programma is vastgesteld, zal worden gekeken bij welke suppletie(s) het extra zandvolume voor de bodemdaling door de gaswinning Ternaard, wordt toegevoegd. Omdat dan duidelijk is waar en wanneer de uitvoering van de betreffende suppletie(s) is voorzien, kan dan worden vastgesteld wat de effecten zijn van het suppleren van het extra volume zand op de beschermde Natura2000-gebieden. Dit zal worden herhaald na het vaststellen van de opeenvolgende landelijke suppletieprogramma's. Op basis van de frequentie waarmee in het verleden suppleties op Ameland zijn uitgevoerd, wordt verwacht dat iedere drie tot zes jaar sprake zal zijn van een suppletie waar het extra zand aan kan worden toegevoegd. In de voorliggende Passende beoordeling wordt gewerkt met een scenario voor de toekomstige zandsuppleties van Rijkswaterstaat, dat is gebaseerd op de uitvoeringspraktijk van 2001 tot heden. In deze periode heeft de uitvoering van de zandsuppleties plaatsgevonden volgens het vigerende beleid voor de kustlijnzorg.

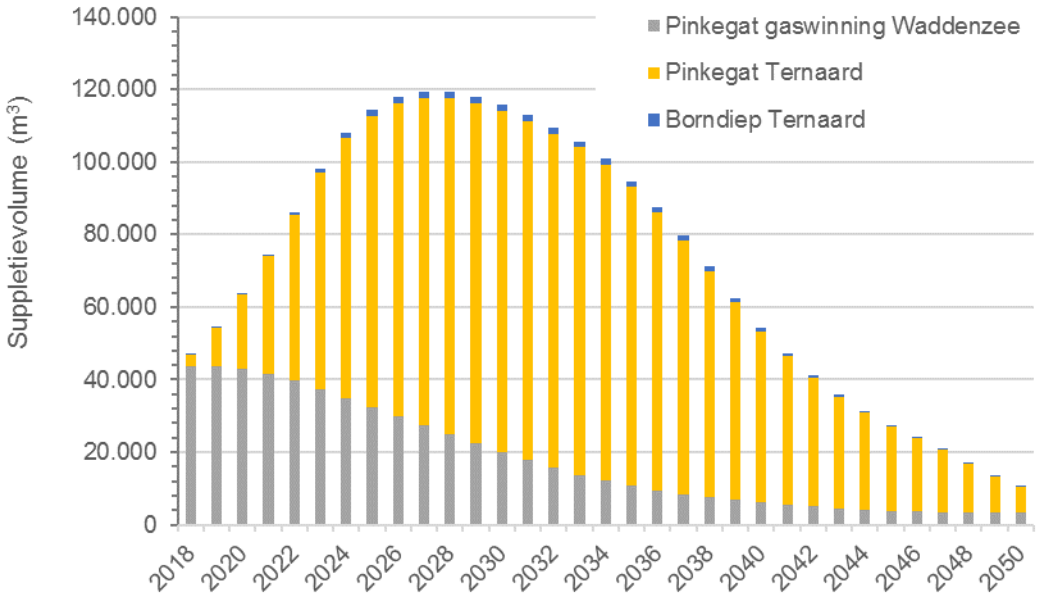
Omvang

De zandsuppleties omvatten het winnen van het zand in de wingebieden op de Noordzee, het transport van zand van de wingebieden naar de suppletielocaties en het aanbrengen van het zand op de vooroever. De ecologische impact van zandsuppleties worden voor een deel bepaald door de bedekking van het bodemleven met zand. De bedekking leidt tot het afsterven van de bodemfauna en dit betekent dat ook alle dieren die prederen op dit bodemleven de effecten kunnen merken. Andere ecologische effecten van zandsuppleties treden op door de vertroebeling van de waterkolom, de eventuele verandering van de korrelgrootte van het substraat en verstoring door de aanwezigheid van de schepen en het andere materieel voor het uitvoeren van de suppletie.

De omvang van het benodigde extra volume aan zandsuppletie wordt bepaald door de omvang van de bodemdaling door gaswinning. De omvang van deze afname is gelijk aan de omvang van de bodemdaling onder de geulen en platen in de kombergingsgebieden in de Waddenzee, minus de bijdrage die slib aan de sedimentatie in de Waddenzee levert. Conform de Integrale bodemdalingsstudie wordt voor de bijdrage van

slib een volumepercentage van 10% aangehouden (Oost et al., 1998). De afname van het zandvolume in de kustzone treedt met enige vertraging op, omdat in eerste instantie zand wordt herverdeeld binnen het kombergingsgebied en wordt geleverd door de twee andere delen van het sedimentdelende systeem, namelijk de geulen en de buitendelta (Oost et al., 1998). Voor de effectbepaling laten we deze vertraging buiten beschouwing en wordt naar het bodemdalingsvolume gekeken, zoals dat optreedt door de voorgenomen gaswinning Ternaard en door de bestaande gaswinning MLV.

Voor het Pinkegat en het Borndiep is de prognose van de bodemdaling gebruikt voor het berekenen van het suppletievolume. Figuur 6-3 toont de berekende suppletievolumes, waarin rekening is gehouden met de bijdrage van slib. De omvang van de zandsuppleties bedraagt ten hoogste 120 x 10^3 m^3/per jaar in het begin van de beschouwde periode. Omdat de bodemdaling afneemt na 2028, neemt het zandsuppletievolume voor de bodemdaling door gaswinning af na die periode. Het totale suppletievolume tot en met 2050 voor de gaswinning Ternaard bedraagt 1,76 x 10^6 m^3.



Figuur 6-3 Het benodigde jaarlijks volume aan zandsuppleties vanwege bodemdaling in de kombergingsgebieden Pinkegat en het Borndiep, volgens het voorgenomen productiescenario Ternaard.

Achteruitgang van het zandvolume in de Noordzeekustzone kan onder stormcondities leiden tot aantasting van de kust van Ameland en daarmee van duinen in het Natura 2000-gebied Duinen Ameland. Sinds de start van de gaswinning Ameland is het duinmassief op Oost-Ameland sterk uitgebreid. Dit toont aan dat het reguliere suppletieprogramma voldoende is om duinerosie tegen te gaan. Deze effectketen wordt daarom niet nader beschouwd.

Effecten

De milieueffecten die samenhangen met het winnen, transporteren en suppleren van zand zijn onder te verdelen in vijf thema's:

1. Waterbeweging en morfologie;
2. Waterkwaliteit;
3. (Natuurlijk) sediment-transport;
4. Geluids- en trillingsniveaus, beweging en lichtintensiteit;
5. Vermesting door stikstofdepositie.

In de onderstaande tabel is per onderdeel van het project (zandwinning, zandtransport en zandsuppletie) aangegeven welke onderdelen van de vijf thema's relevant zijn.

Tabel 6-3 Mogelijke effecten zandwinning, -transport en -suppletie.

Thema	Impact op	Winning	Transport	Suppletie
1) Waterbeweging en morfologie	Stroomsnelheid	X		X
	Verandering zeebodem	X		X
	Habitats en soorten in het sublitoraal	X		X
2) Waterkwaliteit	Waterkwaliteit	X		
3) Natuurlijk sedimenttransport	Sedimentatie van zand	X		X
	Primaire productie	X		
	Voorjaarsbloei fytoplankton	X		
	Voedselopname schelpdieren	X		
	Soorten en habitats Natura 2000-gebied			X
	Doorzicht	X		
4) Geluid, trilling, beweging en licht	Onderwater geluid	X	X	X
	Bovenwater geluid/optische verstoring	X	X	X
	Lichtemissies	X	X	X
5) Vermesting en verzuring door stikstofdepositie	Vermesting en verzuring	X	X	X

De effecten van de drie verschillende fasen van een zandsuppletie (zandwinning, transport en het suppleren) worden in paragraaf 8.3.3 besproken.

6.3 Samenvatting

Op basis van de voorgaande analyse van mogelijke effecten van het voornemen en de reikwijdte daarvan is vastgesteld welke effecten niet op voorhand zijn uit te sluiten. In Hoofdstuk 8 wordt nader ingegaan op de effecten die kunnen optreden op delen van de Natura 2000-gebieden Waddenzee door stikstofdepositie, bodemdaling en in de Noordzeekustzone door de uitvoering van aanvullende zandsuppleties. Eerst wordt in het volgende hoofdstuk 7 in meer detail ingegaan op de natuurwaarden die aanwezig zijn in de verschillen Natura2000 gebieden. Onderstaande tabel geeft een samenvatting van de onderzoeksopgave,

Tabel 6-4 Onderzoeksopgave: effecten die op voorhand niet uitgesloten kunnen worden.

Effect	Natura 2000-gebied Waddenzee	Natura 2000-gebied Noordzeekustzone	Natura 2000-gebied Duinen Ameland	Natura 2000-gebied Duinen Terschelling
Vermesting en verzuring	●	●	●	●
Bodemdaling	●	-	-	
Zandsuppletie	-	●	●	

7 AANWEZIGHEID NATUURWAARDEN

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden aanwezige natuurwaarden beschreven in relatie tot de voorgenomen activiteit. Bodemdaling onder de Waddenzee is één van de effecten die wordt beschouwd. Het beschouwen van de gevolgen van de bodemdaling onder de Waddenzee voor de beschermde natuurwaarden in de Waddenzee vereist enige achtergrondkennis over de specifieke morfologische kenmerken in het invloedsgebied en deze in opgenomen in paragraaf 7.2. In paragraaf 7.3 wordt vervolgens stilgestaan bij de beschermde natuurwaarden in de Natura 2000-gebieden Waddenzee en Noordzeekustzone.

7.2 Morfologische kenmerken van het studiegebied

De Waddenzee is een dynamisch gebied, waar de ligging van geulen, platen en kwelders verandert onder invloed van het getij, golven, stormen en biologische processen. De referentiesituatie en de autonome ontwikkeling worden dan ook gezamenlijk beschouwd, waarbij de trendmatige ontwikkelingen en variaties in de afgelopen jaren worden beschouwd.

De belangrijkste sturende factor bij het beschouwen van de autonome ontwikkelingen is de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt. In Baart et al. (2015) en Vermeersen et al. (2018) is geconstateerd dat de afgelopen jaren nog geen verandering in de snelheid van zeespiegelstijging is waargenomen in de waterstandstations langs de Nederlandse kust. Dat betekent dat de versnelling van de zeespiegelstijging, waarmee sinds de Integrale bodemdalingsstudie Gaswinning (Oost et al., 1998) rekening mee is gehouden, zich nog niet heeft voorgedaan. In recente prognoses van de zeespiegelstijging wordt rekening gehouden met een versnelde stijging van de zeespiegel (KNMI 2015; Vermeersen et al., 2018). Ook in de voorliggende Passende beoordeling wordt bij de autonome ontwikkeling uitgegaan van een versnelling van de snelheid van zeespiegelstijging volgens het actuele scenario dat wordt gehanteerd bij de Gaswinning Waddenzee (TNO, 2016), zie ook paragraaf 3.3.4.

7.2.1 Grootschalige sedimentatie

In de Waddenzee is sprake van een langjarige trend van doorgaande sedimentatie in de kombergingsgebieden van de Waddenzee. De sedimentatie in de kombergingsgebieden in de Waddenzee is gerapporteerd in Elias et al. (2012), Nederhoff & Smits (2017) en Elias (2019). De sedimentatie vindt plaats onder invloed van een serie abiotische en biotische processen die in paragraaf 3.2 zijn beschreven. Op basis van de kennis van de processen, zoals bijvoorbeeld verwoord in Wang et al., (2018) wordt verwacht dat de langjarige trend van doorgaande sedimentatie nog tenminste enkele decennia zal doorzetten. De sedimentatie in de Waddenzee trend wordt mede-gestuurd door de stijging van de zeespiegel. Voor het Borndiep en het Pinkegat-Friesche zeegat (in de studie worden deze kombergingsgebieden samengenomen) is de waargenomen doorgaande sedimentatie groter dan nodig is voor het bijhouden van de zeespiegelstijging tot nu toe (Elias et al., 2012; Nederhoff & Smits, 2017; Elias, 2019).

Bij een versnelde stijging van de zeespiegel zal de langjarige sedimentatie in de kombergingsgebieden toenemen, zodat de morfologische kenmerken van deze kombergingsgebieden niet zullen veranderen (Oost et al., 1998; Wang et al, 2017; 2018). Het meegroeien met de versneld stijgende zeespiegel zal tenminste doorgaan totdat de snelheid waarmee de zeespiegel groter wordt dan het meegroeivermogen van respectievelijk 5 mm/jaar voor het Borndiep en 6 mm/jaar voor het Pinkegat. Waarschijnlijk zal ook na het overschrijden van deze ondergrenzen van het meegroeivermogen de karakteristiek van de kombergingsgebieden niet veranderen, omdat de grens van het meegroeivermogen op een voorzichtige, conservatieve wijze is bepaald en recente berekeningen beduidend hogere grenzen laten zien (Wang et al., 2017; 2018). Overigens gaat bij het overschrijden van het meegroeivermogen de grootschalige sedimentatie in de Waddenzee door, maar dan is deze niet meer voldoende groot om de droogvallende platen in hun geheel te laten meegroeien met de versneld stijgende zeespiegel. Dit leidt tot een geleidelijk proces waarbij

het areaal droogvallende platen afneemt, zodat op een termijn van eeuwen het karakter van de Waddenzee verandert (Van der Spek, 2018).

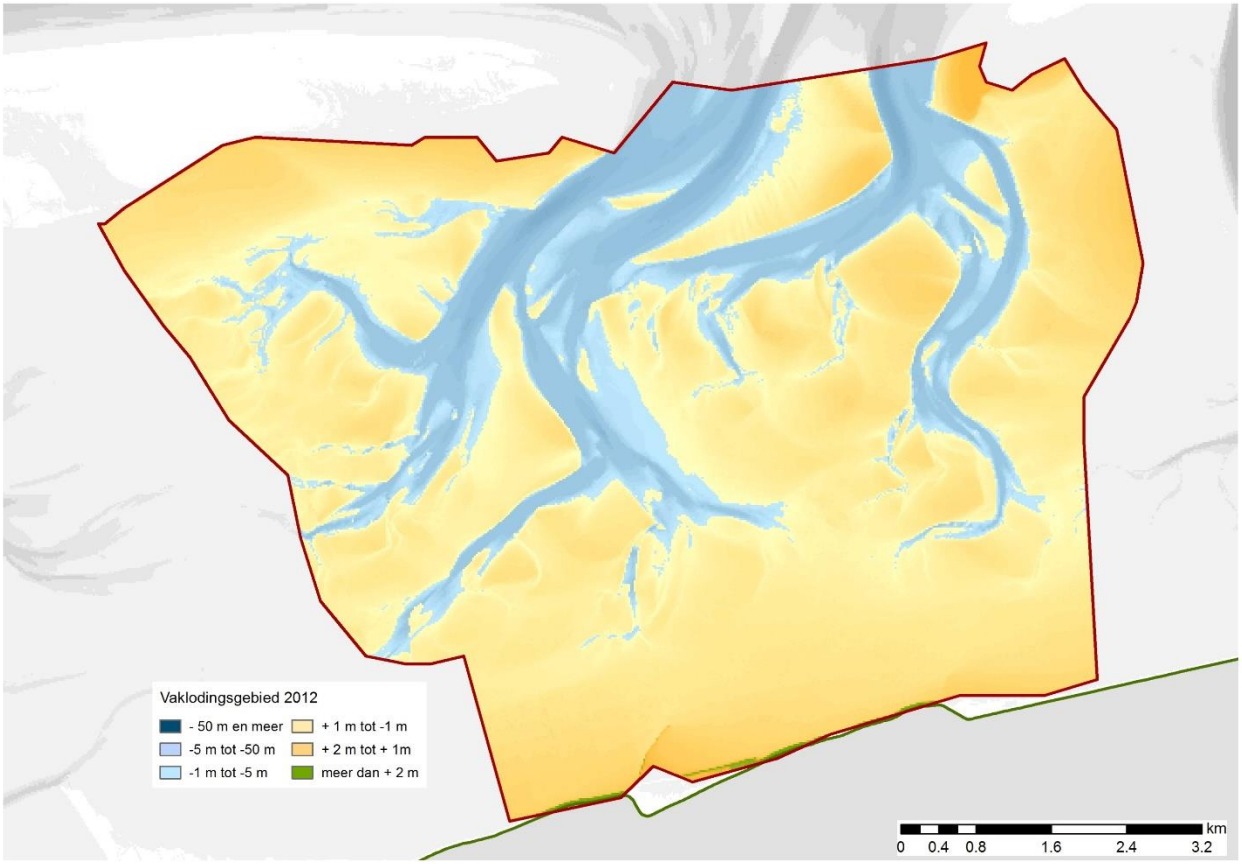
De autonome trend in de kombergingsgebieden is er een van grootschalige sedimentatie. Bij versnelde stijging van de zeespiegel zal de sedimentatiesnelheid verder toenemen.

7.2.2 Plaatareaal, droogvalduur

Het plaatareaal in het studiegebied omvat de droogvallende platen in het Pinkegat en het Borndiep. Het gebied dat is gebruikt voor de analyse is weergegeven in Figuur 7-1. De kwelders vallen buiten de begrenzing van het analysegebied. In Tabel 7-1 zijn de oppervlaktes weergegeven van de geulen bij verschillende laagwaterstanden en de natte oppervlaktes bij de bijbehorende hoogwaterstanden. Het verschil tussen de natte oppervlakte bij hoog- en laagwater is het oppervlakte aan de droogvallende platen en ook deze zijn opgenomen in Tabel 7-1. Bij gemiddelde getij bestaat ongeveer 80% van het kombergingsgebied van het Pinkegat uit droogvallende platen.

Tabel 7-1 Overzicht van de oppervlaktes bij hoogwater- en laagwaterstanden in het Pinkegat (Waterstanden Nes, langjarige gemiddelden 2011, Rijkswaterstaat, 2013)

	Hoogwater-standen (cm)	Natte opper-vlakte bij hoogwater (ha)	Laagwater-standen (cm)	Geulen: Natte oppervlakte bij laagwater (ha)	Droogvallend areaal (ha)
Gemiddeld springtij	119	6.085	-133	1.092	4.993
Gemiddeld tij	106	6.075	-116	1.268	4.807
Gemiddeld doodtij	88	6.062	-94	1.582	4.480
LAT (Lowest Astronomical Tide)			-172	880	

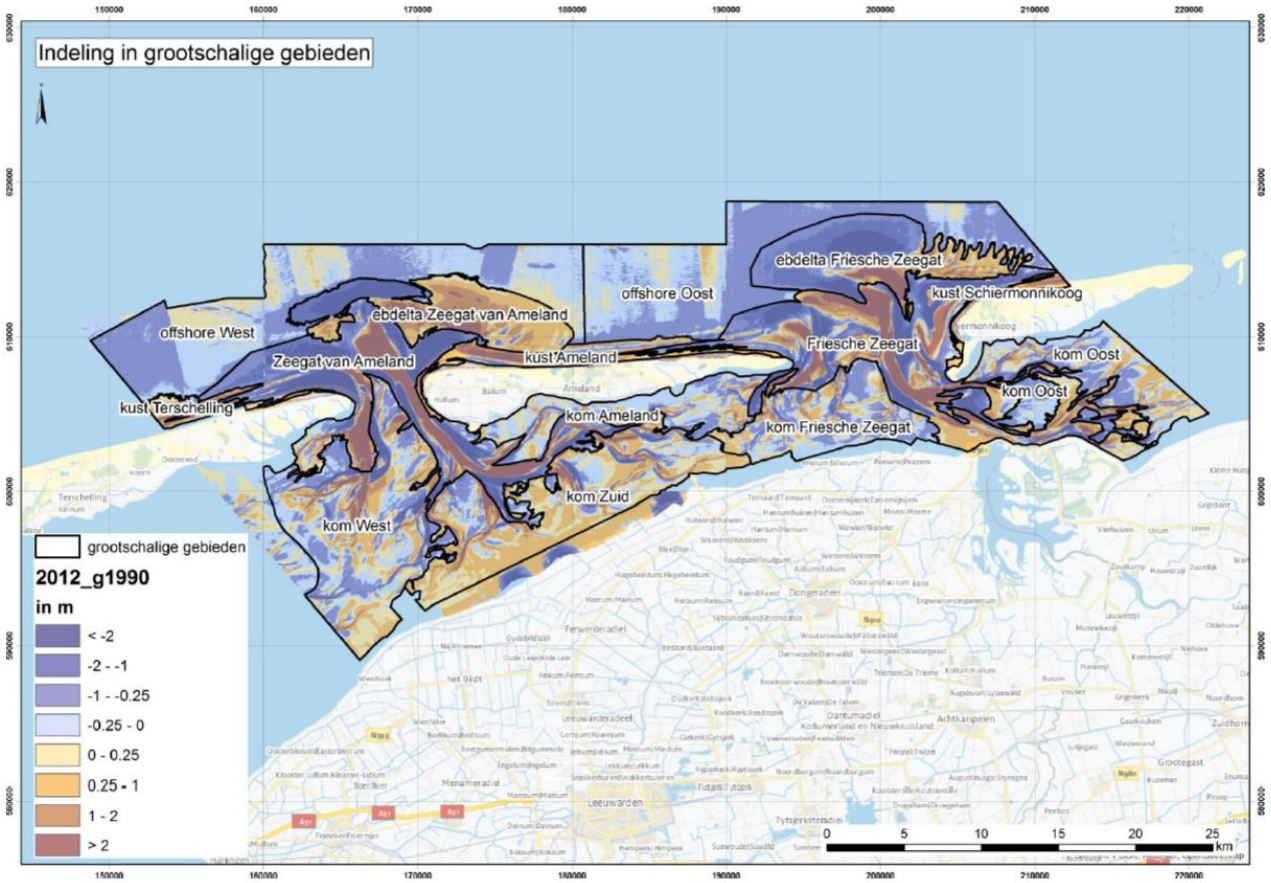


Figuur 7-1 Kaart van het kombergingsgebied Pinkegat, zoals gebruikt voor het bepalen van het oppervlakte aan droogvallende platen in Tabel 7-1.

De hoogte van de platen en de diepte van de geulen van elk kombergingsgebied in de Waddenzee worden iedere zes jaar opgemeten in opdracht van Rijkswaterstaat, als onderdeel van de vaklodingen. Uit de vaklodingen wordt het areaal van de droogvallende platen bepaald, zoals hierboven is gedaan. De opeenvolgende vaklodingen maken het mogelijk om de trends in het sedimentvolume te bepalen. De ontwikkelingen van de sedimentvolumes in de Waddenzee, op de buitendelta's, de Noordzee en de eilandkusten rondom Ameland zijn in 2015 bepaald door Tommer en Marges (2015) op basis van alle destijds beschikbare vaklodingen. De gebiedsindeling die door Tommer en Marges (2015) is gehanteerd maakt het mogelijk om de ontwikkeling van de sedimentvolumes op de platen in de kombergingsgebieden te volgen, dit zijn de gebieden die in Figuur 7-2 zijn aangeduid met 'kom'. In Tabel 7-2 zijn de volumeveranderingen voor deze gebieden weergeven.

Tabel 7-2 Volumeveranderingen in deelgebieden, die zijn getoond in Figuur 7-2 (uit Vermaas en Marges, 2015).

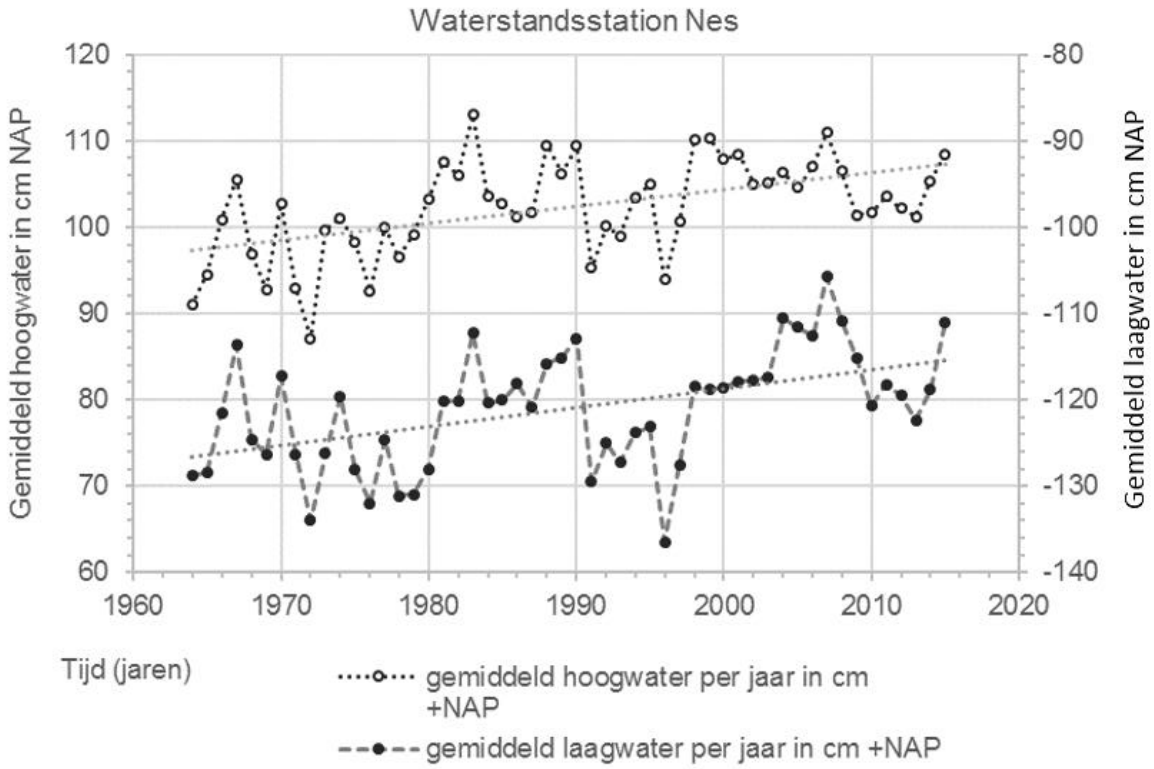
Naam deelgebied	Volumeverandering 1990-2012
kom West	-11,64 x 10^6 m^3
kom Zuid	35,77 x 10^6 m^3
kom Ameland	-4,55 x 10^6 m^3
kom Friesche Zeegat	-1,98 x 10^6 m^3
kom Oost	-26,39 x 10^6 m^3



Figuur 7-2 Gebiedsindeling zoals gehanteerd voor de volumebepalingen door Vermaas en Marges (2015), op de verschilkaart 1990-2012 (uit Vermaas en Marges, 2015)

De platen en geulen in de nabijheid van de veerdam bij Holwerd, dat onderdeel is van het Borndiep, hebben in de afgelopen tiental jaren ontwikkelingen doorgemaakt waardoor de natuurlijke omvang van de geul is afgenomen. Een van deze ontwikkelingen is de sedimentatie van het plaatgebied, waardoor het kombergingsvolume is afgenomen. Verder heeft een kleine verschuiving van het wantij plaatsgevonden en heeft het doorlopend Dantziggat een deel van het debiet van de vaargeul overgenomen. Deze autonome veranderingen zijn medeoorzaak van de toename van het baggerbezwaar in de Vaarweg Holwerd-Ameland in de afgelopen 20 jaar (Herman e.a., 2016). Het betekent dat in de directe nabijheid van het gebied waar de bodemdaling door de gaswinning Ternaard plaats zal vinden, in het kombergingsgebied van het Pinkegat substantiële sedimentatie op de wadplaten heeft plaatsgevonden.

De droogvalpercentages op de platen veranderen bij een andere bodemligging van de platen en bij wijzigingen in het getij. Het getij heeft de afgelopen jaren een trendmatige toename laten zien van de niveaus van hoog- en laagwater conform de stijgende zeespiegel. Figuur 7-3 toont de ontwikkeling in de hoog- en laagwaterstanden voor Nes (Ameland), het dichtstbijzijnde waterstandstation met een continue meetreeks. In de grafiek is zichtbaar dat de variaties in de jaargemiddelde hoog- en laagwaterstanden van jaar op jaar centimeters groot zijn. Deze variaties betekenen dat de droogvalpercentages als gevolg van veranderingen in het getij van jaar op jaar verschillen.



Figuur 7-3 Grafiek met de jaargemiddelde hoog- en laagwaterstanden bij Nes (Ameland, gegevens Rijkswaterstaat)

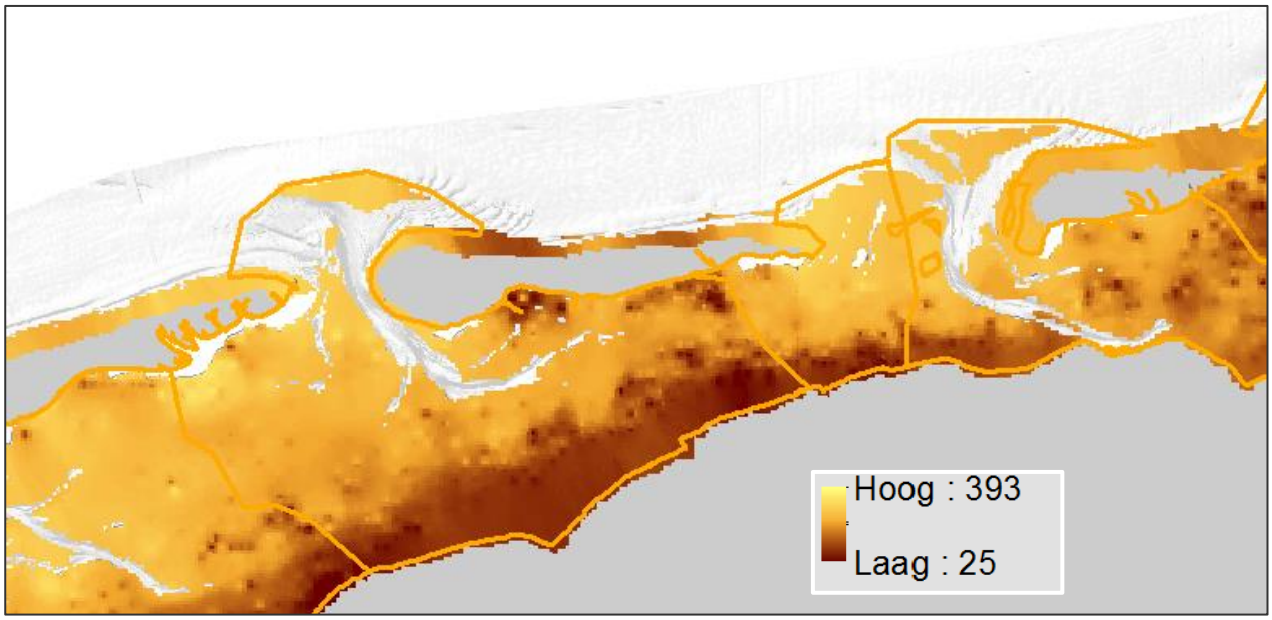
De ontwikkeling van het plaatareaal op de lange termijn is een belangrijk onderdeel van de langjarige ontwikkelingen van de kombergingsgebieden. Wanneer de snelheid van zeespiegelstijging en de bodemdaling het meegroeivermogen niet overschrijden, blijven de kenmerken van de kombergingsgebieden behouden. Voor de platen betekent dit dat de ontwikkelingen in het plaatareaal op dezelfde wijze zullen doorzetten. Daarbij geldt ook de kanttekening dat variatie optreedt in de hoogte en het areaal van de platen onder invloed van de verschillende korte termijn fluctuaties in het getij, wind en golven en de biologische processen en door morfologische veranderingen in de ligging van geulen en platen. De bodemligging in het Pinkegat zal niet structureel veranderen ten opzichte van het referentieniveau van de (stijgende) zeespiegel, zolang de snelheid van zeespiegelstijging onder het meegroeivermogen blijft (Wang et al, 2018). Wel zullen de posities van de geulen en de platen veranderen als gevolg van de autonome dynamiek van de Waddenzee.

7.2.3 Wadvogels en droogvallende platen

De wadplaten die in de Waddenzee droogvallen bij laagwater vormen een beschermd habitattype, net als de geulen en de kwelders, zie hiervoor paragraaf 7.3.1. De wadplaten zijn onder andere van groot belang voor de natuurfunctie van de Waddenzee vanwege hun rol als foerageergebied voor veel beschermde vogelsoorten (het overzicht staat in paragraaf 7.3.1). Tijdens laagwater, als de wadplaten droogvallen, vormen de aanwezige bodemdieren een essentiële voedselbron voor deze vogels. De draagkracht voor de vogels wordt bepaald door het aanwezige voedsel en de bereikbaarheid van dat voedsel (zie voor een recente analyse hiervan in het licht van de gaswinning Waddenzee: Ens et al., 2018). De hoogteligging van de wadplaten is via de droogvalduur (Blomert, 2002) medebepalend voor de bereikbaarheid van het voedsel (Rappoldt & Ens, 2013). In het licht van de effectenbepaling in deze Passende beoordeling is het alleen zinvol om eventuele veranderingen in het areaal en de hoogteligging van de wadplaten te beschouwen als deze meetbaar en merkbaar veranderen als gevolg van de gaswinning Ternaard. In hoofdstuk 8 zal hier nader op worden ingegaan.

7.2.4 Sedimentsamenstelling

De sedimentsamenstelling van de droogvallende platen in het studiegebied is vastgesteld als onderdeel van de SIBES-bemonstering. Op basis van de SIBES-bemonstering 2008-2012 is een kaart gemaakt van de mediane korrelgrootte in de bodem van de wadplaten, waarvan het deel rond de kombergingsgebieden van het Borndiep en het Pinkegat is getoond in Figuur 7-4. In deze kaart komen de donkere kleuren overeen met een kleine mediane korrelgrootte, dit zijn de slibrijke delen van de Waddenzee. De lichte kleuren komen overeen met de gebieden met zand en schelpfragmenten. Slibrijk sediment wordt vooral aangetroffen op de wadplaten voor de vastelandskwelder en op de wadplaten die in de luwte van Ameland liggen.



Figuur 7-4 Uitsnede uit de kaart van de mediane korrelgrootte (diameter in µm) op basis van de SIBES-bemonstering (uit Christianen et al, 2015).

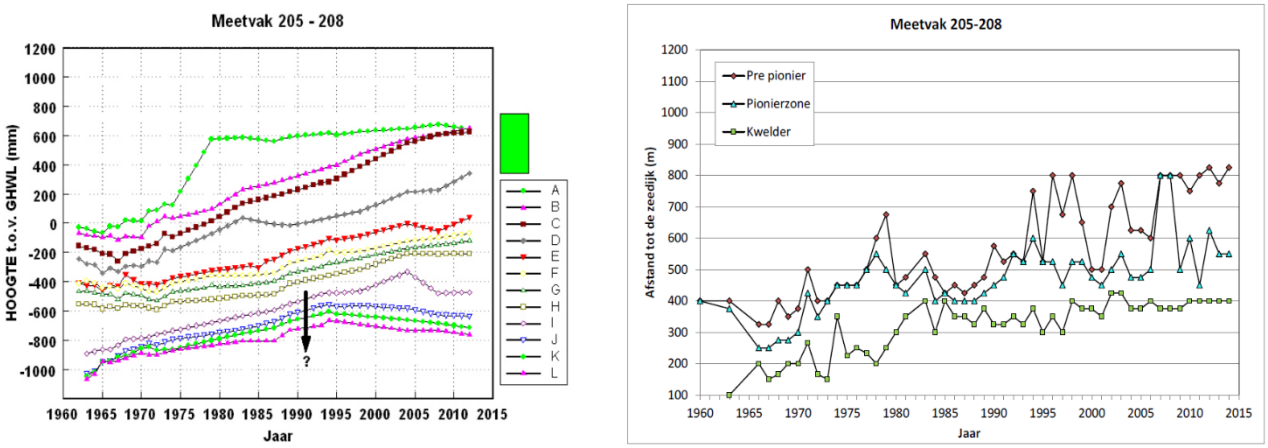
De verschillende biotische en abiotische processen die leiden tot de verdeling van zand en slib in de Waddenzee blijven bij de autonome ontwikkeling hetzelfde. Omdat deze processen en de condities in de kombergingsgebieden vergelijkbaar blijven, verandert de sedimentsamenstelling in de Waddenzee niet. De bodemdaling door de gaswinning Ternaard verandert de processen en condities ook niet, omdat deze niet leidt tot veranderingen van de kenmerken van het kombergingsgebied. Bij een snelheid van zeespiegelstijging die toeneemt tot boven het meegroeivermogen kan langzamerhand de sedimentatie in de Waddenzee achterblijven bij de zeespiegel. Daarmee veranderen gaandeweg de lokale omstandigheden, zoals de waterdiepte op de platen en dat kan betekenen dat ook de lokale sedimentsamenstelling verandert. Dergelijke veranderingen in de sedimentsamenstelling treden alleen op bij snelheden van zeespiegel die zo hoog zijn dat de gaswinning niet meer plaatsvindt, omdat er geen gebruiksruimte meer beschikbaar is.

7.2.5 Kwelders

De kwelders in het studiegebied omvatten de kwelderfragmenten bij ‘t Skoar en de Kromme Horne bij Wierum, aan de vastelandskust en de pioniervegetatie op het hoge wad ten zuiden van het Hon aan de oostpunt van Ameland. De kwelderwerken en kwelders ten oosten van de veerdam Ameland, de Paezummerlannen en de eilandkwelders ’t Hon en Neerlands Reid van Ameland liggen buiten het studiegebied. Over de hoogteontwikkeling van de kwelder Ameland onder invloed van de bodemdaling door de gaswinning Ameland is al een toelichting opgenomen in paragraaf 3.3.10. De bodemdaling door de gaswinning Ternaard heeft geen invloed op de kwelder Ameland.

De hoogteontwikkeling van de vastelandskwelders met kwelderwerken wordt sinds jaar en dag gemeten en hierover wordt frequent gerapporteerd. Duin et al. (2016) is de meest recente rapportage, waarin over deze ontwikkelingen wordt gerapporteerd en hierin is de ontwikkeling opgenomen van de kwelder ten oosten van

de Veerdam (Figuur 7-5). De hoogte van de A-D vakken in de kwelderzone (met begroeiing) is toegenomen vanaf halverwege de jaren ’60. De breedte van de begroeide kwelder is tot rond 2000 toegenomen, met grote fluctuaties. Sindsdien is de breedte min of meer stabiel. Ook in de pionierzone voor de kwelder is de hoogte toegenomen. De breedte van de pionierzone is ten opzichte van eerste metingen toegenomen, waarbij grote fluctuaties zijn opgetreden. De hoogte van de pionierzone is afgenomen sinds het onderhoud aan de buitenste dwarsdam is gestaakt. De breedte van de pre-pionierzone is wel toegenomen, met ook grote fluctuaties.



Figuur 7-5 Ontwikkeling van de vastelandskwelder ten oosten van de veerdam bij Holwerd uit Duin et al (2016). Het groene blokje geeft het hoogteniveau van de kwelderzone weer, de pijl met het vraagteken toont het moment en de locatie van het verlaten van de buitenste dwarsdam. Voor de positie van de meetvakken A tot en met L zie Duin et al (2016)

Sinds 2006 wordt de ontwikkeling van de vastelandskwelder “de Paezumerlannen” gemonitord. Bij deze kwelder vindt bodemdaling plaats door de winning uit het gasveld “Moddergat”. De kwelder Paezummerlannen ligt ten oosten van het studiegebied voor de gaswinning Ternaard en er zal geen extra bodemdaling plaatsvinden door de gaswinning bij Ternaard. De bodemdalingssnelheid van de Pleistocene ondergrond bij de meetlocatie Moddergat bedraagt gemiddeld 3,3 mm per jaar (van Duin et al., 2016b). Uit de monitoringresultaten blijkt dat de opslibbingsnelheid hoog genoeg is om de bodemdaling en zeespiegelstijging bij te houden. Deze kwelder heeft zich de afgelopen jaren in zeewaartse richting uitgebreid. Er zijn dus, zoals voorspeld, geen effecten van bodemdaling door gaswinning in deze vastelandskwelder.

De ontwikkeling van het kleine kweldergebied, of juister de zomerpolder bij ’t Skoar is niet vastgelegd met metingen van de kwelderhoogte en dat geldt ook voor de kwelder de Kromme Horne bij Wierum. Over de kwelder bij Wierum is in Van Duin et al. (2016b) opgemerkt: “Het volledig stoppen met onderhoud aan de dammen kan ervoor zorgen dat de over het algemeen op dit moment juist gewenste jonge stadia verdwijnen en de gerijpte kwelder door kliferosie vervolgens langzaam verdwijnt. De kwelder de Kromme Horne bij Wierum is hier een duidelijk voorbeeld van: de pionierzone is vrijwel geheel verdwenen en er vindt kliferosie plaats”.

Vanwege de verschillende morfologische veranderingen van de vastelandskwelders en de variatie in de randvoorwaarden, met inbegrip van het gebruik en beheer, is het voor de kwelders lastiger dan bij de droogvallende platen om een voorspelling te presenteren van de autonome ontwikkelingen. Om toch een uitspraak te kunnen doen over de autonome ontwikkelingen wordt een aantal aannames gedaan, op basis van expert-judgement en inzichten uit studies en literatuur. De aannames zijn:

- Geen wijzigingen in de overstromingsfrequentie door veranderingen in het niveau van hoogwater.
- Geen veranderingen in de hoogteligging van de voorliggende wadplaten.
- Hogere sedimentatiesnelheden bij toename overspoelingsfrequentie door zeespiegelstijging en bodemdaling.

Voor verschillende kwelders in het studiegebied betekent dit:

't Skoar: Het kwelderareaal is feitelijk een zomerpolder die achter een zomerdijk ligt. Pas als de overstromingsfrequentie van de zomerdijk duidelijk gaat toenemen, zal er sprake zijn van effecten op de zomerpolder. In eerste instantie zal de sedimentatiesnelheid in de zomerpolder toenemen. Bij een versnelde stijging van de zeespiegel wordt daarna een moment bereikt waarop de sedimentatiesnelheid niet meer opweegt tegen de relatieve zeespiegelstijging. Uiteindelijk zal dat leiden tot een afname van de relatieve hoogte van de zomerpolder.

Kwelder bij Wierum. De kliferosie bij de kwelder de Kromme Horne bij Wierum zal verder gaan, zodat het areaal van de kwelder afneemt. Bij een versnelde stijging van de relatieve zeespiegel zal daarbij gaandeweg 'verdrinking' plaatsvinden van de kwelder.

Pionierbegroeing Ameland oost: In het gebied ten zuiden van het eiland Ameland aan de oostpunt van de Hon, waar in de meest noordelijk gelegen bodemdalingsschotel uit winningsplan (NAM, 2019) de contour van 2 cm bodemdaling loopt, is op de hoge wadplaat op verschillende plekken ook pioniervegetatie aanwezig. De hoge wadplaat is onderdeel van het habitattype H1140, terwijl de delen met pioniervegetatie classificeren als zilte pionierbegroeiingen (habitattype H1310). Pioniervegetatie kan zich alleen vestigen als de wadplaten voldoende hoog zijn geworden. De aanwezigheid van het habitattype H1310 is daarmee een indicatie van hoogtetoename van het wad. De toename van de hoogte van de wadplaat in dit gebied met tenminste één decimeter binnen tien jaar is een recente ontwikkeling, die zichtbaar is in de opeenvolgende hoogtemetingen. Deze hoogtetoename heeft plaatsgevonden terwijl daar ondertussen ook bodemdaling heeft plaatsgevonden als gevolg van de gaswinning Ameland. Vastgesteld kan worden dat de sedimentatie ter plaatse voldoende groot is om de lokale bodemdaling te niet te doen en een bodemhoogte toename van tenminste 1 decimeter te realiseren.

Bij een versnelde zeespiegelstijging zal de sedimentatie op de kwelder na verloop van tijd onvoldoende zijn om de stijging bij te houden. De afname van de hoogte van de kwelder zal bij verdere stijging van de zeespiegel doorgaan en uiteindelijk leiden tot een afname van het kwelderareaal. Daar waar erosie van de kwelderrand plaatsvindt, zal deze naar verwachting ook in de toekomst verder doorgaan. De snelheid van zeespiegelstijging die door kwelders kan worden gevolgd, verschilt per kwelder. De sedimentatiesnelheden van de vastelandskwelders zijn over het algemeen hoger dan die op de eilandkwelders. De vastelandslandskwelders kunnen daardoor in stand blijven bij een hogere snelheid van zeespiegelstijging dan de eilandkwelders. De snelheid waarmee sedimentatie plaatsvindt op de kwelders ligt boven de grens van het meegroeivermogen van 6 mm/jaar. Dat betekent dat op het moment dat de invloed van zeespiegelstijging doorslaggevend zal worden voor de ontwikkeling van de kwelders, de gaswinning conform de HadK-systematiek, al zal zijn beëindigd.

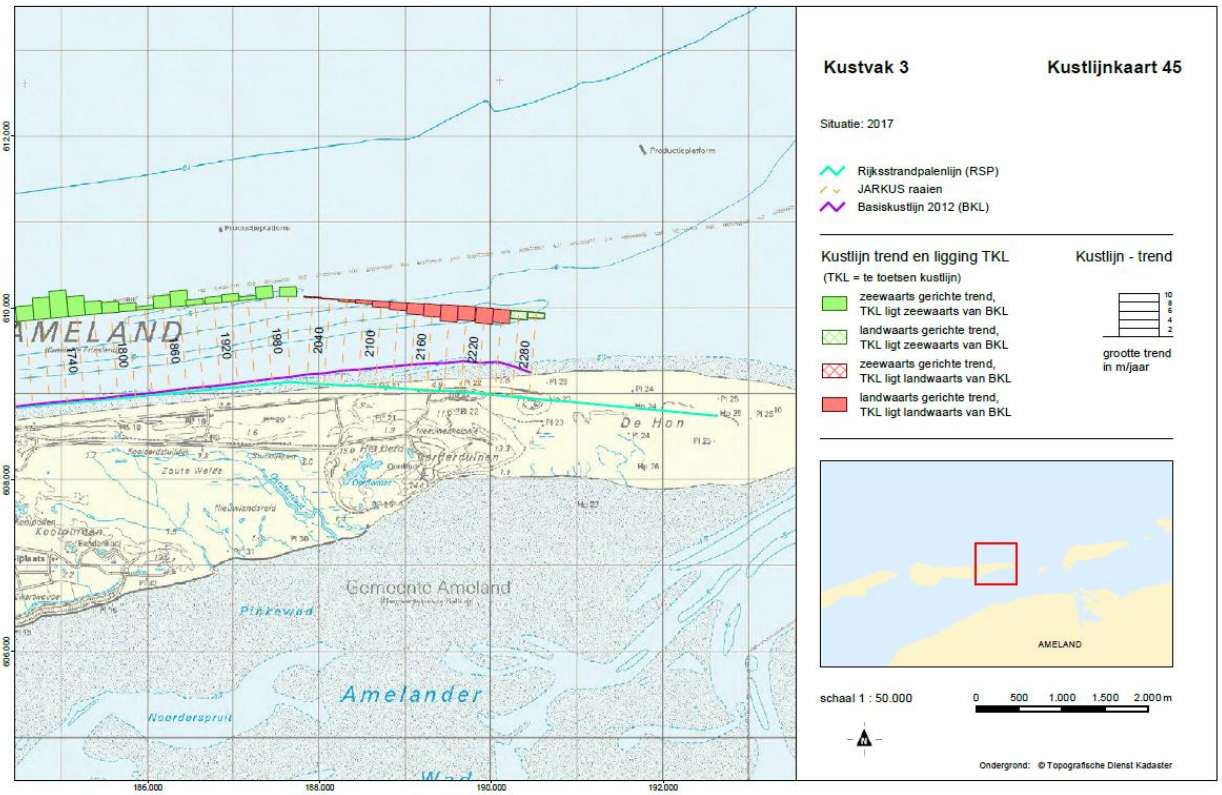
7.2.6 Kustdynamiek en zandsuppleties

Het strand en de vooroever van de Noordzeekustzone zijn zeer dynamische gebieden. De dynamiek bestaat deels uit tijdelijke fluctuaties, zoals het verhogen en verlagen van het strand onder invloed van seizoensdynamiek, uit semi-cyclische processen, zoals het ontstaan en de migratie van brekerbanken en uit structurele uitbouw, dan wel achteruitgang. Dat laatste, de structurele achteruitgang van de kustlijn en de bijbehorende structurele afname van het zandvolume van de kust, is reden voor de kustbeheerder voor het uitvoeren van zandsuppleties. Zandsuppleties worden uitgevoerd om de zandvoorraad van de kust op peil te houden, zoals is vastgelegd in het Nationale Waterplan. In de nabijheid van de kombergingsgebieden Pinkegat en Borndiep zijn op de kust van Ameland de afgelopen jaren frequent zandsuppleties uitgevoerd, zowel op het strand, als op de onderwateroever. De meest recente zandsuppleties op het midden-oostelijke deel van Ameland zijn uitgevoerd in 2015 in de vorm van een vooroever- en strandsuppletie tussen de raaien 1240 en 1700. Voor de periode tot 2020 is een vooroeversuppletie voorzien voor Ameland midden tussen de raaien 13 en 23 met een omvang van 4.000.000 m^3.

De noodzaak tot het uitvoeren van zandsuppleties wordt ieder jaar vastgesteld door Rijkswaterstaat op basis van de gegevens uit jaarlijkse metingen van de ligging van de kust (de Jarkus-metingen). Ieder jaar wordt vastgesteld of voldoende zand aanwezig is in het kustprofiel. Daarbij wordt uitgegaan van de trends in de ontwikkeling van het zandvolume. Een toelichting op de methode kan worden gevonden in het jaarlijkse verschijnende rapport 'Kustlijnkaarten' (Rijkswaterstaat, 2016a). In de 'Kustlijnkaarten' wordt in tabellen en in

kaarten zichtbaar gemaakt welke trends optreden in de ontwikkeling van de zandvolumes per raai. Figuur 7-6 toont een kustlijnkaart van de oostzijde van Ameland. In de roodgekleurde raaien is sprake van een overschrijding van de basiskustlijn. In de 'Kustlijnkaarten' wordt hierover opgemerkt: "Tussen 2020 en 2280 is de trend overwegend landwaarts en wordt de basiskustlijn op het merendeel van de raaien overschreden. Voor het midden en oosten van Ameland staat daarom een vooroeversuppletie gepland in 2019/2020."

De samenhang tussen de zandsuppleties voor de kust en de autonome ontwikkelingen van de kombergingsgebieden in de Waddenzee ligt in het sedimentdelende systeem, zoals beschreven in paragraaf 3.2. Het sedimentdelende systeem van het Pinkegat grenst via de buitendelta aan de westzijde aan de kust van Ameland en oostzijde aan de buitendelta van het Friesche zeegat. Mogelijk wordt een klein deel van het benodigde zand voor het Pinkegat geleverd door dan wel via de buitendelta van het Friesche Zeegat. Waarschijnlijk is deze aanvoer veel kleiner dan aanvoer vanaf de kust van Ameland, vanwege het van west naar oost gerichte netto transport van sediment langs de Waddeneilanden. Aanvoer vanaf de hoge platen het Rif en Engelsmansplaat naar het Pinkegat onder invloed van bodemdaling vindt hoogstwaarschijnlijk niet plaats (Wang, 2007). Ook het kombergingsgebied van het Borndiep, waar ten opzichte van het Pinkegat een veel minder omvangrijke bodemdaling zal plaatsvinden door de gaswinning Ternaard is verbonden met de kust van Ameland. Voor het aanvullen van de zandvoorraad van de kust vanwege de bodemdaling wordt daarom uitsluitend naar de kust van Ameland gekeken.



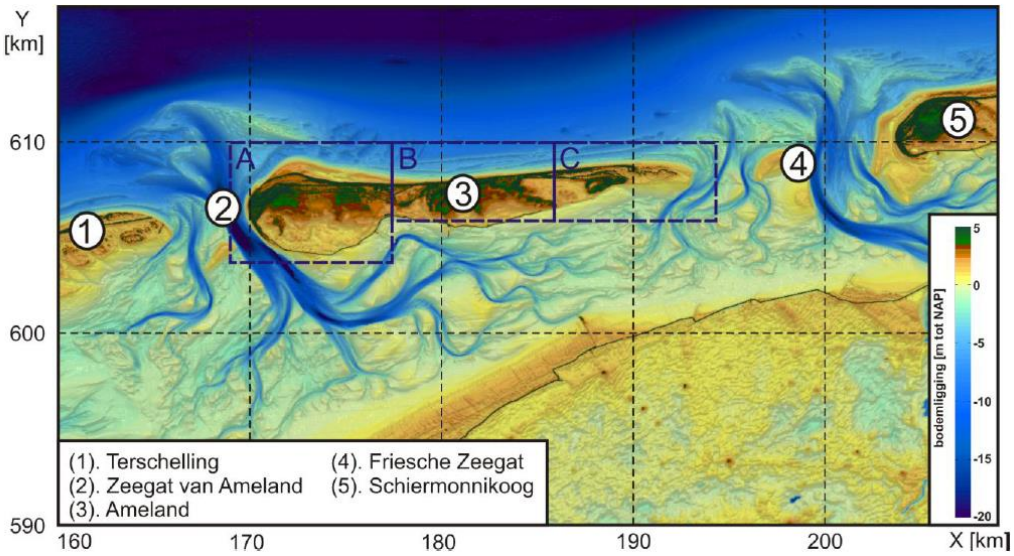
Figuur 7-6 Kustlijnkaart 2017 van de oostzijde van Ameland (uit Rijkswaterstaat, 2016a)

De analyse van de bodemhoogte door Vermaas en Marges (2015) laat een volumetoename zien van het vak 'kust Ameland' in Figuur 7-2 van 19,86 x 10^6 m^3 in de periode 1990-2012. Het zandvolume van de kust is dus groter geworden. De toename van het volume van de kust komt overeen met het volume zand van circa 20 x 10^6 m^3 dat in de periode 1990-2012 op de kust van Ameland is gesuppleerd. Ondanks de toename van het zandvolume van de kust van Ameland zullen ook in de toekomst naar verwachting nog zandsuppleties op de kust van Ameland moeten worden uitgevoerd om de ligging van de kustlijn te handhaven. Een van de redenen is dat de toename van het zandvolume in een ander gebied heeft plaatsgevonden dan de gebieden die worden beschouwd voor de kustlijnkaarten. Het aanlanden van de strandhaak van het Bornrif aan de

westzijde heeft geleid tot een grote toename van het zandvolume aan de noordwestzijde van Ameland (in gebied A in Figuur 7-7).

Door Elias en Bruens (2013) zijn berekeningen uitgevoerd naar de volumeontwikkelingen van de kust van Ameland. In de berekeningen is de ontwikkeling van het zandvolume in de kustzone beschouwd, waarbij is gecorrigeerd voor de aangebrachte zandsuppleties. Uit het centrale deel van de kust van Ameland (gebied B in Figuur 7-7) wordt per jaar 0,55 x 10^6 m^3 zand afgevoerd. Vanaf de strandhaak (gebied A in Figuur 7-7) wordt nog eens 0,8 x 10^6 m^3 zand verplaatst, zodat in totaal ruwweg 1,35 x 10^6 m^3 sediment per jaar verplaatst wordt. Dit betreft de netto verplaatsing, bruto is veel meer sediment in beweging. Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat uit de berekeningen en beschouwing van Elias en Bruens (2013) niet valt op te maken in welke richting het zand wordt getransporteerd. Op basis van de generieke kennis van de kust van de Wadden wordt verondersteld dat een belangrijk deel van het zandtransport plaatsvindt van west naar oost, onder invloed van het golf-gedreven langstransport. En uit Elias en Bruens (2013) is ook duidelijk dat voor een groot deel van de kust van Ameland netto transporten van zand naar de duinen plaatsvindt. De sedimentbalans van Vermaas en Marges (2015) is aanvullend op de analyse van Elias en Bruens (2013), maar geeft geen uitsluitsel over de richting van de transporten. Wel is in Vermaas en Marges (2015) rekening gehouden met de bodemdaling door gaswinning. Omdat de bodemdaling door de gaswinning Ameland ook optreedt onder de Noordzeekustzone, de duinen en de buitendelta van het Pinkegat, is dit een factor die tot een schijnbaar[12] verlies van sediment kan leiden.

In aanvulling op de berekende netto zandtransporten is ook gekeken naar de volumes zand die de afgelopen decennia zijn gesuppleerd op Ameland. Het Kustlijnkaartenboek 2017 (Rijkswaterstaat, 2016a) geeft een gesuppleerd volume voor het kustvak Ameland van 14,9 x 10^6 m^3 in tien jaar (de periode 2007- 2016). Het gemiddelde jaarlijkse suppletievolume is daarmee 1,49 x 10^6 m^3. Dit volume heeft dezelfde grootte van orde als de door Elias en Bruens (2013) berekende netto verplaatste volume van ruwweg 1,35 x 10^6 m^3 sediment per jaar. Het is niet mogelijk om op voorhand een onderscheid te maken naar het suppletievolume dat is gemoeid met de autonome achteruitgang van de kust (inclusief de autonome transporten naar de Waddenzee onder invloed van de stijgende zeespiegel) en het suppletievolume dat is gerelateerd aan de bodemdaling door de gaswinning Ameland. Dit onderscheid is dan ook niet aangegeven bij de suppletievolumes. Het is wel mogelijk achteraf om in een sedimentbalans, op basis van de opgetreden bodemdaling en sedimentatie in de Waddenzee te berekenen hoeveel sediment vanuit de kustzone naar de Waddenzee is getransporteerd vanwege de bodemdaling door gaswinning, zoals bijvoorbeeld is gedaan in Vermaas en Marges (2015).



Figuur 7-7 Gehanteerde indeling van de kust van Ameland: (A) westelijke eilandkop, (B) de eilandkust en (C) oostelijke eilandstaart; uit Elias en Bruens (2013).

[12] Door de bodemdaling verdwijnt er geen zand of slib maar neemt het watervolume toe. Dit is een schijnbaar verdwijnen (verlies) van sediment.

Ook in de toekomst zullen zandsuppleties op de kust van Ameland uitgevoerd moeten worden, waarbij net als voor de bodemdaling door gaswinning de snelheid van zeespiegelstijging een belangrijke variabele is. De snelheid van zeespiegelstijging beïnvloedt namelijk de achteruitgang van de kust. De achteruitgang van het zandvolume is op twee manieren gerelateerd aan de snelheid van zeespiegelstijging. In de eerste plaats is er het directe effect op de ligging van kustlijn en het zandvolume van de kust. Een sneller stijgende zeespiegel leidt tot een grotere achteruitgang van het kustprofiel (Oost e.a., 1998; Mulder, 2000) en een grotere achteruitgang betekent dat een groter volume aan zand gesuppleerd moet worden. Een sneller stijgende zeespiegel leidt ook tot een toename van het zandtransport naar de kombergingsgebieden in de Waddenzee. Het zandtransport naar de Waddenzee leidt tot een afname van de zandvoorraad van de kust en daarmee tot een achteruitgang van de kustlijn[13].

De combinatie van de response van de kustlijn zelf en die van de kombergingsgebieden op de stijgende zeespiegel leidt tot een sterkere achteruitgang van de kust bij een versneld stijgende zeespiegel. Uitgaande van het vigerende kustbeleid, dat is gericht op het behoud van de ligging van de kustlijn en het aanvullen van de zand voorraad van het kustfundament, betekent een versneld stijgende zeespiegel daarom dat meer zand gesuppleerd zal worden. Onderliggende studies bij het kustbeleid (Mulder, 2000; Nederbragt, 2005) en voor het Deltaprogramma (Haasnoot et al, 2018) laten een lineaire toename zien van het benodigde suppletievolume voor de kustlijnzorg voor geheel Nederland bij hogere snelheden van zeespiegelstijging. Bij een directe vertaling van deze landelijke relatie tussen zeespiegelstijging en suppletievolume naar Ameland betekent dit een toename van het suppletievolume van 1,49 x 10^6 m^3 per jaar bij de huidige snelheid van zeespiegelstijging, tot 4,47 x 10^6 m^3 per jaar bij de drie keer zo hoge snelheid van zeespiegelstijging bij het bereiken van het meegroeivermogen van 6 mm/jaar.

7.3 Natura 2000-gebieden

Toelichting

In de volgende paragrafen wordt per Natura 2000-gebied eerst een korte kenschets gegeven van het gebied. Vervolgens wordt het deel van het Natura 2000-gebied dat binnen de reikwijdte van de effecten ligt in meer detail beschreven. Hierbij wordt ook aangegeven of en welke aangewezen waarden hier voorkomen. Indien aanwezig, wordt aangegeven of de soorten gevoelig zijn voor de optredende effecten.

Aan de hand van de reikwijdte van de effecten, de aanwezigheid van de kwalificerende natuurwaarden binnen deze reikwijdte en de gevoeligheid van deze natuurwaarden voor de beschreven factoren, is een verdere specificatie gemaakt welke factoren relevant zijn voor de effectbeoordeling.

Uitzondering hierop zijn de verreikende effecten van stikstofemissies. Omdat dit een groot gebied kan omvatten, maar het effect en de beoordeling hiervan specifiek is (alleen stikstofdepositie, berekend met AERIUS voor heel het effectgebied in een keer), wordt niet op voorhand ingegaan op de mogelijke gebieden waarop stikstofdepositie op van toepassing zou kunnen zijn. De gebieden waar effecten van stikstofdepositie kunnen optreden volgen uit de AERIUS-berekeningen. Dit zijn de Natura 2000-gebieden Waddenzee, Noordzeekustzone, Duinen Ameland en Duinen Schiermonnikoog.

De productielocatie en het transportleidingtracé liggen buiten de begrenzing van een Natura 2000-gebied. Het meest nabijgelegen Natura 2000-gebied is de Waddenzee (de gebiedsgrens ligt op de buitenteen van de Waddenzeedijk). Op grotere afstand liggen de Natura 2000-gebieden Duinen Ameland, Duinen Schiermonnikoog en Lauwersmeer. Uit de analyse van de ingreep-effectrelaties in Hoofdstuk 6 blijkt dat door bodemdaling alleen mogelijke effecten optreden op het Natura 2000-gebied Waddenzee en door zandsuppletie op het Natura 2000-gebieden Noordzeekustzone en Duinen Ameland. Van deze gebieden zijn

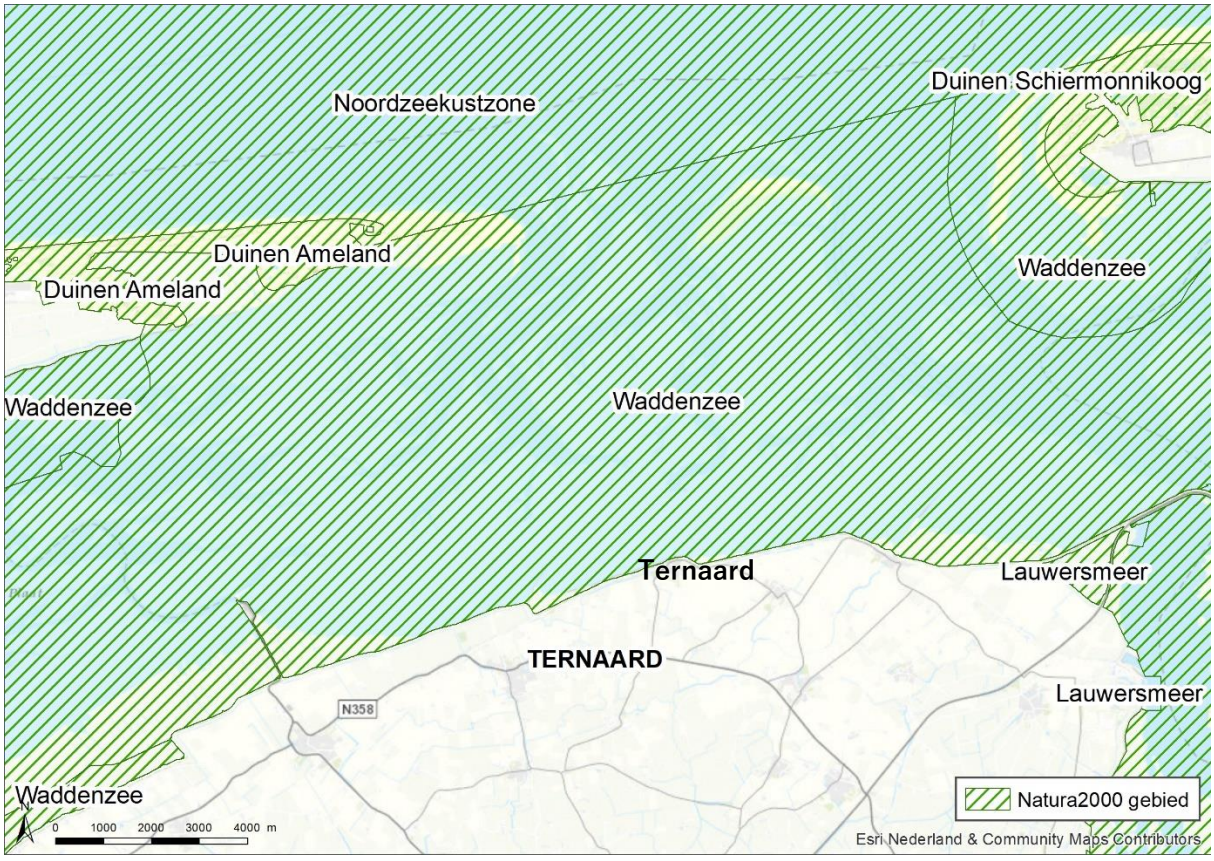
[13] Voor de duidelijkheid: de zandsuppleties op de kust van de Waddeneilanden worden niet uitgevoerd zodat de Waddenzee mee kan groeien met de stijgende zeespiegel. Het meegroeien met de stijgende zeespiegel is een autonome response van de zanddelende systemen. Het meegroeien gaat ten koste van de zandvoorraad van de aangrenzende kusten. De afname van de zandvoorraad van de kusten leidt tot achteruitgang van de kustlijn. Het kustbeleid gaat uit van het behoud van alle functies van de kust en daarom is het beheer gericht op het handhaven van de kustlijn en van de zandvoorraad van de kust. Daarom worden de zandsuppleties uitgevoerd. Zonder het uitvoeren van de zandsuppleties zullen de kombergingsgebieden van de Waddenzee nog steeds meegroeien met de stijgende zeespiegel, maar gaat de kustlijn achteruit.

hieronder korte beschrijvingen gegeven, de instandhoudingsdoelen zijn opgenomen in Bijlage C. Bij de beschrijvingen is ook aangegeven of de habitattypen en soorten voorkomen binnen het studiegebied van het plan en of deze gevoelig zijn voor de optredende effecten.

7.3.1 Waddenzee

Bij de beschrijving van het Natura 2000-gebied Waddenzee is reeds rekening gehouden met de vaststelling in het voorgaande hoofdstuk dat hier alleen door de bodemdaling als gevolg van de gaswinning en door stikstofdepositie eventuele gevolgen kunnen optreden. Gevolgen op dit Natura 2000-gebied als gevolg van zandsuppletie zijn in het voorgaande hoofdstuk al uitgesloten.

Beschrijving
Het Natura 2000-gebied Waddenzee is onderdeel van het internationale waddengebied dat zich uitstrekt van Den Helder tot Esbjerg (Denemarken). Het is een natuurlijk en dynamisch zoutwatergetijdengebied dat bestaat uit een complex van diepe geulen en ondiep water met platen, waarvan grote delen bij eb droogvallen. Deze platen worden doorsneden door een fijn vertakt stelsel van geulen.



Figuur 7-8 Begrenzing Natura 2000-gebieden nabij de projectlocatie

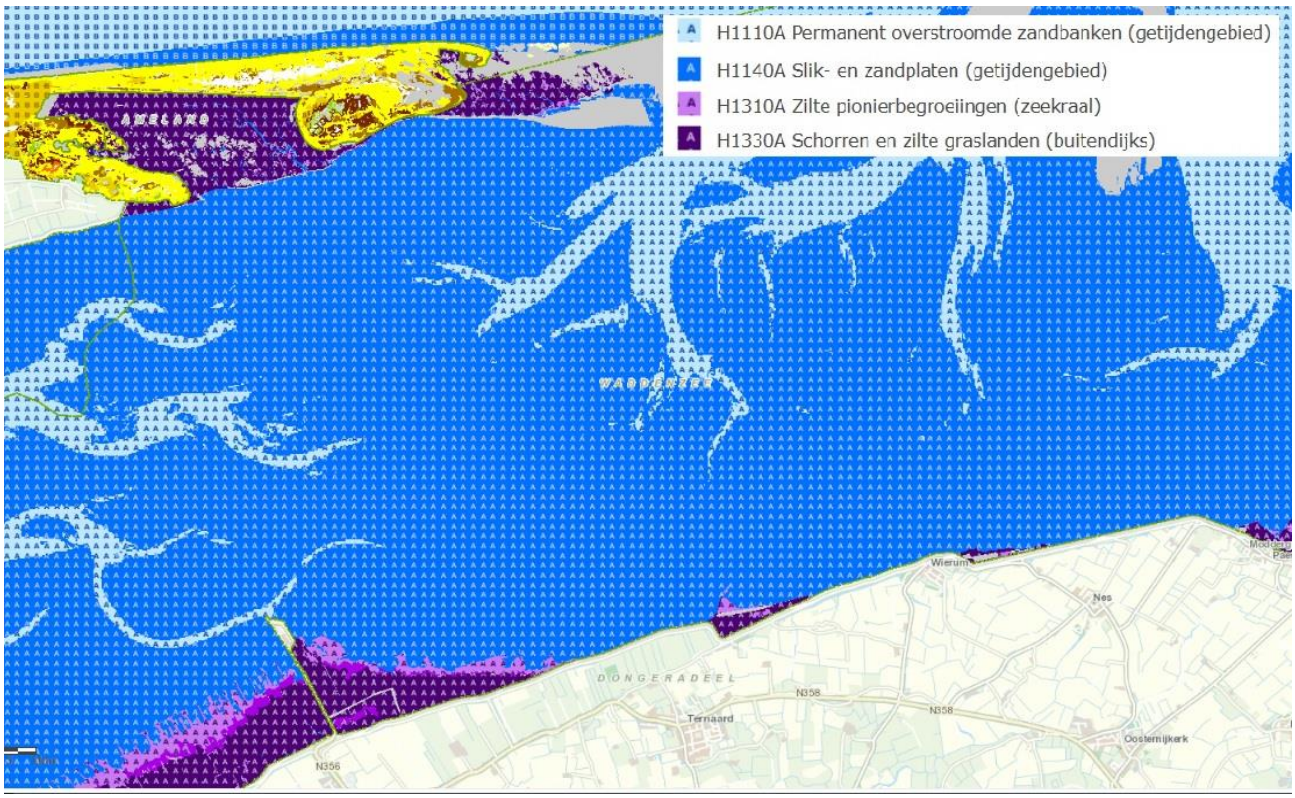
Langs het vasteland en op de eilanden liggen verspreid kweldergebieden, die een zeer diverse flora en fauna kennen. De kwelders langs de Friese vastelandskust zijn door menselijk ingrijpen ontstaan. Op de overgang van de hoge, groene kwelders en de lager gelegen, nattere landaanwinningskwelders ligt een natuurlijke afslagrand, het zogenaamde kwelderklif. De kwelders op de Waddeneilanden[14] hebben een natuurlijke geomorfologie, met geleidelijke hoogtegradiënten, meanderende kreken en afwisseling in de mate van natuurlijke drainage. De bodem is over het algemeen zandig, mede door de invloed van stuivend zand uit de nabijgelegen duingebieden. De geleidelijke overgangen van het wad richting duin leveren een grote biodiversiteit op. Er is een nagenoeg ongestoorde hydrodynamiek en geomorfologie aanwezig, waarin

[14] De kwelders van de Waddeneilanden vallen grotendeels onder het Natura 2000-gebied Waddenzee.

natuurlijke processen zorgen voor instandhouding en ontwikkeling van karakteristieke leefgebieden en habitats en de grenzen van land en water voortdurend wijzigen. De identiteit van het Waddengebied wordt medebepaald door de natuurlijke samenhang tussen Waddenzee, Waddeneilanden, Noordzeekustzone en de vastelandskust en de karakteristieke overgangen tussen land en zee, zoet en zout en droog en nat. Het Natura 2000-gebied is aangewezen voor 13 habitattypen, 6 habitatrichtlijnsoorten, 13 broedvogels en 39 niet-broedvogels (Bijlage C).

Habitattypen

Alle stikstofgevoelige habitattypen waarvoor het gebied kwalificeert liggen in het studiegebied voor de effecten van stikstofdepositie. In het studiegebied voor de bodemdaling (Figuur 7-9) zijn vijf habitattypen onderscheiden, die verdeeld worden in twee groepen: habitattypen van het wad en van de kwelders. In dit dynamische deel rond het wantij, dat door getijdewerking sterk beïnvloed wordt, bevinden zich de habitattypen: permanent overstroomde zandbanken (Waddenzee) [H1110A] en slik- en zandplaten (Waddenzee) [H1140A]. Dit zijn de delen die respectievelijk niet en wel droogvallen bij laagwater. In het minder dynamische gedeelte van het gebied liggen de kwelders, die opgedeeld worden in drie habitattypen: zilte pionierbegroeiingen (zeekraal) [H1310A], slijkgrasvelden [H1320] en schorren en zilte graslanden (buitendijks) [H1330A]. De ruimtelijke spreiding van de habitattypen wordt bepaald door de frequentie, de mate en de duur van overstroming gedurende hoogwater (Figuur 7-9).



Figuur 7-9 Habitattypenkaart Natura 2000-gebied Waddenzee ter hoogte van Ternaard (bron: Provincie Fryslân, frysland.maps.arcgis.com)

Over het habitattype slijkgrasvelden [H1320] wordt zowel in het aanwijzingsbesluit (Ministerie van LNV, 2008) als in het Natura 2000-beheerplan (Ministerie van I&W, 2016) gesteld dat slijkgrasvelden zoals bedoeld in de Europese Habitatrichtlijn (met klein slijkgras) niet in het waddengebied voorkomen en daar vroeger ook niet aanwezig waren[15]. Van dit habitattype komen enkele vierkant meters voor in het

[15] Er zijn wel velden met de winterharde bastaard tussen klein slijkgras en Amerikaans slijkgras. Dit Engels slijkgras heeft zich met hulp van de mens over het hele waddengebied en tot ver daarbuiten verspreid. De begroeiingen met Engels slijkgras worden als een kwalitatief niet optimale vorm van het habitattype 'slijkgrasvelden' beschouwd. Deze matige vorm ontstaat vaak op plekken waar

studiegebied, waarbij het niet de inheemse soort klein slijkgras betreft, zoals bedoeld in het habitattype, maar de uitheemse, bastaardsoort Engels slijkgras (Ministerie van I&W, 2016a). Omdat het een zeer kleine oppervlak betreft, de kwaliteit ervan als matig wordt beoordeeld vanwege de niet-inheemse soort Slijkgras sprake is van een 'ten gunste van' bepaling ten behoeve van zilte pionierbegroeiingen (zeekraal) [H1310A], wordt dit habitattype ten behoeve van de beoordeling samengevoegd met het habitattype zilte pionierbegroeiingen (natte habitattypen van de kwelders).

De overige habitattypen, vooral duinhabitattypen, liggen buiten het effectbereik van het plan. Een nadere beoordeling richt zich op de hierboven genoemde habitattypen.

Habitatrichtlijnsoorten

Gewone zeehond, grijze zeehond en de drie aangewezen vissoorten (zeeprik, rivierprik en fint) komen in het hele internationale Waddengebied voor. Ten oosten van Ameland zijn rondom Engelsmanplaat enkele bekende zeehondenligplaatsen van gewone zeehond. De grijze zeehond komt voornamelijk voor in het westelijke deel van de Waddenzee, maar wordt in toenemende mate ook in de overige delen waargenomen. Nabij de projectlocatie zijn geen bekende ligplaatsen van grijze zeehond bekend (Ministerie van I&M, 2016a). De vissoorten zijn anadrome soorten, dat wil zeggen vissen die als volwassen exemplaren vanuit zee de rivieren optrekken om daar te paaien. Een belangrijk deel van het leven wordt op zee doorgebracht, waarbij de Waddenzee van groot belang is als doortrek- en opgroeigebied (Ministerie van I&M, 2016a).
De nauwe korfslak is een typische soort van duinvalleien, maar is in de omgeving alleen bekend van duintjes op de kwelders van Schiermonnikoog (Boesveld et al, 2014).

Broedvogels

De aangewezen broedvogels zijn kenmerkende soorten van duinen, kwelders en stranden. Binnen het studiegebied voor bodemdaling en verstoring liggen alleen de kwelders aan de Friese waddenkust, duinen ontbreken binnen het gebied (nota bene, het gaat hierbij om de beoordeling van de gevolgen van de bodemdaling en niet om de beoordeling van het extra volume zandsuppleties of stikstofdepositie). Negatieve effecten op broedvogels van het duingebied worden hierdoor op voorhand uitgesloten.
Langs de kust van het vaste land is het aandeel potentieel geschikt broedgebied klein. Dit zijn alleen de kwelders 't Skoar ter hoogte van Ternaard en de kwelder de Kromme Horne bij Wierum. Beide zijn door de omvang, de ligging tegen de dijk en het beheer marginaal geschikt als broedgebied. Van deze kwelder zijn ook geen kolonies of broedvogels bekend[16]. Er kan wel sprake zijn van broedvogels in een lagere dichtheid. Effecten door verstoring en bodemdaling zijn in het voorgaande al uitgesloten. Negatieve effecten op broedvogels van de kwelders zijn om die reden uitgesloten.

Niet-broedvogels

De Waddenzee vormt voor niet-broedvogels een belangrijk gebied om te rusten en te foerageren. Gedurende de trekperiode in het voor- en najaar foerageren een groot aantal vogels op de droogvallende wadplaten en rusten tijdens hoogwater op kwelders of andere droogblijvende delen, zogenaamde hoogwatervluchtplaatsen (hvp's). Voor enkele soorten, zoals steenloper, bontbekplevier en scholekster, vormen naast de kwelders ook taluds van dijken, havens en pieren belangrijke foerageer- en rustplaatsen. Een wijziging in het areaal of kwaliteit droogvallende platen of kwelders kan van invloed zijn op deze soorten. Het effectbereik van de bodemdaling ligt grotendeels onder het kombergingsgebied van het Pinkegat en voor een zeer klein deel onder het kombergingsgebied van het Borndiep. In beide kombergingsgebieden is een verscheidenheid aan habitats (geulen, droogvallende platen en enkele kwelders) aanwezig van de aangewezen niet-broedvogels. De vogelsoorten kunnen op basis van leef- en foerageerwijze ingedeeld worden in groepen met dezelfde eigenschappen:

- Viseters.
- Grondeleenden.
- Benthoseters (eenden en steltlopers).
- Kwelder foerageerders (grasetende soorten).

---

kwelders eroderen. Herstel van de kwaliteit van de door klein slijkgras gedomineerde vormen van het habitattype wordt op dit moment niet als haalbaar gezien, doordat de vegetaties tegenwoordig geheel uit Engels slijkgras bestaan.

[16] Alleen ten westen van Holwerd ligt een grotere kwelder, waar ook kolonies van sterns bekend zijn (Rijkswaterstaat, 2016). Deze kwelder ligt buiten het studiegebied.

- Roofvogels.

De geulen vormen het foerageergebied voor visetende soorten en duikeenden en op de droogvallende platen foerageren hoofdzakelijk de benthoseters. De kwelders zijn het foerageer- en rustgebieden voor met name ganzen, eenden en steltlopers. De grondeleenden komen wisselend voor op droogvallende platen, lage kwelders en in permanent water op de hoge kwelders. Alle soorten komen buiten het broedseizoen verspreid over de hele Waddenzee voor en daarmee ook in het kombergingsgebied van het Pinkegat ten zuiden van Ameland-oost.

7.3.2 Noordzeekustzone

Bij de beschrijving van het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone is reeds rekening gehouden met de vaststelling in het voorgaande hoofdstuk dat hier alleen als gevolg van het extra volumes aan zandsuppleties en stikstofdepositie eventuele gevolgen kunnen optreden. Gevolgen op dit Natura 2000-gebied door de bodemdaling als gevolg van de gaswinning zijn in het voorgaande hoofdstuk al uitgesloten.

Beschrijving

De overgang van de open zee naar land wordt in ons land gevormd door de Noordzeekust. Hiervan is het gedeelte tussen Bergen en de monding van de Eems als Natura 2000-gebied Noordzeekustzone aangewezen. Deze zandige, dynamische kust is internationaal gezien een zeldzaam biotoop en herbergt lokaal grote hoeveelheden schelpdieren. Mede daardoor vormt het in de winter een belangrijk foerageergebied voor soorten als zwarte zee-eend en eidereend. Het gebied is ook een belangrijke kraamkamer voor mariene vissoorten.
De Noordzeekustzone loopt vanaf de enkele tientallen meters diepe zee geleidelijk op naar het strand. De begrenzing van het Natura 2000-gebied volgt aan de vastelandskust de laagwaterlijn, op de Waddeneilanden de voet van het duin en ligt aan de zeezijde op drie zeemijl (ongeveer 5,5 kilometer) voor de kust, op een diepte van ongeveer 20 meter. Deze vooroever bestaat voor het grootste deel uit fijn zand; alleen lokaal vormt grover zand de onderwaterbodem. Het betreft een dynamisch gebied, met hoge stroomsnelheden, sterke schommelingen in zoutgehalten (mede onder invloed van de aanvoer van zoetwater vanuit de rivieren dat via de Noordzee en het IJsselmeer de Noordzeekustzone bereikt) en sterke temperatuurwisselingen gedurende het jaar. Het gebied hangt functioneel samen met de diepere delen van de Noordzee en de Waddenzee: met beide vindt sterke uitwisseling van sediment plaats. Binnen de Noordzeekustzone wordt voortdurend materiaal afgezet en weer verplaatst als gevolg van zeestromingen en golfwerking. Het Natura 2000-gebied heeft een oppervlakte van 123.134 hectare (bron: http://www.synbiosys.alterra.nl/natura2000/gebiedendatabase.aspx).

Habitattypen

Slechts een vijftal stikstofgevoelige habitattypen waarvoor het gebied kwalificeert liggen in het studiegebied voor de effecten van stikstofdepositie. Het gaat om H3130A Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal), H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur), H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks), H2110 Embryonale duinen en H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk).

In het studiegebied voor de morfologische effecten (zandsuppleties) liggen vooral de habitattypen H1110B, Permanent overstroomde zandbanken (Noordzeekustzone) en H1140B, Slik- en zandplaten (Noordzeekustzone). Omdat ook de meest oostelijke punt van de kwelder van Ameland valt onder het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone, komen ook de habitattypen H1330A, Schorren en zilte graslanden (buitendijks), H2110, Embryonale duinen en H2120, Witte duinen voor. Net als voor de Waddenzee zijn dit respectievelijk het dynamische en minder dynamische deel van het Natura 2000-gebied (variërend van permanent overstroomd tot permanent boven zeeniveau).

Habitatrichtlijnsoorten

Gewone zeehond, grijze zeehond, bruinvis en de drie aangewezen vissoorten (zeeprik, rivierprik en fint) komen in de hele internationale Noordzee voor. Voor de zeehonden geldt dat binnen het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone vooral gefoerageerd wordt, nabij Ameland zijn geen bekende zeehondenligplaatsen van gewone en grijze zeehond (Ministerie van I&M, 2016b). De vissoorten zijn anadrome soorten, dat wil zeggen vissen die als volwassen exemplaren vanuit zee de rivieren optrekken om

daar te paaien. Een belangrijk deel van het leven wordt op zee doorgebracht, waarbij de Noordzeekustzone van groot belang is als doortrek- en opgroeigebied (Ministerie van I&M, 2016b).

Broedvogels

De drie aangewezen broedvogels (bontbekplevier, strandplevier, dwergstern) zijn kenmerkende soorten van zandplaten en stranden. Binnen het studiegebied ligt alleen de oostpunt van Ameland (De Hon). De Hon is in het beheerplan aangemerkt als beschermingszone voor de drie kustbroedvogels. Van het hoge deel van het strand, op de grens met de Natura 2000-gebieden Duinen Ameland en Waddenzee is een kleine kolonie van dwergsterns aanwezig (Ministerie van I&M, 2016b).

Niet-broedvogels

Voor de niet-broedvogels vormt de Noordzeekustzone vooral een belangrijk foerageer- en rustgebied gedurende de trekperiode of als overwinteringsgebied voor visetende en benthosetende soorten. Een wijziging in het areaal of kwaliteit van het voedsel in de bodem (permanent overstroomde zandbanken) kan van invloed zijn op deze soorten. Het effectbereik ligt grotendeels over het gebied grenzend aan het kombergingsgebied van het Pinkegat, waar een verscheidenheid aan habitats aanwezig is van de aangewezen niet-broedvogels (geulen, droogvallende platen en stranden). De vogelsoorten kunnen op basis van leef- en foerageerwijze ingedeeld worden in groepen met dezelfde eigenschappen:

- Viseters.
- Benthoseters (eenden en steltlopers).
- Omnivoren (meeuwen).

De overstroomde zandbanken vormen het foerageergebied voor visetende soorten en benthoseters (duikeenden). Op het beperkte areaal droogvallende platen foerageren hoofdzakelijk de benthoseters (steltlopers). De dwergmeeuw foerageert op vis en ongewervelden vanaf het wateroppervlak. Alle soorten komen verspreid over de hele Noordzeekustzone en daarmee ook ter hoogte van de kustzone ter hoogte van het kombergingsgebied van het Pinkegat, Ameland-oost.

7.3.3 Duinen Ameland

Bij de beschrijving van het Natura 2000-gebied Duinen Ameland is reeds rekening gehouden met de vaststelling in het voorgaande hoofdstuk dat hier alleen als gevolg van het extra volumes aan zandsuppleties en stikstofdepositie eventuele gevolgen kunnen optreden. Gevolgen op dit Natura 2000-gebied door de bodemdaling als gevolg van de gaswinning zijn in het voorgaande hoofdstuk al uitgesloten.

Beschrijving

Het gebied Duinen Ameland wordt landschappelijk gekenmerkt door een uitgestrekt duingebied dat zich over de gehele lengte van het eiland uitstrekt. In het oosten en in de noordwesthoek groeit het eiland aan, ter hoogte van Nes en Buren vindt kustafslag plaats. Het gebied heeft een grote diversiteit aan milieutypen als gevolg van de grote variatie in nat versus droog, zoet versus zout en kalkhoudend versus kalkarm. In het oosten zijn de duinen relatief kalkrijk en is de verstuivingsdynamiek hoog, waardoor de hier gelegen Kooiduinen en Oerderduinen soortenrijk zijn. In het westen zijn het laagveenmoeras van de Lange Duinen, de heideterreinen en de korstmosrijke, oude duinkoppen bij Hollum bijzonder. In de binnenduinrand is een groot areaal aan natte duinheiden aanwezig met kraaihei en dophei. Het gebied omvat ook een paar kleine boscomplexen die bestaan uit aangeplant naald- en loofbos en spontane opslag (bron: http://www.synbiosys.alterra.nl/natura2000/gebiedendatabase.aspx).

Habitattypen

Alle stikstofgevoelige habitattypen waarvoor het gebied kwalificeert liggen in het studiegebied voor de effecten van stikstofdepositie. In paragraaf 9.2 is dit verder uitgewerkt In het studiegebied voor de effecten van de kustsuppleties zijn met name de duinen grenzend aan de zeereep (overwegend witte duinen) van belang, maar effecten op andere (grijze) duinen zijn niet op voorhand uit te sluiten, waardoor deze duinhabitats ook relevant zijn.

Habitatrichtlijnsoorten

Beide habitatrichtlijnsoorten waarvoor het gebied kwalificeert (grijze zeehond en groenknolorchis) zijn relevant voor de effecten van de zandsuppleties. De groenknolorchis groeit in het habitattype vochtige duinvalleien en wordt via dat habitattype al getoetst op de effecten van stikstofdepositie.

Broedvogels
Voor de effecten van zandsuppleties zijn alleen de kustbroeders relevant, en deze soorten behoren niet tot de instandhoudingsdoelstelling van het Natura 2000-gebied Duinen Ameland. Effecten op het leefgebied van deze soorten door stikstofdepositie wordt beoordeeld via de toets van de habittattypen

Niet-broedvogels
Het Natura 2000-gebied Duinen Ameland kwalificeert niet voor niet-broedvogels,

7.3.4 Duinen Schiermonnikoog

Bij de beschrijving van het Natura 2000-gebied Duinen Ameland is reeds rekening gehouden met de vaststelling in het voorgaande hoofdstuk dat hier alleen als gevolg van het extra volumes aan zandsuppleties en stikstofdepositie eventuele gevolgen kunnen optreden. Gevolgen op dit Natura 2000-gebied door de bodemdaling als gevolg van de gaswinning zijn in het voorgaande hoofdstuk al uitgesloten.

Beschrijving
Schiermonnikoog is één van de kleinste en meest ongerepte eilanden in de Waddenzee. Het gebied Duinen Schiermonnikoog wordt landschappelijk gekenmerkt door een uitgestrekt duingebied dat zich over een groot deel van de westelijke helft van het eiland uitstrekt. Het duingebied heeft een grote diversiteit en goed ontwikkelde kalkrijke duinvalleien. In het gebied komen lokaal duinblauwgraslanden (drogere en zuurdere vormen van blauwgrasland) (Hertenbos, Kapenglop) en heischraal grasland (met borstelgras e.d.) voor. Vroeger is over een gedeelte van het westelijk en centraal deel naaldbos aangeplant. Het areaal bos is later door spontane ontwikkeling (loofbos) uitgebreid tot een aanzienlijk oppervlak. Aan de westzijde omvat het gebied ook een zoetwaterplas, de Westerplas. Verstuiving is over een kleine oppervlakte in gang gezet, in het oostelijk deel is een natuurlijk gat in de stuifdijk geslagen, waardoor zeewater beperkt binnenstroomt (bron: http://www.synbiosys.alterra.nl/natura2000/gebiedendatabase.aspx).

Habitattypen
Alle stikstofgevoelige habitattypen waarvoor het gebied kwalificeert liggen in het studiegebied voor de effecten van stikstofdepositie. In paragraaf 9.2 is dit verder uitgewerkt. In het studiegebied voor de effecten van de kustsuppleties zijn met name de duinen grenzend aan de zeereep (overwegend witte duinen) van belang, maar effecten op andere (grijze) duinen zijn niet op voorhand uit te sluiten, waardoor deze duinhabitats ook relevant zijn.

Habitatrichtlijnsoorten
De habitatrichtlijnsoort waarvoor het gebied kwalificeert (groenknolorchis) groeit in het habitattype vochtige duinvalleien en wordt via dat habitattype al getoetst op de effecten van stikstofdepositie.

Broedvogels
Voor de effecten van zandsuppleties zijn alleen de kustbroeders relevant, en deze soorten behoren niet tot de instandhoudingsdoelstelling van het Natura 2000-gebied Duinen Schiermonnikoog. Effecten op het leefgebied van deze soorten door stikstofdepositie wordt beoordeeld via de toets van de habittattypen

Niet-broedvogels
Het Natura 2000-gebied Duinen Schiermonnikoog kwalificeert niet voor niet-broedvogels,

7.4 Samenvatting

In dit hoofdstuk is voor een aantal habitattypen, habitatsoorten en broedvogel- en niet-broedvogelsoorten vastgesteld dat effecten door het project op voorhand kunnen worden uitgesloten. Samen met de afbakening van effecten die in hoofdstuk 6 is beschreven kan daarmee voor een aantal instandhoudingsdoelstellingen een effect op voorhand worden uitgesloten. In de onderstaande tabel is opgenomen voor welke habitattypen, habitatsoorten en broedvogel- en niet-broedvogelsoorten geldt dat effecten hierop op voorhand kunnen

worden uitgesloten. Daarmee zullen in de volgende hoofdstukken, waarin de effectbepaling en -beoordeling is opgenomen, deze niet meer worden opgenomen.

Tabel 7-3 Selectie van instandhoudingsdoelen waarop effecten op grond van de effectafbakening kunnen worden uitgesloten. Per aspect is met een X aangegeven als een effect op basis van de effectafbakening kan worden uitgesloten. Dit is het geval wanneer het betreffende instandhoudingsdoel geen ruimtelijke overlap heeft met het effectgebied. Met een X[1)] is aangeduid dat de betreffende soort mogelijk wel gevoelig is voor verandering van het leefgebied door stikstofdepositie, maar dat dit effect getoetst wordt op het niveau van het leefgebied en niet voor de individuele soort.
Effecten door oppervlakteverlies, verstoring en verandering in de populatiedynamiek treden nergens op en zijn daarom ook niet in deze tabel opgenomen.

Waddenzee	**Bodemdaling**	**Stikstofdepositie in de aanlegfase**	**Extra volume zandsuppleties**
Habitattypen			
H1110A Permanent overstroomde zandbanken (getijdengebied)		X	X
H1130 Estuaria	X	X	X
H1140A Slik- en zandplaten (getijdengebied)		X	X
H1310A Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)			X
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	X		X
H1320 Slijkgrasvelden			X
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)			X
H1330B Schorren en zilte graslanden (binnendijks)	X		X
H2110 Embryonale duinen	X		X
H2120 Witte duinen	X		X
H2130A Grijze duinen (kalkrijk)	X		X
H2130B Grijze duinen (kalkarm)	X		X
H2160 Duindoornstruwelen	X		X
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	X		X
Habitatrichtlijnsoorten			
H1014 Nauwe korfslak	X	X[1)]	X
H1095 Zeeprik	X	X	X
H1099 Rivierprik	X	X	X
H1103 Fint	X	X	X

H1364 Grijze zeehond		X	X
H1365 Gewone zeehond		X	X
Broedvogels			
Duinen			
A081 Bruine kiekendief	X	X[1)]	X
A082 Blauwe kiekendief	X	X[1)]	X
A222 Velduil	X	X[1)]	X
Kwelders en stranden			
A034 Lepelaar		X[1)]	X
A063 Eider		X[1)]	X
A132 Kluut		X[1)]	X
A137 Bontbekplevier		X[1)]	X
A138 Strandplevier		X[1)]	X
A183 Kleine mantelmeeuw		X[1)]	X
A191 Grote stern		X[1)]	X
A193 Visdief		X[1)]	X
A194 Noordse stern		X[1)]	X
A195 Dwergstern		X[1)]	X
Niet-broedvogels			
Visetende soorten			
A005 Fuut	X	X	X
A017 Aalscholver	X	X	X
A034 Lepelaar	X	X	X
A069 Middelste zaagbek	X	X	X
A070 Grote zaagbek	X	X	X
A197 Zwarte stern	X	X	X
Duik- en grondeleenden			
A052 Wintertaling	X	X	X
A053 Wilde eend	X	X	X
A054 Pijlstaart	X	X	X
A056 Slobeend	X	X	X

A067 Brilduiker	X	X	X
A051 Krakeend	X	X	X
A061 Kuifeend	X	X	X
Naar schelpdieren duikende soorten			
A062 Topper	X	X	X
A063 Eider	X	X	X
Kwelderfoerageerders			
A037 Kleine zwaan		X[1)]	X
A039b Toendrarietgans		X[1)]	X
A043 Grauwe gans		X[1)]	X
A045 Brandgans		X[1)]	X
A046 Rotgans		X[1)]	X
A050 Smient		X[1)]	X
Benthoseters			
A048 Bergeend		X	X
A130 Scholekster		X	X
A132 Kluut		X	X
A137 Bontbekplevier		X	X
A140 Goudplevier		X	X
A141 Zilverplevier		X	X
A142 Kievit		X	X
A143 Kanoet		X	X
A144 Drieteenstrandloper		X	X
A147 Krombekstrandloper		X	X
A149 Bonte strandloper		X	X
A156 Grutto		X	X
A157 Rosse grutto		X	X
A160 Wulp		X	X
A161 Zwarte ruiter		X	X
A162 Tureluur		X	X
A164 Groenpootruiter		X	X

A169 Steenloper		X	X
Roofvogels			
A103 Slechtvalk	X	X	X

Noordzeekustzone	**Bodemdaling**	**Stikstofdepositie in de aanlegfase**	**Extra volume zandsuppleties**
Habitattypen			
H1110B Permanent overstroomde zandbanken (Noordzee-kustzone)	X	X	
H1140B Slik- en zandplaten (Noordzee-kustzone)	X	X	
H1310A Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)	X		
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	X		
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	X		
H2110 Embryonale duinen	X		
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	X		
Habitatrichtlijnsoorten			
H1095 Zeeprik	X	X	
H1099 Rivierprik	X	X	
H1103 Fint	X	X	
H1351 Bruinvis	X	X	
H1364 Grijze zeehond	X	X	
H1365 Gewone zeehond	X	X	
H1903 Groenknolorchis	X	X[1)]	
Broedvogels			
Kwelders en stranden			
A137 Bontbekplevier	X	X[1)]	
A138 Strandplevier	X	X[1)]	
A195 Dwergstern	X	X[1)]	
Niet-broedvogels			
Visetende soorten			

A001 Roodkeelduiker	X	X
A002 Parelduiker	X	X
A017 Aalscholver	X	X
Naar schelpdieren duikende soorten		
A062 Topper	X	X
A063 Eider	X	X
A065 Zwarte zee-eend	X	X
Benthoseters		
A048 Bergeend	X	X
A130 Scholekster	X	X
A132 Kluut	X	X
A137 Bontbekplevier	X	X
A141 Zilverplevier	X	X
A143 Kanoet	X	X
A144 Drieteenstrandloper	X	X
A149 Bonte strandloper	X	X
A157 Rosse grutto	X	X
A160 Wulp	X	X
A169 Steenloper	X	X
A177 Dwergmeeuw	X	X

Duinen Ameland	Bodemdaling	Stikstofdepositie in de aanlegfase	Extra volume zandsuppleties
Habitattypen			
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	X		
H2120 Witte duinen	X		
H2130 A Grijze duinen (kalkrijk)	X		
H2130 B Grijze duinen (kalkarm)	X		
H2130 C Grijze duinen (heischraal)	X		

H2140A Duinheiden met kraaihei (vochtig)	X	
H2140 B Duinheiden met kraaihei (droog)	X	
H2150 Duinheiden met struikhei	X	
H2160 Duindoornstruwelen	X	
H2170 Kruipwilgstruwelen	X	
H2180A Duinbossen (droog	X	
H2180B Duinbossen (vochtig)	X	
H2180C Duinbossen (binnenduinrand)	X	
H2190A Vochtige duinvalleien (open water)	X	
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	X	
H2190C Vochtige duinvalleien (ontkalkt)	X	
H2190D Vochtige duinvalleien (hoge moerasplanten)	X	
H6230 Heischrale graslanden	X	
Habitatrichtlijnsoorten		
H1364 Grijze zeehond	X	X
H1903 Groenknolorchis	X	X
Broedvogels		
Duinen & Duinvalleien		
A021 Roerdomp	X	X[1)]
A063 Eider	X	X[1)]
H081 Bruine Kiekendief	X	X[1)]
A082 Blauwe Kiekendief	X	X[1)]
A119 Porseleinhoen	X	X[1)]
A222 Velduil	X	X[1)]
A277 Tapuit	X	X[1)]
A295 Rietzanger	X	X[1)]
A338 Grauwe Klauwier	X	X[1)]

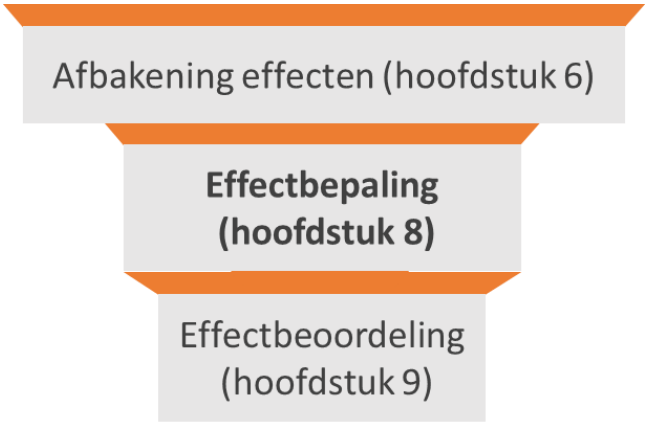
Duinen Schiermonnikoog	Bodemdaling	Stikstofdepositie in de aanlegfase	Extra volume zandsuppleties
Habitattypen			
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	X		X
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	X		X
H2120 Witte duinen	X		X
H2130A Grijze duinen (kalkrijk)	X		X
H2130B Grijze duinen (kalkarm)	X		X
H2130C Grijze duinen (heischraal)	X		X
H2160 Duindoornstruwelen	X		X
H2170 Kruipwilgstruwelen	X		X
A2180A Duinbossen (droog)	X		X
H2180B Duinbossen (vochtig)	X		X
H2180C Duinbossen (binnenduinrand)	X		X
H2190A Vochtige duinvalleien (open water)	X		X
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	X		X
H2190C Vochtige duinvalleien (ontkalkt)	X		X
H2190D Vochtige duinvalleien (hoge moerasplanten)	X		X
H6410 Blauwgraslanden	X		X
Habitatrichtlijnsoorten	X		
H1903 Groenknolorchis	X	X[1)]	X
Broedvogels			
Duinen & Duinvalleien			
A021 Roerdomp	X	X[1)]	X
A063 Eider	X	X[1)]	X
A081 Bruine Kiekendief	X	X[1)]	X
A082 Blauwe Kiekendief	X	X[1)]	X
A222 Velduil	X	X[1)]	X
A275 Paapje	X	X[1)]	X

A277 Tapuit	X	X[1)]	X

8 EFFECTBEPALING

8.1 Inleiding

Hiervoor is in hoofdstuk 6 beschreven welke effecten wel en welke niet kunnen optreden bij de gasboring en gaswinning Ternaard, waarbij ook is ingegaan op de effecten door de extra kustsuppleties die ten gevolge van de met de gaswinning samenhangende bodemdaling nodig zijn. In Tabel 6-1 in paragraaf 6.1.16.3 is opgenomen welke potentiële effecten kunnen optreden. Daarna is in Hoofdstuk 7 beschreven welke morfologische kenmerken en welke Natura 2000-instandhoudingsdoelen de betrokken Natura 2000-gebieden Waddenzee en Noordzeekustzone hebben. Aan het einde van Hoofdstuk 7 is per Natura 2000-gebied een tabel opgenomen waarin is aangegeven op welke habitattypen en soorten effecten kunnen worden uitgesloten, zodat een beperkt aantal potentiële effecten overblijven. In het voorliggende hoofdstuk 8 (Effectbepaling) wordt voor deze potentiële effecten bepaald wat de mogelijke effecten zijn op de morfologische kenmerken van de Waddenzee en op de instandhoudingsdoelstellingen. Alleen effecten die op basis van deze effectbepaling niet met zekerheid kunnen worden uitgesloten, worden in het volgende hoofdstuk nader beoordeeld.



8.2 Morfologische effectbepaling

De beoordeling voor de morfologische veranderingen heeft alleen betrekking op de winning. De effectketen loopt geheel via de bodemdaling die door de gaswinning onder de Waddenzee optreedt. Tijdens de aanlegfase vinden geen effecten plaats op de morfologie en daarom vindt in deze paragraaf alleen een beoordeling van de winning plaats.

8.2.1 Grootschalige sedimentatie

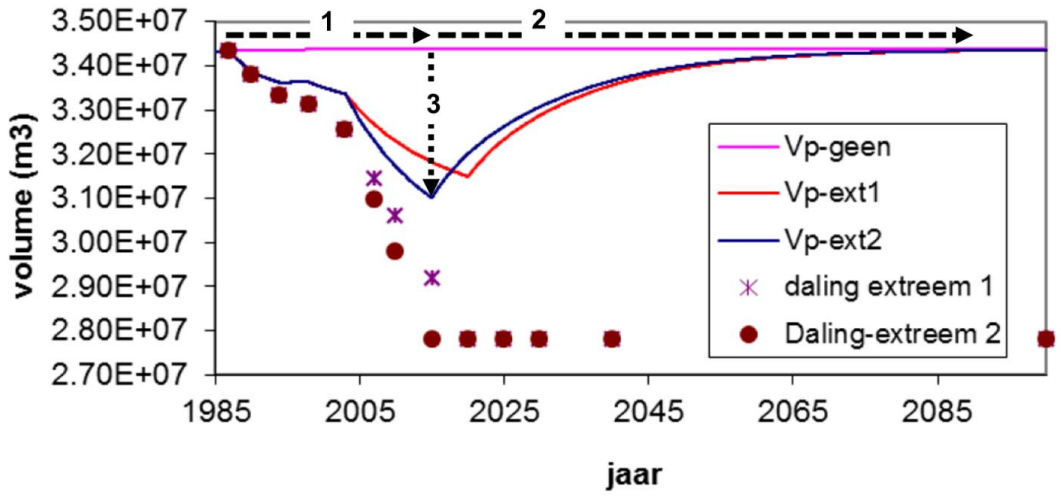
Bij de bodemdaling die optreedt bij de gaswinning wordt de beschikbare gebruiksruimte per kombergingsgebied als harde grens gehanteerd. Deze randvoorwaarde wordt op voorhand toegepast bij het vaststellen van het maximaal winbare volume aan gas en tijdens de winning door te werken volgens de HadK-systematiek, zoals is beschreven in Hoofdstuk 4. De bodemdaling door alle gaswinning (de voorgenomen gaswinning Ternaard en de bestaande gaswinningen Ameland en MLV) in de beïnvloede kombergingsgebieden Pinkegat en Borndiep zal daarom in combinatie met de zeespiegelstijging het meegroeivermogen van de betreffende kombergingsgebieden nooit overschrijden (Figuur 4-1). Omdat de omvang van de bodemdaling door de gaswinningen het meegroeivermogen niet overschrijdt als gevolg van de bodemdaling door gaswinning, blijven het geomorfologische evenwicht en de sedimentbalans van de kombergingsgebieden in stand. Dit is aangetoond in de Passende beoordeling voor de gaswinning Waddenzee (Ministerie van Economische Zaken, 2006), in aanvullend onderzoek dat is uitgevoerd als onderdeel van de monitoring bij die gaswinning (Wang *et.al.,* 2017) en in onderzoek in opdracht van de Waddenacademie (van der Spek, 2018, Wang et al., 2018). Deze onderzoeken omvatten alle bodemdaling onder de kombergingsgebieden, ongeacht het gasveld of de gasvelden waaruit de winning plaatsvindt. De resultaten van deze onderzoeken zijn daarom ook van toepassing op de bodemdaling door de gaswinning Ternaard. Het toepassen van de HadK-systematiek, zoals uitgebreid beschreven in Hoofdstuk 3, betekent dat geen effecten zullen optreden op de kenmerkende morfologische elementen en processen in de

Waddenzee. Structurele effecten op de sedimenthuishouding en de morfologie van de Waddenzee als gevolg van de bodemdaling door gaswinning, waaronder de gaswinning Ternaard, zullen dan ook niet optreden.

8.2.2 Plaatareaal, droogvalduur

De modellen voor het berekenen van de gevolgen van de bodemdaling op de morfologie, waaronder het ASMITA-model (Oost et al., 1998; Wang et al., 2017; 2018), laten allemaal een tijdelijke afname zien van het sedimentvolume van de droogvallende platen. Deze tijdelijke en beperkte afname van het sedimentvolume van de platen, triggert de aanvoer van extra sediment vanuit de kustzone en naar de platen en geulen in het kombergingsgebied. De bodemdaling die optreedt door de gaswinning brengt een extra netto transport van zand en slib op gang (extra ten opzichte van het netto transport onder invloed van de -versneld- stijgende zeespiegel), zodat de afname van het sedimentvolume van de wadplaten kleiner is dan omvang van de bodemdaling onder de wadplaten (Oost et al., 1998; Ministerie van Economische Zaken, 2006; Wang *et.al.,* 2017).

De berekende afname van het sedimentvolume van de wadplaten door Wang en Eysink (2005) en aangevuld in Wang *et.al.* (2017), is gebruikt om de tijdelijke afname van de hoogte en het areaal van de wadplaten te bepalen. De afname van het sedimentvolume van de wadplaten is kleiner dan de bodemdaling door gaswinning, omdat 1. De bodemdaling deels onder de geulen en deels onder de wadplaten plaatsvindt; 2. Extra aanvoer van sediment plaatsvindt. De bodemdaling onder de geulen leidt niet tot een afname van het sedimentvolume van de platen. Figuur 8-1 toont de met het Asmita model gemodelleerde response van het plaatvolume bij twee hypothetische bodemdalingsscenario's, zoals die zijn opgenomen in Wang et al. (2017). In de grafiek zijn zowel de bodemdalingsvolumes getoond, als de ontwikkeling van het plaatvolume in de loop van de tijd. In de periode waarin de bodemdaling plaatsvindt (aangegeven met de pijl bij 1) is sprake van een afname van het plaatvolume. In de periode na de bodemdaling (aangegeven met de pijl bij 2) neemt het plaatvolume toe, totdat het op hetzelfde niveau is als het plaatvolume zonder bodemdaling. De maximale omvang van de volume afname (aangegeven met de pijl bij 3) is ongeveer 50% van het totale bodemdalingsvolume.



Figuur 8-1 Grafiek met de ontwikkeling van het bodemdalingsvolume in het Pinkegat bij twee scenario's 'extreem 1' en 'extreem 2' (de punten in de grafiek), de ontwikkeling van het volume sediment in de droogvallende plaat (Vp-geen), en de ontwikkeling van het sedimentvolume in de plaat onder invloed van de twee bodemdalingscenario's (Vp-extr 1: extreem 1 en Vp-extr 2: extreem 2). Afkomstig uit Wang et al. (2017)

Voor het berekenen van de tijdelijke afname van het sedimentvolume van de wadplaten in het kombergingsgebied Pinkegat is uitgegaan van de berekeningsresultaten van Wang en Eysink (2005) en Wang *et.al.* (2017) die zijn getoond in Figuur 8-1: de afname van het sedimentvolume van de platen door bodemdaling wordt voor 50% aangevuld door extra aanvoer van zand en slib. Aangenomen wordt dat ¼ van

de bodemdaling plaatsvindt onder geulen en ¾ onder wadplaten. Op basis van de genoemde percentages, in combinatie met de berekende belasting van de gebruiksruimte door gaswinning (meegroeivermogen van 6 mm/jaar voor het Pinkegat, in combinatie met het TNO 2016 zeespiegelstijgingsscenario) bedraagt de maximale jaarlijkse afname van het sedimentvolume van de droogvallende platen 73.000 m^3. Deze tijdelijke afname van het sedimentvolume komt overeen met een afname van de hoogte van de platen met maximaal 1,6 mm, gemiddeld over alle platen in het gehele kombergingsgebied. Deze afname is kleiner dan de resolutie van centimeters die wordt gehanteerd bij het meten van de hoogte van de platen (vaklodingen Rijkswaterstaat). De droogvalpercentages van de platen veranderen niet door deze hoogteafname.

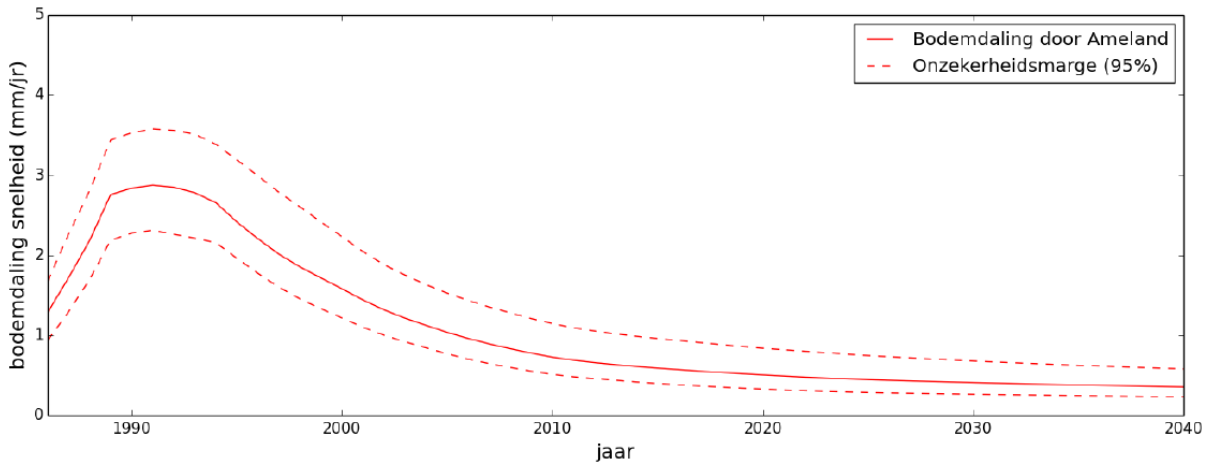
De langjarige afname van het sedimentvolume van de droogvallende platen is klein in vergelijking tot de grote variatie die optreedt op kortere tijdschalen, zoals bijvoorbeeld waargenomen met de LiDAR metingen (Schrijfershof, 2018; van der Lugt et al. 2019). De tijdelijke afname van het sedimentvolume leidt niet tot een meetbare of merkbare afname van het plaatareaal.

Omdat de bodemdalingsvolumes onder het Borndiep kombergingsgebied beduidend kleiner zijn dan die in het Pinkegat, zal de berekende maximale afname van de plaathoogte nog veel kleiner zijn dan de 1,6 mm. Vanwege de zeer beperkte omvang (minder dan 1 mm) is deze niet berekend.

Het toepassen van de HadK-systematiek, zoals uitgebreid beschreven in Hoofdstuk 3, betekent dat meetbare en merkbare veranderingen van het areaal en de droogvalpercentages van de wadplaten niet zullen optreden als gevolg van de bodemdaling door de gaswinning Ternaard.

De bodemdaling stopt niet volledig na het beëindigen van de gaswinning, omdat daarna nog sprake is van een zekere na-ijling van de bodemdaling. Figuur 8-2 toont de voorspelling van de reeds opgetreden en de toekomstige bodemdaling bij de gaswinning Ameland, waarbij de gemiddelde bodemdaling is weergegeven, met een onzekerheidsmarge. Duidelijk is dat de bodemdaling na aanvang van de gaswinning in eerste instantie sneller ging, tot de maximale snelheid werd bereikt in het begin van de jaren ’90. Daarna is de snelheid van bodemdaling afgenomen. De ‘staart’ van de grafiek aan de rechterzijde is het na-ijleffect. Het na-ijleffect is nadrukkelijker in beeld gekomen bij de studies naar de tijdsafhankelijke bodemdaling (ook wel bekend als de LTS-studies, zie ook paragraaf 3.3.10), maar was ook al onderwerp van aandacht in de Passende beoordeling Gaswinning Waddenzee (Ministerie van EZ, 2006). Op het moment van opstellen van de Passende beoordeling was duidelijk dat na beëindiging van de gaswinning nog gedurende enige tijd bodemdaling zou voortduren. In de Passende beoordeling Gaswinning Waddenzee (Ministerie van EZ, 2006) is over deze na-ijling dan ook opgemerkt: “… *Aangezien het cumulatief gaat om enkele millimeters tot 2100 is er wetenschappelijk gezien redelijkerwijs geen twijfel dat dit effect de natuurwaarden van de Wadden of aangrenzende kusten niet beïnvloedt. In beide gevallen zullen deze effecten verdwijnen door sedimentatie, zolang de zeespiegelstijgsnelheid nog gebruiksruimte overlaat. Mocht dat laatste niet het geval zijn (alleen bij een zeer extreme zeespiegelstijgingsontwikkeling) dan verdrinkt het gebied enkele jaren eerder dan door autonome ontwikkelingen het geval zou zijn.*” De berekeningen laten zien dat met “enkele jaren” een periode van hooguit één tot twee jaar omvat. Deze beoordeling uit de Passende beoordeling Gaswinning Waddenzee (Ministerie van EZ, 2006) is onverkort van kracht, inclusief de mogelijke na-ijling door de gaswinning Ternaard.

Meetbare en merkbare veranderingen van het areaal en de droogvalpercentages van de wadplaten zullen na beëindiging van de gaswinning Ternaard niet optreden als gevolg van het na-ijlen van de bodemdaling.



Figuur 8-2 Grafiek met de gemiddelde snelheid van daling in de loop van de tijd in kombergingsgebied Pinkegat door de gaswinning Ameland. De stippellijnen zijn de boven- en ondergrens van het betrouwbaarheidsinterval (NAM, 2017).

8.2.3 Sedimentsamenstelling

De abiotische en biotische processen in de Waddenzee veranderen niet als gevolg van de bodemdaling door de voorgenomen gaswinning, zie paragraaf 7.2.4. Omdat deze processen en de condities in de kombergingsgebieden vergelijkbaar blijven, zoals wordt gewaarborgd door het toepassen van de HadK-systematiek, verandert de sedimentsamenstelling in de Waddenzee niet. De effectketen van de gaswinning werkt niet door tot op het niveau van de sedimentsamenstelling. Dat betekent dat geen sprake zal zijn van een verandering in de sedimentsamenstelling door de voorgenomen gaswinning Ternaard.

8.2.4 Kwelders

De bodemdalingsschotel die ontstaat door de gaswinning bij Ternaard heeft het zwaartepunt onder de Waddenzee. De vastelandskwelders liggen aan de buitenzijde van de bodemdalingsschotel, zodat de totale bodemdaling onder de kwelders aan het einde van de gaswinning maximaal enkele centimeters bedraagt. Binnen het beïnvloedingsgebied van de gaswinning Ternaard bevinden zich twee kleine kwelders: ‘t Skoar en de Kromme Horne en het gebied met pioniervegetatie ten zuiden van de kwelderrand van de Hon op Oost Ameland.

De autonome ontwikkeling van de kwelders ‘t Skoar en de Kromme Horne is beschreven in paragraaf 7.2.5. De bodemdaling onder ‘t Skoar blijft kleiner dan 1mm per jaar. Voor de Kromme Horne is dat iets meer vanwege cumulatie van bodemdaling die optreedt als gevolg van de gaswinning uit het gasveld Nes. Deze cumulatie leidt tot een verwachte totale bodemdaling onder de kwelder van ca. 8 cm in de eindfase (2050). De bodemdaling van enkele millimeters per jaar is weinig in vergelijking met de waargenomen gemiddelde sedimentatie van 7 -14 mm/jaar die op de kwelders plaats kan vinden (Van Duin et al., 2016a). De omvang van de bodemdaling door de voorgenomen winning bij Ternaard onder de vastelandskwelders is dermate klein dat deze leidt niet tot een verandering in de trend van de hoogteontwikkeling van de kwelders. De trend in de hoogteontwikkeling wordt gedomineerd door de sedimentatie en deze doet de lokaal optredende bodemdaling meer dan te niet. De daadwerkelijke ontwikkeling van deze kwelderhoogte wordt bepaald door de snelheid van sedimentatie in verhouding tot de versnelde stijging van de zeespiegel. Bij versnelde zeespiegelstijging tot boven het meegroeivermogen van 6 mm/jaar voor het Pinkegat kan de zeespiegelstijging de sedimentatie op deze kwelders ‘inhalen’. De gaswinning is dan al beëindigd, omdat geen gebruiksruimte meer beschikbaar is. De bodemdaling door de gaswinning Ternaard heeft dus geen gevolgen voor de hoogteontwikkeling van de kwelders.

In het gebied ten zuiden van het eiland Ameland aan de oostpunt van de Hon, waar in de meest noordelijk gelegen bodemdalingsschotel uit winningsplan (NAM, 2019) de contour van 2 cm bodemdaling loopt, is op de hoge wadplaat op verschillende plekken zilte pionierbegroeiingen (habitattype H1310) aanwezig. De sedimentatie in dit gebied is voldoende groot om de lokale bodemdaling te niet te doen en een bodemhoogte toename van tenminste 1 decimeter te realiseren. De omvang van de extra toekomstige bodemdaling door

de gaswinning Ternaard is in deze omgeving iets meer dan 2 cm gedurende de gehele periode van winning. De omvang van de bodemdaling door de gaswinning Ternaard is dermate klein, dat deze geen gevolgen zal hebben voor de hoogte-ontwikkeling van dit gebied. De bodemdaling zal dan ook geen invloed op hebben op de mogelijke uitbreiding en ontwikkeling van de vegetatie ten zuiden van de kwelderrand van de Hon.

De kwelders bij Ameland-oost liggen buiten de bodemdalingsschotel die ontstaat door de voorgenomen winning bij Ternaard, zodat deze niet leidt tot een verandering in de hoogteontwikkeling van deze eilandkwelders.

8.2.5 Conclusie

De conclusies uit de voorgaande paragrafen over bodemdaling door de voorgenomen gaswinning Ternaard en de morfologie zijn hieronder op rij gezet:

- Wordt uitgevoerd binnen de beschikbare gebruiksruimte (zie Hoofdstuk 4) en leidt derhalve niet tot blijvende gevolgen voor de morfologie van de Waddenzee
- Leidt met een tijdelijke afname van de hoogte van de platen met maximaal 1,6 mm, niet tot meetbare of merkbare gevolgen voor de geulen en platen in de Waddenzee.
- Heeft geen gevolgen voor de kwelders.
- Heeft geen gevolgen voor de sedimentsamenstelling van de Waddenzee.

De beoordeling van deze gevolgen in termen van de Wet natuurbescherming vindt in de volgende paragraaf plaats.

8.3 Ecologische effectbepaling

8.3.1 Aanlegfase

Zoals aangegeven in hoofdstuk 5 Beoordelingskader vindt de beoordeling van de effecten van stikstofdepositie plaats via een individuele projectbeoordeling stikstofdepositie opdat het PAS niet langer gebruikt kan worden als grondslag voor vergunningverlening.

Zelfstandige beoordeling stikstofdepositie

De hoogte van de toename van stikstofdepositie is berekend met het rekenprogramma AERIUS Calculator, versie 2019.0. Hierbij is uitgegaan van het uitvoeren van een boring op de locatie, met een zuidelijk gelegen leidingtracé.

Voor de boringen wordt de boorinstallatie T700 ingezet of vergelijkbaar. De boorinstallatie wordt van elektrische energie voorzien door dieselgeneratoren. Om de emissie van stikstof zo veel als mogelijk te beperken is gekozen uitsluitend modern materieel (STAGE IV / Tier 4final) in te zetten.

De generatoren die tijdens de boring worden gebruikt hebben doordat een moderne nageschakelde techniek (scrubber) wordt toegepast een emissiefactor die lager is dan de standaard emissiefactor voor STAGE IV materieel. Uit metingen blijkt dat de NOx uitstoot bij een boring 0,22 gram per kWh opgewekte energie betreft. Ter vergelijking, materieel van de voorgaande Stage-klasse heeft een emissie van minimaal 3,3 gram NOx per kWh. Op deze wijze wordt de emissie van NOx sterk gereduceerd. In rapport Bijlage B zijn de uitgangspunten van de berekening verder uitgewerkt en toegelicht.

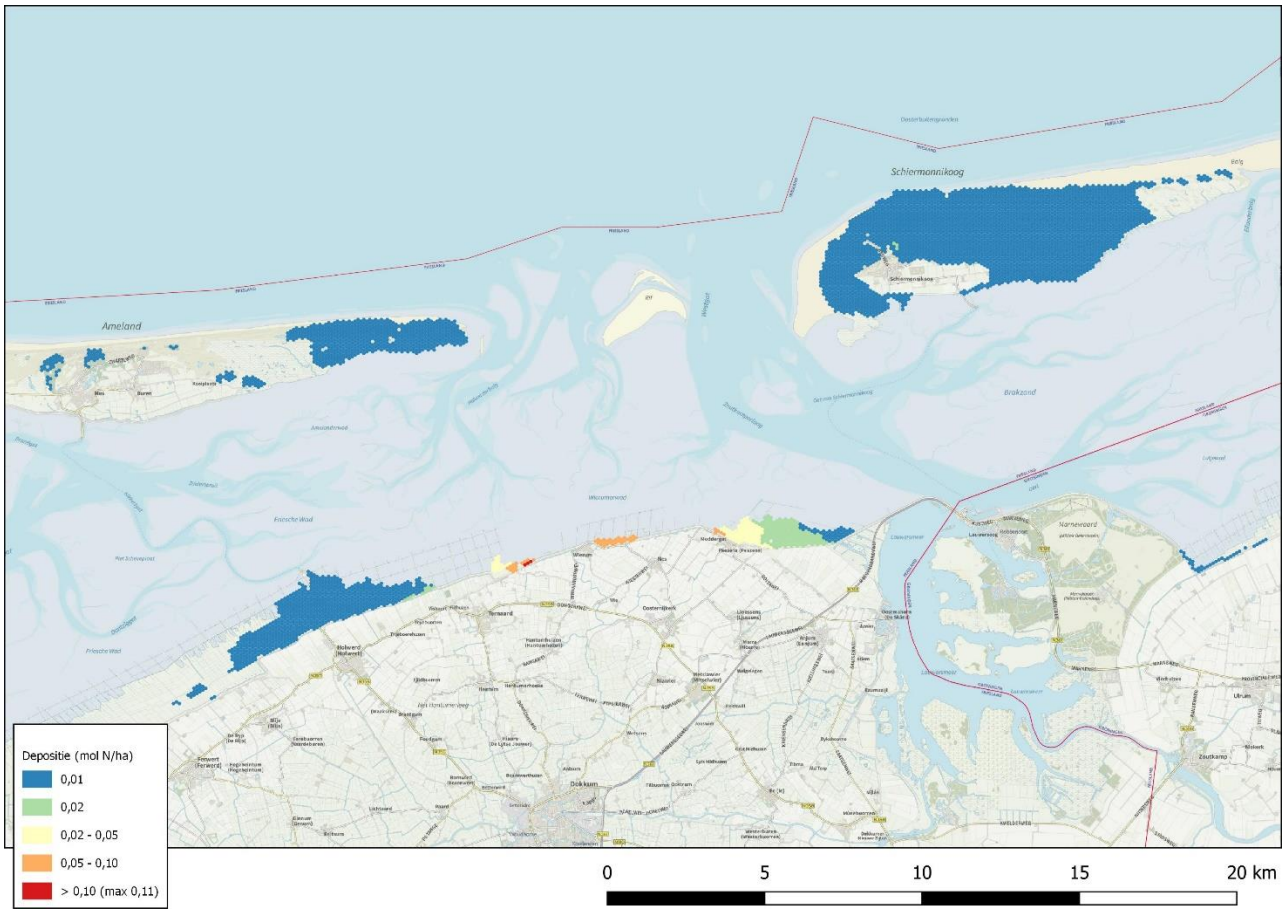
Uit deze berekening blijkt dat de eenmalige depositie ten gevolge van de werkzaamheden maximaal 0,11 mol N/ha bedraagt in het Natura 2000-gebied Waddenzee. Deze toename vindt echter plaats op een locatie waar de kritische depositiewaarde (KDW) van aanwezige habitattypen niet wordt overschreden. De KDW is de waarde van stikstofdepositie waaronder negatieve gevolgen voor het betreffende habitattype kunnen worden uitgesloten. Op locaties met een achtergrondwaarde van de stikstofdepositie die een (naderende)[17] overschrijding van de kritische depositiewaarde inhoudt, is de maximale toename van de stikstofdepositie 0,07 mol/ha/jaar op het habitattype H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks). Op alle andere habitattypen in de Waddenzee waarop sepositie plaatsvindt, is deze maximaal 0,01 mol N/ha. De depositie

[17] Hierbij is rekening gehouden met de “veiligheidsmarge” van 70 mol die ook in Aerius wordt toegepast.

op Duinen Schiermonnikoog is maximaal 0,02 mol N/ha (op slechts 3 hexagonen, voor het overige overal maximaal 0,01 mol N/ha), en op de gebieden Duinen Ameland en Noordzeekustzone is de depositie maximaal 0,01 mol N/ha. Wanneer een habitat al is overbelast, dat wil zeggen dat de achtergronddepositie hoger is dan de kritische depositiewaarde, zijn significante gevolgen door een extra stikstofdepositie niet op voorhand uit te sluiten. In deze situatie worden de gevolgen van de extra stikstofdepositie ecologisch beoordeeld.

Ruimtelijke verspreiding van toename stikstofdepositie.

De door AERIUS berekende toename van de stikstofdepositie vindt plaats in vier Natura 2000-gebieden, (Figuur 8-3). De toename van stikstofdepositie per habitattype is te vinden in het AERIUS Calculator rapport van de (voorlopige) depositieberekening met Calculator versie 2019.0, kenmerk RddZuaDcJpai (06 december 2019).



Figuur 8-3 Gebieden met een tijdelijke stikstofdepositie op habitattypen.

De stikstofdepositie is tijdelijk (treedt alleen op in de aanlegfase), en is zeer laag. De depositie is maximaal slechts 0,11 mol N/ha, maar is op de overbelaste delen van stikstofgevoelige habitats nog veel lager, namelijk maximaal 0,07 mol N/ha). In het volgende hoofdstuk wordt alle depositie ten gevolge van het project op overbelast habitat getoetst.

Effectketens doorwerking gevolgen van stikstofdepositie op de habitattypen en soorten in het Natura 2000-gebied Waddenzee

Instandhoudingsdoel: Habitattype/soort(groep)	Effect stikstofdepositie	Gevolg
Alle stikstofgevoelige kwalificerende habitats en leefgebieden van kwalificerende soorten.	Verzuring en vermesting	Toename verruiging en afname kwaliteit habitats en leefgebieden van soorten.

8.3.2 Winningsfase

Bodemdaling

De abiotische processen die optreden in de Waddenzee en de beïnvloeding daarvan door de bodemdaling zijn beschreven in paragraaf 8.2. Het grootste deel van de bodemdaling zal onder het kombergingsgebied van het Pinkegat plaatsvinden. De bodemdaling onder het kombergingsgebied van het Borndiep is zeer klein en wel zo klein dat de mogelijke gevolgen voor bijvoorbeeld het plaatareaal niet kunnen worden berekend, omdat deze veel kleiner is dan resolutie van 1 centimeter, waarmee de plaathoogte wordt bepaald (vaklodingen, Rijkswaterstaat). Vanwege de zeer beperkte omvang van de mogelijke gevolgen voor de hydromorfologie in het kombergingsgebied Borndiep, zal zeker geen sprake zijn van doorwerking op de natuurwaarden in dit gebied. De gevolgen van de bodemdaling door de gaswinning Ameland voor de kwelders bij Ameland, zoals gerapporteerd in Begeleidingscommissie Bodemdaling Ameland (2017), zullen zich niet voordoen bij de kweldergebieden die bodemdaling zullen ondervinden door de gaswinning Ternaard, omdat de bodemdaling door de gaswinning bij Ternaard niet tot de kwelders van Ameland reikt. Voor de twee vastelandskwelders waar de bodemdaling door de gaswinning Ternaard onder plaatsvindt, is in vergelijking met de bodemdaling door de gaswinning Ameland, de voorspelde omvang van de bodemdaling door de gaswinning Ternaard dermate beperkt (maximaal enkele centimeters, in plaats enkele decimeters), dat dergelijke gevolgen niet aan de orde zijn.

Om de effecten van de bodemdaling te bepalen en beoordelen, is informatie nodig over de relaties tussen het abiotisch functioneren van het systeem en de invloed daarvan op de instandhoudingsdoelen. Deze relaties worden weergegeven in zogenaamde effectketens (Tabel 8-1) met daarin de abiotische onderdelen, de vegetatie- of habitattypen en welke functies deze hebben voor habitatrichtlijnsoorten en vogelsoorten (al dan niet gegroepeerd bij een vergelijkbare levenswijze).

Tabel 8-1 Effectketens doorwerking gevolgen van bodemdaling op de habitattypen en soorten in het Natura 2000-gebied Waddenzee

Instandhoudingsdoel: Habitattype/soort(groep)	Effect Bodemdaling → Hydromorfologie	Gevolg
[H1110A] Permanent overstroomde zandbanken (Waddenzee)]	Verschuiving laagwaterlijn	Toename areaal overstroomde banken (ten koste van H1140A)
[H1140A] Slik- en zandplaten (Waddenzee)	Verschuiving laagwaterlijn	Afname areaal slikken en platen Toename overstromingsduur
[H1310A] Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal) [H1330A] Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	Verticaal effect: Vernatting kwelders & Horizontaal: Kliferosie	Regressie (verjonging) vegetatie ↓ Toename (tijdelijke) pionierzone Afname areaal hoge kwelder
Niet-broedvogels (grondeleenden)	Verschuiving laagwaterlijn	Afname areaal dat droogvalt ↓ Afname voedselbeschikbaarheid
Niet-broedvogels (kwelder foerageerders & grondeleenden)	Vernatting kwelders	Afname areaal hoge kwelders ↓ Afname oppervlak foerageergebied
Niet-broedvogels (viseters)	Verschuiving laagwaterlijn	Toename areaal permanent overstroomde zandbanken ↓ Toename areaal foerageergebied
Niet-broedvogels (benthoseters)	Verlaging permanent overstroomde zandbanken	Dieper duiken voor schelpdiereters ↓ Habitatverslechtering schelpdieren ↓

Instandhoudingsdoel: Habitattype/soort(groep)	Effect Bodemdaling → Hydromorfologie	Gevolg	
		Hoger energieverbruik ↓ Verlaagde overlevingskans	Afname biomassa ↓ Verlaagde overlevingskans
Niet-broedvogels (steltlopers)	Verschuiving laagwaterlijn	Afname areaal dat droogvalt ↓ Afname voedselbeschikbaarheid	

Uit paragraaf 8.2 blijkt dat de bodemdaling door de voorgenomen gaswinning Ternaard, met als harde randvoorwaarde dat de bodemdaling door alle gaswinning de beschikbare gebruiksruimte niet overschrijdt en de borging daarvan gedurende de winning door het toepassen van de HadK-systematiek:

- Niet leidt tot meetbare of merkbare gevolgen voor de geulen en platen in de Waddenzee.
- Geen gevolgen heeft voor de kwelders.
- Geen gevolgen heeft voor de sedimentsamenstelling van de Waddenzee.

Op grond van het bovenstaande wordt geconcludeerd dat als gevolg van de gaswinning Ternaard geen effecten zullen optreden op de kenmerkende morfologische elementen en processen van de Waddenzee. In Tabel 8-2 is aangegeven wat de gevolgen hiervan zijn voor de habitattypen en soorten die gevoelig zijn voor de effecten van bodemdaling, volgens de relaties die zijn weergegeven in Tabel 8-1.

Tabel 8-2 Beoordeling mogelijke effecten van bodemdaling op habitattypen en soorten

Instandhoudingsdoel: Habitattype/soort(groep)	Effect Bodemdaling → Hydromorfologie	Effect ecologie
[H1110A] Permanent overstroomde zandbanken (Waddenzee)	Geen verschuiving van de laagwaterlijn, areaal blijft gelijk. Geen gevolgen voor sedimentsamenstelling	Geen effect
[H1140A] Slik- en zandplaten (Waddenzee)	Geen verschuiving laagwaterlijn, areaal blijft gelijk. Geen gevolgen voor sedimentsamenstelling	Geen effect
[H1310A] Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal) [H1330A] Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	Geen gevolgen voor kwelders (vernatting, kliferosie)	Geen effect
Broedvogels (hogere kwelders)	Geen aantasting van kwelders. Geen toename van overstroming van kwelders	Geen effect
Niet-broedvogels (viseters)	Areaal blijft gelijk. Geen gevolgen voor voedselbeschikbaarheid	Geen effect
Niet-broedvogels (benthoseters)	Areaal blijft gelijk. Geen gevolgen voor sedimentsamenstelling en voedselbeschikbaarheid	Geen effect
Niet-broedvogels (grondeleenden)	Areaal blijft gelijk. Geen gevolgen voor sedimentsamenstelling en voedselbeschikbaarheid	Geen effect

Niet-broedvogels (steltlopers)	Geen wijziging in het systeem, areaal blijft gelijk (kwelder Ameland ligt buiten dalingsbereik)	Geen effect

Beoordeling
Uit de nadere effectbepalingen in de vorige paragrafen blijkt dat de bodemdaling door de voorgenomen gaswinning Ternaard niet leidt tot wijzigingen in het Waddenzeesysteem en dat geen sprake is van meetbare of merkbare gevolgen voor het areaal geulen, platen of kwelders en de sedimentsamenstelling. Negatieve effecten op de natuurlijke kenmerken van de Waddenzee treden niet op. Op zowel habitattypen, habitatrichtlijnsoorten, broedvogels en niet-broedvogels treden geen negatieve effecten op.

8.3.3 Extra volume zandsuppleties

Bij de beoordeling van de suppleties die nodig zijn als gevolg van de gaswinning Ternaard moet bedacht worden dat het om een relatief kleine toevoeging (minder dan 10%) gaat ten opzichte van de tot nog toe uitgevoerde suppleties ten behoeve van kustlijnzorg. De omvang van de zandsuppleties bedraagt ten hoogste 120 x 10^3 m^3/per jaar in het begin van de beschouwde periode, met een totale omvang van 1,76 x 10^6 m^3 tot 2050 (zie paragraaf 6.2.7). Het gemiddelde jaarlijkse suppletievolume bedroeg 1,49 x 10^6 m^3 in de periode 2007-2016 (paragraaf 7.2.6). Vanwege de dynamiek van de kust van Ameland is het aannemelijk dat het suppletievolume voor de kustlijnzorg in de toekomst tenminste zo groot zal zijn als de afgelopen jaren. Bij een versneld stijgende zeespiegelstijging en wanneer uitvoering wordt gegeven aan het beleid om het zandvolume van het kustfundament de zeespiegel te laten volgen, zal het volume aan zandsuppleties toenemen (zie paragraaf 7.2.6).

De effecten van de winning van het suppletiezand zijn in detail beschreven in het MER Winning suppletiezand Noordzee 2018 t/m 2027 (Van Duin et al., 2017) en de bijbehorende “Nadere verdieping effecten Natura 2000” (Kleijberg et al., 2017), waarin is vastgesteld dat significante effecten op beschermde Natura-2000 waarden als gevolg van zandwinning worden uitgesloten. Het MER en de “Nadere verdieping” worden hieronder niet herhaald, wel worden hier de effecten van de zandsuppleties beschreven.

Waterbeweging en morfologie
De stroomsnelheid kan veranderen wanneer grote hoeveelheden sediment in het water worden gebracht (Bray, 2008). Dit effect is op en rondom een suppletielocaties het grootst en kan daar van invloed zijn op het lokale bodemleven. De effecten zijn ten opzichte van het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone echter lokaal en kleinschalig. Ook kent de plaats waar de suppletie wordt uitgevoerd een grote, natuurlijke dynamiek. De suppleties zullen voor dit aspect dan ook zeker geen significante effecten met zich meebrengen.

In onder andere Rijkswaterstaat (2016c) en Koolstra (2017 en 2018) zijn de effecten op morfologie en het bodemleven beschreven en beoordeeld. Door suppleties wordt een deel van het habitattype H1110B Permanent overstroomde banken bedekt, maar er is geen sprake van oppervlakteverlies. Kwantitatieve effecten worden hierdoor uitgesloten. Kwalitatief is lokaal wel sprake van een achteruitgang, dat voor de reguliere suppleties betekent dat tot maximaal circa 1,7% van het totaal oppervlak van het habitattype zich in de herstelfase bevindt. De gebieden waar de suppleties uitgevoerd worden zijn de hoog-dynamische delen van de kust, waar ook onder natuurlijke omstandigheden bedekking en rekolonisatie plaatsvindt. Delen van de vooroever zijn geschikt voor de vestiging en aanwezigheid van schelpdierbanken, waaronder Spisula-banken, waarop wordt gefoerageerd door zwarte-zee-eenden.

Waterkwaliteit
Verandering van de waterkwaliteit kan deels door vertroebeling met sediment, nutriënten en verontreiniging ontstaan (Bray, 2008). Dit speelt echter op zeer kleine schaal en heeft derhalve geen invloed (Rijkswaterstaat, 2016c, Koolstra, 2017 en 2018).

(Natuurlijk) sediment-transport
Door de suppletie van zand wordt een nieuwe voorraad zand aangebracht, waarin doorgaans nog een fractie (zeer) fijn zand (en slib) aanwezig is. Fijn zand en slib is mobieler dan grover zand, waardoor dit

gemakkelijker kan worden meegevoerd door stromingen. Door relatief hoge dynamiek aan de kust (branding en invloed van wind) blijft de fijnere fractie voor een groot deel in suspensie en wordt dit meegevoerd langs de kust. Dit sedimenttransport door de zee vindt altijd plaats. Een suppletie zal alleen tijdelijk en plaatselijk de hoeveelheid fijn zand en slib verhogen. Door de hoge dynamiek is het water op de vooroever al relatief troebel. Suppleties hebben in relatie tot de natuurlijke situatie geen invloed op de mate waarin kustlangs in noordwaartse richting sedimenttransport plaatsvindt, immers, de suppleties worden uitgevoerd om reeds weggespoeld sediment weer aan te vullen. Het sedimenttransport zal geen gevolgen hebben voor de natuurlijke kenmerken van de Natura 2000-gebieden (Rijkswaterstaat, 2016c en Koolstra, 2018).

Geluid- en trillingsniveaus, beweging en lichtintensiteit

De noodzakelijke suppleties betreffen vooroeversuppleties, waardoor effecten op soorten van strand en zandbanken op voorhand uitgesloten kunnen worden. Voor zeezoogdieren wordt in Rijkswaterstaat (2016c) en Koolstra (2018) gesteld dat het impactgebied dusdanig klein is, dat de soorten te allen tijde kunnen uitwijken. Voor rustende of foeragerende vogels wordt een vergelijkbare redenatie gegeven, waarbij ook genoemd wordt dat de suppleties vooral op locaties uitgevoerd worden met een hoge dynamiek. Deze plekken zijn van natura al minder voedselrijk en dus minder relevant voor bijvoorbeeld zwarte zee-eend en topper. Het is echter niet geheel uit te sluiten dat verstoring optreedt op zee-eenden, door beweging en geluid.

Vermesting door stikstofdepositie

De exacte uitvoeringsperiode voor het extra volume zandsuppletie en het materieel waarmee de uitvoering zal plaatsvinden zijn nog onbekend. Op dit moment is het daardoor niet mogelijk een inhoudelijke beoordeling van uit te voeren van de vermesting en verzuring door het extra volume zandsuppletie. Dat betekent dat voorafgaand aan de betreffende suppleties een aparte effectbeoordeling uitgevoerd moet worden.

8.3.4 Cumulatie

Bij cumulatie worden activiteiten en projecten beschouwd die via dezelfde effectketen aangrijpen, dan wel op dezelfde criteria aangrijpen. Activiteiten en projecten die cumuleren op het gebied van bodemdaling worden beschouwd. Omdat de bodemdaling is gerelateerd aan gebruiksruimte, plaatareaal en kwelders zijn ook projecten beschouwd die hier mogelijk op aangrijpen, waarbij de kombergingsgebieden Pinkegat en Borndiep worden beschouwd. In de onderstaande tabel zijn de activiteiten en projecten opgenomen waarbij mogelijk sprake is van cumulatie. Onder deze tabel wordt per tabel toegelicht in hoeverre sprake is van cumulatie en wat hiervan de effecten zijn. Cumulatie van stikstofdepositie is buiten beschouwing gelaten omdat het een tijdelijke depositie betreft die op zichzelf staand kan worden beoordeeld. Cumulatie met andere (permanente) bronnen van depositie is om die reden niet aan de orde.

Tabel 8-3 Activiteiten en projecten waarbij mogelijk sprake is van cumulatie

	Gebruiksruimte	Plaatareaal	Droogvalduur	Kwelders	Zandsuppleties	Sediment-samenstelling
Gaswinning Ameland	●	●	●	●		●
Gaswinning MLV	●	●	●		●	●
Baggeren en verspreiden vaarweg Holwerd-Ameland						●
Aanleg kortsluitgeul vaarweg Holwerd-Ameland						●
Beheer en gebruik kwelders				●		
Bodemberoerende visserij						●

	Gebruiksruimte	Plaatareaal	Droogvalduur	Kwelders	Zandsuppleties	Sediment-samenstelling
Dijkversterking Koehool-Lauwersmeerdijk				●		
Zandsuppleties kustlijnzorg					●	

Gebruiksruimte

De gaswinning Ameland vindt plaats sinds de tweede helft van de jaren ’80. Een deel van de bodemdaling door de gaswinning Ameland vindt plaats onder het kombergingsgebied van het Pinkegat, net als de boogde gaswinning Ternaard. Ook voor de gaswinning MLV geldt dat een deel van de bodemdaling plaatsvindt onder het kombergingsgebied van het Pinkegat. Cumulatie treedt op doordat de bodemdaling van de gaswinningen Ameland, MLV en Ternaard de gebruiksruimte van het Pinkegat belasten, zoals zichtbaar in de grafiek met de gebruiksruimte in Figuur 4-1.Bij het kombergingsgebied van het Borndiep is geen sprake van cumulatie, omdat daar geen bodemdaling door andere gaswinning plaatsvindt.

Door de beschikbare gebruiksruimte van elk kombergingsgebied als harde grens te hanteren voor de bodemdaling van alle gaswinningen onder het betreffende kombergingsgebied, worden de effecten van gaswinning altijd in cumulatie beschouwd. Omdat de gecombineerde gaswinningen vanwege het toepassen van de HadK-systematiek voorafgaand en tijdens de winning door het plannen en indien nodig aanpassen van de gasproductie van de verschillende velden, binnen de gebruiksruimte blijft, blijven de morfologische kenmerken en processen in de Waddenzee behouden. Er is dan ook geen sprake van het optreden van significante effecten op de instandhoudingsdoelstellingen van het Natura2000-gebied Waddenzee als gevolg van de structurele veranderingen in de sedimenthuishouding en de morfologie, door de cumulatie van de bodemdaling door verschillende gaswinningen.

Plaatareaal en droogvalduur

De gevolgen voor het plaatareaal en de droogvalpercentages blijven eveneens beperkt doordat binnen de gebruiksruimte wordt gewerkt. Voor de bodemdaling door de gaswinningen Ameland en Waddenzee is een hoogtedaling berekend van minder dan 0,6-1,1 cm gemiddeld over het Pinkegat (Ministerie van Economische Zaken, 2006). Deze hoogtedaling cumuleert met hoogtedaling door de gaswinning Ternaard van 1,6 mm. Ook de gecumuleerde waarden van 0,8-1,3 cm gemiddeld over het Pinkegat rechtvaardigen de conclusie dat geen sprake zal zijn van een meetbare of merkbare afname van het plaatareaal door de bodemdaling als gevolg van alle gaswinningen in het kombergingsgebied Pinkegat. Hetzelfde geldt voor de droogvalduur van de platen, deze zal niet merkbaar of meetbaar veranderen als gevolg van de bodemdaling door de verschillende gaswinningen in het kombergingsgebied Pinkegat. Significante effecten op de instandhoudingsdoelstellingen van het Natura2000-gebied Waddenzee zullen daarom niet optreden als gevolg van veranderingen in het plaatareaal en de droogvalduur door de bodemdaling van de gecumuleerde gaswinningen.

Kwelders

De eilandkwelders bij Ameland-oost vallen buiten de bodemdalingscontour door de gaswinning Ternaard en cumulatie is daar derhalve niet aan de orde. Bij de pioniervegetatie ten zuiden van de oostpunt van de Hon is geen sprake van beheer en treedt derhalve geen cumulatie op door het beheer. Bij dit gebied is wel sprake van cumulatie van de bodemdaling door de gaswinning Ameland met de bodemdaling door de gaswinning Ternaard. De totale bodemdaling zal door de gaswinning Ternaard aan het einde van winning net iets meer dan 2 cm toenemen ten opzichte van de bodemdaling door de gaswinning Ameland. In de huidige situatie, is, ondanks de bodemdaling door de gaswinning Ameland, sprake van een hoogte toename van de wadplaat. De hoogtetoename van deze wadplaat is dermate groot geweest dat de vestiging van pioniervegetatie mogelijk is geworden. In de toekomst zal de gecumuleerde bodemdaling in dit gebied niet groter worden dan de bodemdaling die reeds is opgetreden. De sedimentatie in dit gebied is ruimschoots

voldoende om de bodemdaling bij te houden, zodat hier geen gevolgen zullen optreden van de gecumuleerde bodemdaling.

Veranderingen in gebruik en beheer van kwelders kunnen leiden tot grote veranderingen in de vegetatie, de hoogteligging en de sedimentatiesnelheid. Voorbeelden zijn het wel of juist niet laten begrazen van de kwelder en bij het wel begrazen veranderingen in de begrazingsdruk en de inzet van verschillende soorten grazers. Andere voorbeelden zijn het doorstroombaar maken van zomerkades, waardoor zoutwater de delen achter de zomerkade frequenter bereikt. Daar waar bodemdaling door gaswinning onder de kwelder optreedt samen met beheer kan sprake zijn van meetbare gevolgen voor de hoogte- en de vegetatie op de kwelders, zoals is waargenomen op de Hon (de eilandkwelder op Ameland-Oost). Vanwege de zeer beperkte omvang van de bodemdaling door de gaswinning Ternaard is het echter uitgesloten deze gevolgen heeft voor de ontwikkeling van de vastelandskwelders. Derhalve is cumulatie met gebruik en beheer niet aan de orde.

Sedimentsamenstelling

Verschillende activiteiten of voorgenomen projecten hebben in potentie gevolgen voor de sedimentsamenstelling. Regulier beheer van de vaarweg Holwerd-Ameland omvat het baggeren van de vaarweg nabij de veerdam en op enkele drempels en het verspreiden van de opgebaggerde specie op twee locaties, dan wel het ‘op stroom zetten’ van de opgebaggerde specie. Jaarlijks wordt hiervoor meer dan 1 x 10^6 m^3 baggerspecie verplaatst in het kombergingsgebied Borndiep. Het baggeren en verspreiden ten bate van het onderhoud van deze en de andere vaargeulen in de Waddenzee door Rijkswaterstaat is getoetst aan de Natuurbeschermingswet en opgenomen in het Natura2000-Beheerplan Waddenzee. Dit betekent dat geen significant negatieve gevolgen optreden door eventuele veranderingen in de bodemsamenstelling als gevolg van het reguliere vaarwegbeheer. Onderzoek aan de Vaarweg Holwerd-Ameland heeft laten zien dat het aanleggen van een kortsluitgeul waarschijnlijk een positieve bijdrage zal leveren aan de bereikbaarheid van Ameland. Deze geulverruiming is in 2019 gerealiseerd. Bodemberoerende visserij kan in potentie ook leiden tot veranderingen in de bodemsamenstelling.

De bodemdaling door gaswinning Ternaard, die in cumulatie met de andere gaswinning wordt uitgevoerd binnen de grens van de beschikbare gebruiksruimte, leidt niet tot veranderingen in de morfologie en de sedimentatie- en erosieprocessen in de Waddenzee. Omdat de processen niet veranderen, zal ook de sedimentsamenstelling niet veranderen als gevolg van de bodemdaling door gaswinning. Omdat de sedimentsamenstelling niet verandert door de gaswinning, zal ook geen sprake zijn van cumulatie met andere activiteiten of projecten die in potentie gevolgen hebben voor de bodemsamenstelling.

Zandsuppleties

In de meest recente locatie-specifieke Passende beoordeling voor een reguliere zandsuppletie in het kader van kustlijnzorg bij Vlieland (Arcadis, 2016), is onderbouwd dat er geen cumulatieve effecten van gezamenlijke suppleties in het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone zijn. Cumulatie van de effecten van verstoring van de strandsuppleties bij Vlieland-Oost en Vlieland-Havenstrand met de andere suppleties in het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone is - zelfs al zouden de suppleties tegelijk uitgevoerd worden (wat mogelijk het geval is) - door het ontbreken van hoge dichtheden gevoelige soorten en de lokale aard en tijdelijkheid van de effecten niet aan de orde (Arcadis, 2016).

De omvang en de additionele effecten van het extra volume zandsuppletie bij Ameland zijn dusdanig beperkt, dat geen sprake zal zijn van cumulatieve effecten met andere zandsuppleties, met inbegrip van de zandsuppletie voor de kustlijnzorg op Ameland zelf. Ook bij een toename van het volume van de zandsuppleties van de kustlijnzorg, overeenkomstig de lineaire relatie tussen de snelheid van zeespiegelstijging en het suppletievolume en tot het bereiken van de natuurgrens van 6 mm/jaar door de snelheid van zeespiegelstijging, zal geen sprake zijn van cumulatie door vanwege de beperkte omvang van het extra volume aan zandsuppleties. Bij de toekomstige beoordeling van de ecologische effecten van het extra zandvolume bij specifieke zandsuppleties zal ook de cumulatie worden beschouwd.

Conclusie cumulatie

Op grond van het voorgaande wordt geconcludeerd dat cumulatieve effecten van de gaswinning bij Ternaard, in combinatie met andere plannen en projecten op het Natura 2000-gebied Waddenzee op voorhand uitgesloten zijn.

8.4 Conclusie effectbepaling

In Tabel 8-4 is samengevat wat de conclusies zijn in Hoofdstuk 8. Uit de effectbepaling blijkt dat, met uitzondering van verzuring en vermesting (stikstofdepositie) en de effecten door zandsuppleties, significante negatieve effecten op de instandhoudingsdoelstellingen uitgesloten kunnen worden.

Tabel 8-4 Conclusie effectbepaling (geel: mogelijk significant effect, Passende beoordeling noodzakelijk; groen: zeker geen significant effect, geen Passende beoordeling)

Mogelijk effect		Effectbepaling in	Vogelrichtlijn	Vogelrichtlijn niet-broedvogels	Habitattypen	Habitatrichtlijn soorten
Aanlegfase						
Oppervlakte verlies	H6		●	●	●	●
Verstoring	H6		●	●		
Verandering populatiedynamiek	H6		●	●		
Verzuring en vermesting	H8				●	●
Verdroging en vernatting	H6		●	●	●	●
Winning						
Bodemdaling	H8		●	●	●	●
Zandsuppleties	H8		●	●	●	●

Uit de bovenstaande tabel volgt dat in de passende beoordeling in het volgende hoofdstuk alleen nog ingegaan wordt op de volgende mogelijke significante effecten:

- Verzuring en vermesting door stikstofdepositie: voor de Natura 2000-gebieden Waddenzee, Noordzeekustzone, Duinen Ameland en Duinen Schiermonnikoog zijn significante effecten door stikstofdepositie niet op voorhand uit te sluiten.
- Effecten door zandsuppleties: Voor de Natura 2000- gebieden, Noordzeekustzone, Duinen Ameland en Duinen Schiermonnikoog zijn significante effecten door verstoring, morfologische veranderingen en stikstofdepositie door de uitvoering van de kustsuppleties niet op voorhand uit te sluiten.

Andere effecten dan de hierboven genoemde zijn in het voorgaande van deze beoordeling reeds uitgesloten en worden in het volgende hoofdstuk om die reden niet meer behandeld.

In onderstaande tabellen is per instandhoudingsdoel aangegeven of deze op basis van hetgeen in het voorgaande is geconcludeerd al dan niet in de passende beoordeling in het volgende hoofdstuk is beschreven.

Tabel 8-5 Selectie van instandhoudingsdoelen waarop effecten op grond van de effectbepaling kunnen worden uitgesloten. Per aspect is met een X aangegeven als een effect op basis van de effectbepaling kan worden uitgesloten.

Met een X[1)] is aangeduid dat de betreffende soort mogelijk wel gevoelig is voor verandering van het leefgebied door stikstofdepositie, maar dat dit effect getoetst wordt op het niveau van het leefgebied en niet voor de individuele soort. Instandhoudingsdoelen waarvoor op basis van de beschrijving in hoofdstuk 6 en 7 al was geconcludeerd dat effecten zijn uitgesloten, zijn niet meer in deze tabel opgenomen. Effecten door bodemdaling treden nergens op, en worden daarom in deze tabel in het geheel niet meer genoemd.

Waddenzee	**Stikstofdepositie in de aanlegfase**	**Extra volume zandsuppleties**
Habitattypen		
H1310A Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)		X
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)		X
H1320 Slijkgrasvelden		X
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)		X
H1330B Schorren en zilte graslanden (binnendijks)		X
H2110 Embryonale duinen		X
H2120 Witte duinen		X
H2130A Grijze duinen (kalkrijk)		X
H2130B Grijze duinen (kalkarm)		X
H2160 Duindoornstruwelen		X
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)		X

Noordzeekustzone	**Stikstofdepositie in de aanlegfase**	**Extra volume zandsuppleties**
Habitattypen		
H1110B Permanent overstroomde zandbanken (Noordzee-kustzone)	X	
H1140B Slik- en zandplaten (Noordzee-kustzone)	X	
H1310A Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)		
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)		
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)		
H2110 Embryonale duinen		

H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	
Habitatrichtlijnsoorten	
H1095 Zeeprik	X
H1099 Rivierprik	X
H1103 Fint	X
H1351 Bruinvis	X
H1364 Grijze zeehond	X
H1365 Gewone zeehond	X
H1903 Groenknolorchis	X[1)]
Broedvogels (alle soorten, zie Tabel 7-3)	X[1]
Niet-broedvogels (alle soorten, zie Tabel 7-3)	X

Duinen Ameland	**Stikstofdepositie in de aanlegfase**	**Extra volume zandsuppleties**
Habitattypen **(alle habitats, zie Tabel 7-3)**		
Habitatrichtlijnsoorten **(alle soorten, zie Tabel 7-3)**	X	
Broedvogels **(alle soorten, zie Tabel 7-3)**	X[1)]	

Duinen Schiermonnikoog	**Stikstofdepositie in de aanlegfase**	**Extra volume zandsuppleties**
Habitattypen **(alle habitats, zie Tabel 7-3)**		X
Habitatrichtlijnsoorten **(alle soorten, zie Tabel 7-3)**	X[1)]	X
Broedvogels **(alle soorten, zie Tabel 7-3)**	X[1)]	X[1)]

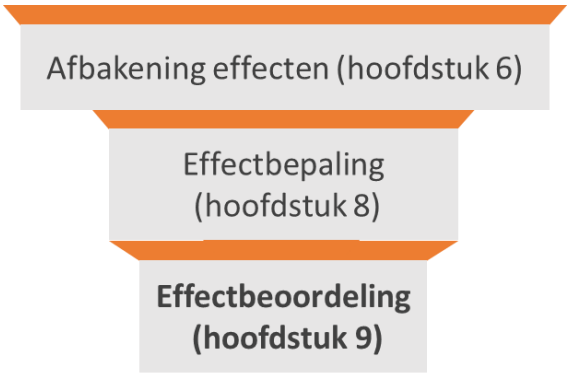
9 EFFECTBEOORDELING

9.1 Inleiding

Uit het vorige hoofdstuk volgt dat alleen mogelijke significant negatieve effecten kunnen optreden op de natuurlijke kenmerken van de Natura 2000-gebieden Waddenzee, Noordzeekustzone, Duinen Ameland en Duinen Schiermonnikoog als gevolg van stikstofdepositie tijdens de aanlegwerkzaamheden en de boring, en door effecten ten gevolge van zandsuppleties. In deze paragraaf wordt hiervan bepaald wat de effecten zijn en of sprake is van significantie in de betekenis van de Wet natuurbescherming. Daarbij wordt par aspect afzonderlijk ingegaan op de verschillende Natura 2000-gebieden. Onderstaande tabel geeft per Natura 2000-gebied aan op welke effecten wordt getoetst. Na de beoordeling per effect wordt in paragraaf 9.4 een samenvattende conclusie gegeven.

Natura 2000-gebied	Effecten stikstofdepositie aanlegfase (paragaaf 9.2)	Effecten zandsuppleties winningsfase (paragraaf 9.3)
Waddenzee	X	
Noordzeekustzone	X	X
Duinen Ameland	X	X
Duinen Schiermonnikoog	X	

Onderstaand schema laat de relatie van dit hoofdstuk met de andere hoofdstukken zien.



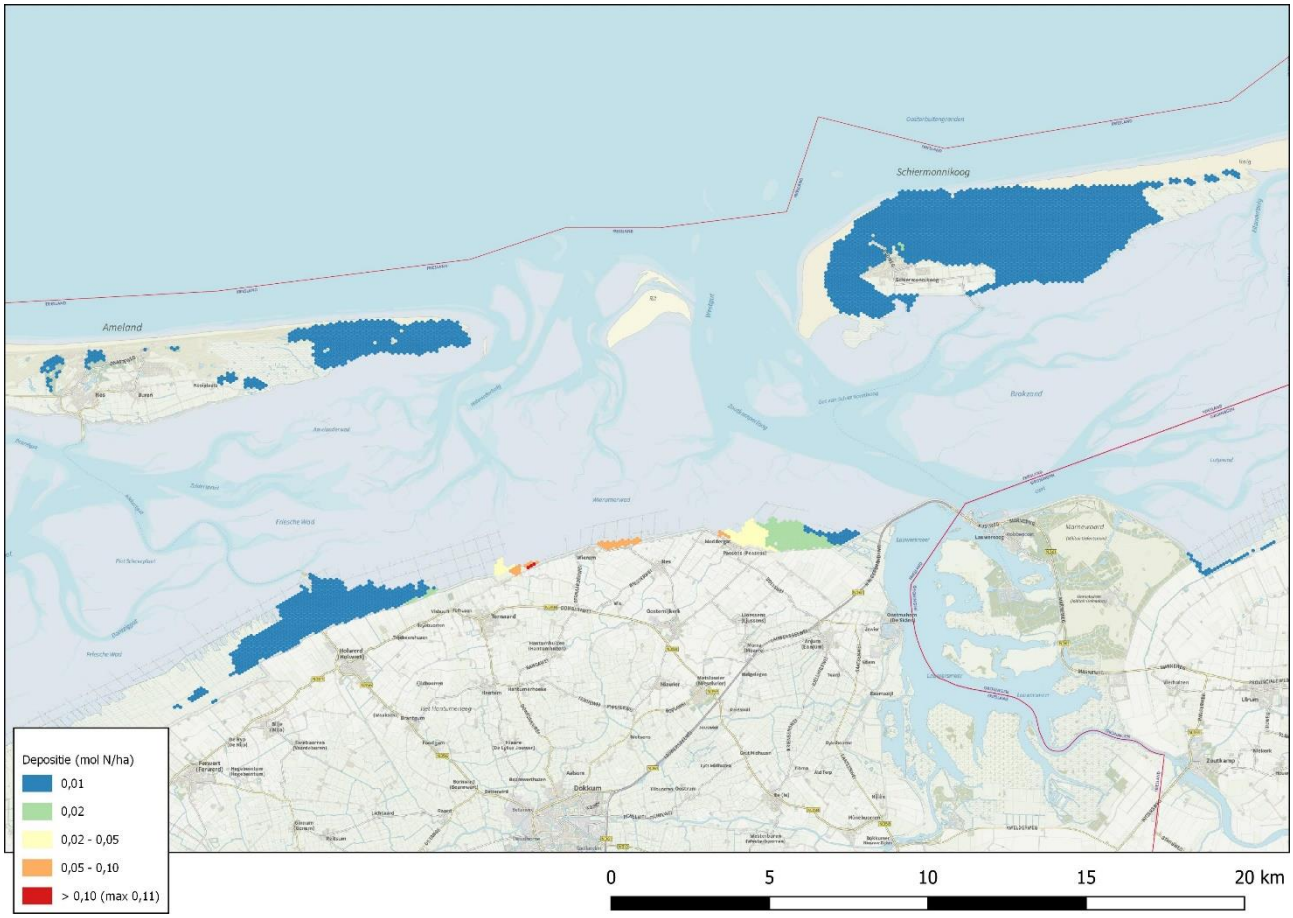
9.2 Passende beoordeling effecten stikstofdepositie

Nota Bene: In deze passende beoordeling is alleen de omvang van de stikstofdepositie in detail beschreven. De feitelijke beoordeling is nog niet uitgevoerd en zal op een later moment, volgens de lijnen die zijn uitgezet in de kamerbrieven[18] van 7 februari en 24 april, worden uitgevoerd. Hiervoor is gekozen om de beoordeling zo veel mogelijk te kunnen laten aansluiten bij de actualiteit op het moment van vergunningaanvraag.

9.2.1 Effecten

De effecten door stikstofdepositie zijn beschreven in paragraaf 8.3.1. Uit die beschrijving volgt dat de effecten door stikstofdepositie als gevolg van de aanleg tijdelijk en zeer klein van omvang zijn. Onderstaande afbeelding toont de depositie die tijdens de inrichting van de locatie, de boring en de aanleg van de transportleiding op zullen treden.

[18] Brief 7 februari: Voortgang stikstofproblematiek: maatregelen landbouw en verdere impuls gebiedsgerichte aanpak (DGA-DAD / 20032998); Brief 24 april: Voortgang stikstofproblematiek: structurele aanpak (BPZ / 20120075)



Figuur 9-1 Gebieden met een tijdelijke stikstofdepositie op habitattypen.

9.2.2 Mitigatie

De emissie van stikstofdepositie wordt sterk beperkt door de inzet van modern materieel bij de aanlegwerkzaamheden. Ook de generatoren die worden ingezet bij de boring voldoen aan de emissie-eisen STAGE IV. Op deze wijze vindt een reductie van de stikstofemissie plaats van ruim 80% dat opzichte van een reguliere werkwijze waarbij materieel gebruikt wordt dat voldoet aan de emissie-eisen van STAGE IIIB.

9.2.3 Natura 2000-gebied Waddenzee

De emissie van stikstofverbindingen tijdens de aanlegfase van de gaswinning Ternaard leidt tot een zeer geringe eenmalige depositie van stikstof. Er is sprake van stikstofdepositie op tien overbelaste habitats van het Natura 2000-gebied Waddenzee. Het AERIUS Calculator rapport van de berekening is te vinden in (Bijlage B), de maximale depositie per habitattype is in onderstaande tabel beschreven. Alle deposities van meer dan 0,01 mol treden op aan de vastelandskust van de Waddenzee. De deposities op de delen van de Waddeneilanden die tot het Natura 2000-gebied Waddenzee behoren zijn nergens hoger dan 0,01 mol N/ha.

Tabel 6 Stikstofdepositie op het Natura 2000-gebied Waddenzee, maximale depositie in mol N/ha op overbelast habitat

Code	Habitat	Depositie
H2110	Embryonale duinen	0,01
H2120	Witte duinen	0,01
H2130A	Grijze duinen (kalkrijk)	0,01
H2160	Duindoornstruwelen	0,01

H2170	Kruipwilgstruwelen	0,01
H2190B	Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	0,01
H1310A	Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)	0,01
H3110B	Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	0,01
H1320	Slijkgrasvelden	0,01
H1330A	Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	0,07

H1330A Schorren en zilte graslanden

Het habitattype H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks) bestaat uit een groot aantal vegetatietypen, die voorkomen bij verschillende condities t.a.v. bodem, zoutgehalte, overstromingsfrequentie, voedselrijkdom en beheer. De voedselrijkdom van het habitattype varieert van licht voedselrijk tot uiterst voedselrijk. De gevoeligheid voor stikstofdepositie wordt als minder/niet gevoelig gekwalificeerd (Ministerie van LNV, 2009). De depositie op dit habitattype bedraagt maximaal 0,11 mol N/ha. Er is sprake van depositie op twee hexagonen waarvoor de kritische depositiewaarde door de achtergronddepositie (naderend) wordt overschreden. De depositie op deze hexagonen bedraagt respectievelijk 0,07 en 0,04 mol N/ha/. Wanneer in Aerius wordt ingezoomd, is zichtbaar dat dit hexagoon grotendeels buiten het Natura 2000-gebied ligt en voor een groot deel de dijk betreft. De informatiebutton in de Aerius calculator geeft aan dat het aandeel van het habitat 1330 binnen deze beide hexagonen 0,0 ha betreft. Een oppervlakteberekening in GIS laat zien dat in het ene hexagon 400m^2 H1330A is gekarteerd en in het andere hexagon 20 m^2. Het betreft dus een zeer klein areaal waar zich in potentie een verslechtering zou kunnen voordoen. Onderstaande afbeelding toont de ligging van beide haxagonen nabij Moddergat.

Figuur 9-2 Ligging van de hexagonen waarbinnen overbelast H1330A voorkomt. De hexagonen zijn met een rode cirkel aangegeven, de ligging van H1330 is weergegeven met een bruine tint.

De vegetatie van de kwelders langs de Friese Waddenkust is in 2014 in kaart gebracht door middel van luchtfoto-interpretaties en uitvoering van vegetatie-opnames. Uit deze vegetatieopnames blijkt dat de vegetatie in het Natura 2000-gebied binnen het overbelaste deel bestaat uit grasland met gewoon kweldergras behorend tot de vegetatiegemeenschap Puccinellietum maritimae. Deze graslanden komen

voor op klei of zand met een dunne sliblaag op bodems die regelmatig (dagelijks) overstromen. Het gras is door zijn zoete smaak en hoge eiwitgehalte zeer geliefd bij het vee. Onder invloed van beweiding kan dominantie van Gewoon kweldergras optreden. Vaak is de vegetatie zeer kort als gevolg van begrazing door vee. In het vroege voorjaar vormt het gewoon kweldergras stapelvoedsel voor rotganzen. Dit vegetatietype is als gevolg van de voedselrijke (klei)bodem, de regelmatige overspoeling met (voedselrijk) zeewater, opslibbing en bemesting door vee en ganzen te kwalificeren als eutroof.

Overige habitattypen en leefgebied van soorten in de Waddenzee

De depositie op de (overbelaste delen van) de overige habitattypen in de Waddenzee is maximaal eenmalig 0,01 mol N/ha. Een depositie van 0,01 mol komt overeen met 0,14 gram. Ter vergelijking, om de omvang van deze depositie te duiden en in perspectief te plaatsen, één hondendrol bevat 0,7 gram stikstof en de dagelijkse mestproductie van één gans bevat 1,5 gram stikstof.

9.2.4 Natura 2000-gebied Noordzeekustzone

De emissie van stikstofverbindingen tijdens de aanlegfase van de gaswinning Ternaard leidt tot een zeer geringe eenmalige depositie van stikstof. Er is sprake van stikstofdepositie op vijf overbelaste habitats van het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone. Het AERIUS Calculator rapport van de berekening is te vinden in (Bijlage B), de maximale depositie per habitattype is in onderstaande tabel beschreven.

Tabel 7 Stikstofdepositie op het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone, maximale depositie in mol N/ha op overbelast habitat

Code	Habitattype	Depositie
H3130A	Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)	0,01
H1310B	Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	0,01
H1330A	Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	0,01
H2110	Embryonale duinen	0,01
H2190B	Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	0,01

De depositie op de Noordzeekustzone is eenmalig en in absolute en relatieve zin zeer laag, namelijk maximaal 0,01 mol N/ha. Een depositie van 0,01 mol komt overeen met 0,14 gram.

9.2.5 Natura 2000-gebied Duinen Ameland

De emissie van stikstofverbindingen tijdens de aanlegfase van de gaswinning Ternaard leidt tot een zeer geringe eenmalige depositie van stikstof op het Natura 2000-gebied Duinen Ameland. Er is sprake van stikstofdepositie op achttien overbelaste habitats het Natura 2000-gebied. Het AERIUS Calculator rapport van de berekening is te vinden in (Bijlage B), de maximale depositie per habitattype is in onderstaande tabel beschreven.

Tabel 8 Stikstofdepositie op het Natura 2000-gebied Duinen Ameland, maximale depositie in mol N/ha op overbelast habitat

Code	Habitattype	Depositie
H1330A	Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	0,01
H2120	Witte duinen	0,01
H2130A	Grijze duinen (kalkrijk)	0,01

Code	Habitattype	Depositie
H2130B	Grijze duinen (kalkarm)	0,01
H2130C	Grijze duinen (heischraal)	0,01
H2140A	Duinheiden met kraaihei (vochtig)	0,01
H2140B	Duinheiden met kraaihei (droog)	0,01
H2150	Duinheiden met struikhei	0,01
H2160	Duindoornstruwelen	0,01
H2170	Kruipwilgstruwelen	0,01
H2180A	Duinbossen (droog)	0,01
H2180B	Duinbossen (vochtig)	0,01
H2180C	Duinbossen (binnenduinrand)	0,01
H2190A	Vochtige duinvalleien (open water)	0,01
H2190B	Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	0,01
H2190C	Vochtige duinvalleien (ontkalkt)	0,01
H2190D	Vochtige duinvalleien (hoge moerasplanten)	0,01
H6230	Heischrale graslanden	0,01

De depositie op Ameland is eenmalig en in absolute en relatieve zin zeer laag, namelijk maximaal 0,01 mol N/ha. Een depositie van 0,01 mol komt overeen met 0,14 gram.

9.2.6 Natura 2000-gebied Duinen Schiermonnikoog

De emissie van stikstofverbindingen tijdens de aanlegfase van de gaswinning Ternaard leidt tot een zeer geringe eenmalige depositie van stikstof op het Natura 2000-gebied Duinen Schiermonnikoog. Er is sprake van stikstofdepositie op zestien overbelaste habitats het Natura 2000-gebied. Het AERIUS Calculator rapport van de berekening is te vinden in (Bijlage B), de maximale depositie per habitattype is in onderstaande tabel beschreven.

Stikstofdepositie op het Natura 2000-gebied Duinen Schiermonnikoog, maximale depositie in mol N/ha op overbelast habitat

Code	Habitat	Depositie
H1310B	Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	0,01
H1330A	Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	0,01
H2120	Witte duinen	0,01
H2130A	Grijze duinen (kalkrijk)	0,01
H2130B	Grijze duinen (kalkarm)	0,02

H2130C	Grijze duinen (heischraal)	0,01
H2160	Duindoornstruwelen	0,01
H2170	Kruipwilgstruwelen	0,01
H2180A	Duinbossen (droog)	0,02
H2180B	Duinbossen (vochtig)	0,02
H2180C	Duinbossen (binnenduinrand)	0,01
H2190A	Vochtige duinvalleien (open water)	0,01
H2190B	Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	0,01
H2190C	Vochtige duinvalleien (ontkalkt)	0,01
H2190D	Vochtige duinvalleien (hoge moerasplanten)	0,01
H6410	Blauwgraslanden	0,01

De depositie op Schiermonnikoog is eenmalig en in absolute en relatieve zin zeer laag, namelijk maximaal 0,02 mol N/ha op een drietal habitattypen binnen in totaal 3 hexagonen en maximaal 0,01 mol op de overige habitattypen. Een depositie van 0,02 mol komt overeen met 0,28 gram.

9.2.7 Samenvatting passende beoordeling effecten stikstofdepositie

De stikstofdeposities langs de Friese vastelandskust als gevolg van dit project zijn klein. Langs de vastelandskust blijkt slechts op twee hexagonen waarvoor geldt dat de kritische depositiewaarde door de achtergronddepositie is overschreden stikstofdepositie op te treden als gevolg van dit project. Nadere analyse laat zien dat de oppervlakte van het beschermde habitat H1330 voor dit hexagoon kleiner dan 0,0 ha is (respectievelijk 400 en 20 m^2).

9.3 Passende beoordeling effecten zandsuppleties

9.3.1 Effecten

Als gevolg van de gaswinning zijn extra kustsuppleties nodig langs de Noordzeekust van Ameland. Omdat deze extra kustsuppleties noodzakelijk zijn als gevolg van de gaswinning, wordt het effect daarvan in deze passende beoordeling getoetst. De effecten die op kunnen treden door het extra volume aan zandsuppletieskunnen voor de kust van Ameland zijn beschreven in paragraaf 8.3.3. In Tabel 9-9 zijn als gevolg hiervan op kunnen treden op de Natura 2000-gebieden Noordzeekustzone en Duinen Ameland samengevat.

Tabel 9-9 Samenvatting effecten door kustsuppleties op Natura 2000-gebied Noordzeekustzone en Duinen Ameland

Thema	Aard en omvang van effecten op Natura 2000-gebied
Waterbeweging en morfologie	Relevant Natura 2000-gebied: Noordzeekustzone Door zandwinning: Gezien de ligging ruim buiten het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone treden geen effecten op. Door transport: Dit aspect is voor het transport van zand door baggerschepen niet relevant. Door suppletie: Verandering van stroomsnelheid is beperkt en leidt niet tot significante effecten. De zeebodem wordt over een zeer beperkt extra oppervlakte bedekt ten opzichte van de reguliere kustlijnzorgsuppletie. Na 3-5 jaar zijn de effecten van de

Thema	Aard en omvang van effecten op Natura 2000-gebied
	bedekking hersteld. Bedekking van schelpdierbanken van Spisula of Ensis kan door doorwerking leiden tot effecten op (kwalificerende) soorten.
Waterkwaliteit	Relevant Natura 2000-gebied: Noordzeekustzone Door zandwinning, transport en suppletie: Effecten op waterkwaliteit zijn zeer beperkt.
Natuurlijk sedimenttransport	Relevant Natura 2000-gebied: Noordzeekustzone Door zandwinning: Er is als gevolg van het slib dat vrijkomt, wat voor vertroebeling zorgt, een beperkte afname van de primaire productie. De doorwerking hiervan naar de groei van schelpdieren is zeer beperkt en in de passende beoordeling van de zandwinning beoordeeld als niet significant (Kleijberg et al., 2017). Door transport: Tijdens het transport kan een kleine hoeveelheid slib in het water terechtkomen. De hoeveelheid is te gering om tot effecten te kunnen leiden. Door suppletie: Er zal als gevolg van de suppletie een tijdelijke toename van de hoeveelheid slib in de waterkolom optreden in de ondiepe kustzone. Dit kan lokaal leiden tot een verminderde primaire productie en een verminderd doorzicht.
Geluid, trilling, beweging en licht	Relevant Natura 2000-gebied: Noordzeekustzone en Duinen Ameland Door zandwinning: Mede gezien de ligging ruim buiten het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone en afwezigheid van locatiegebonden soorten zijn er geen effecten. Door transport: De geluidsniveaus onder water zijn te laag om significante effecten te kunnen hebben. Effecten door optische verstoring/ geluidverstoring zijn alleen mogelijk voor zee-eenden. De beperkte lichtuitstraling leidt niet tot effecten. Door suppletie: De geluidsniveaus onder water zijn te laag om significante effecten te kunnen hebben. Effecten door optische verstoring/geluidverstoring zijn alleen mogelijk voor zee-eenden. De beperkte lichtuitstraling leidt niet tot significante effecten.
Stikstofdepositie	Relevant Natura 2000-gebied: Noordzeekustzone en Duinen Ameland (en mogelijk ook Duinen Schiermonnikoog) De effecten van stikstofdepositie door zandsuppleties zijn nog niet te bepalen, omdat nog niet duidelijk is hoeveel zand waar wordt gesuppleerd. Dit geldt ook voor de toekomstige reguliere kustsuppleties (van Duin et al., 2017). Toetsing van de stikstofdepositie zal voorafgaand aan de uitvoering van de suppleties plaatsvinden, waarbij dient te worden vastgesteld dat significant negatieve effecten door stikstofdepositie kunnen worden uitgesloten.

9.3.2 Mitigatie

De mogelijke effecten die kunnen optreden door het aanbrengen van het extra volume aan zandsuppletie wordt bepaald door de specifieke omstandigheden, waaronder de locatie van de zandsuppletie, het type zandsuppletie (voor het extra zandvolume worden in principe alleen onderwatersuppleties beschouwd), de periode van uitvoering en de combinatie met de condities van het uitvoeringsgebied (zandwingebied, transportroute en te suppleren gebied). Onder de condities in het uitvoeringsgebied vallen het vóórkomen van schelpenbanken van *Ensis* of *Spisula*, ‘zilte pionierbegroeiingen’, ‘embryonale duinen’, de samenstelling van het suppletiezand, het vóórkomen van zeehonden en de aanwezigheid van nestplaatsen van kustbroedvogels. In het Natura 2000-beheerplan Noordzeekustzone zijn een aantal vrijstellingsvoorwaarden opgenomen, die deze mogelijke effecten mitigeren. De voorwaarden zijn in het beheerplan opgenomen in bijlage B3.3.1. De nummering in onderstaand overzicht is overeenkomstig de nummering van de voorwaarden in het beheerplan. Alleen die voorwaarden die betrekking hebben op onderwatersuppleties zijn hier opgenomen. Daar waar sprake is van aantonen door “Rijkswaterstaat”, is dit vervangen door “NAM”. Welke van deze maatregelen van toepassing is op het betreffende extra volume zandsuppletie zal steeds voorafgaand aan de uitvoering van de zandsuppletie worden vastgesteld, overeenkomstig het gestelde in artikel 20.

A. Zandsuppleties

Bij de bepaling is aangegeven of de bepaling geldt voor onderwatersuppleties, strandsuppleties of voor beide.

Permanent overstroomde zandbanken (onderwatersuppleties)

1. Suppleties worden zodanig uitgevoerd dat schelpenbanken van levende *Spisula subtruncata* niet bedekt worden met zand;
2. Indien NAM aantoont dat bedekking met zand van de in artikel 1 genoemde schelpenbanken onvermijdelijk is, worden de uit te voeren suppleties niet gestart in de periode van 1 juni tot 1 maart;
3. De suppleties die schelpenbanken met levende *Ensis directus* bedekken zijn toegelaten als NAM aantoont dat er geen negatieve gevolgen zullen zijn voor de voedselvoorziening van zee-eenden.

Grijze en gewone zeehond (onderwater- en strandsuppleties)

8. Schepen die zand suppleren houden minimaal 1200 meter afstand van het deel van de zandplaat(platen) waarop zich grijze of gewone zeehonden bevinden;
9. Het suppleren vanuit schepen op kortere afstand dan 1200 meter is toegestaan als NAM aantoont dat wegens fysieke omstandigheden (zoals de ligging van vaargeulen en ondieptes op de route van suppletievaartuigen) niet aan die afstandsvereiste kan worden voldaan en er geen negatieve gevolgen zijn voor zeehonden ten aanzien van het gebruik van de betreffende zeehondenligplaats(en);
10. Bij het vóórkomen van zeehonden met pups op zandplaten en bij de suppletielocatie is uitvoering van suppleren conform artikel 9 alleen toegestaan buiten de onderstaande werp- en zoogperioden van zeehonden:
    • bij grijze zeehonden: tussen 1 december en 31 januari;
    • bij gewone zeehonden: tussen 1 mei en 31 juli;
11. In situaties als bedoeld bij het hierboven vermelde artikel 10 gelden voor schepen de volgende aanvullende voorwaarden:
    • Geen bemanning aan dek, tenzij dit strikt noodzakelijk is;
    • Geen andere verlichting dan navigatieverlichting, behoudens noodgevallen;
    • Geen geluidsproductie anders dan die uit technische- (motor) of veiligheidsoverwegingen (scheepshoorn) noodzakelijk is.

Topper, eidereend en zwarte zee-eend (onderwater- en strandsuppleties)

14. Schepen die zand suppleren, houden minimaal 500 meter afstand van vogelconcentraties van topper, eidereend- en zwarte zee-eend.

B. Transport van zand tussen win- en suppletielocaties

Grijze en gewone zeehond

15. Op schepen die zand transporteren zijn de voorwaarden opgenomen in de artikelen 8 tot en met 11 overeenkomstig van toepassing, met dien verstande, dat voor de term ‘’suppleren’’ de term ‘’transporteren’’ moet worden gelezen.

Topper, eidereend en zwarte zee-eend

16. Schepen die zand transporteren, houden minimaal 500 meter afstand tot vogelconcentraties van topper, eidereend en zwarte zee-eend.

Zee-eenden in zones 1 (op grond van het Toegangbeperkend Besluit Noordzeekustzone ex artikel 20 Nb-wet)

17. Voor zandsuppletievaartuigen is doorvaart van 1 november tot 1 april mogelijk via een variabele corridor, waarvan de exacte locatie afhankelijk is van de ligging van het zandwingebied en de te bereiken suppletielocatie en de aanwezigheid van concentraties zee-eenden. De ligging van de variabele corridor wordt in overleg met het bevoegd gezag vastgesteld, waarbij als uitgangspunt geldt dat de vaarafstand tussen het zandwingebied en de suppletielocatie zo kort mogelijk is met dien verstande, dat er een afstand van minimaal 1500 meter in acht wordt genomen ten opzichte van concentraties zee-eenden.

C. Zandwinningen

18. Zandwinningen gelegen nabij Natura 2000-gebieden in de Noordzeekustzone zijn toegelaten op een afstand van minimaal 900 meter buiten het Natura 2000-gebied;
19. Zandwinningen nabij Natura 2000-gebieden op locaties waar dieper dan 2meter in de bodem zand gewonnen wordt, zijn toegelaten op een afstand van minimaal 2000 meter van het Natura 2000-gebied.

D. Aanvullende voorwaarden voor melding aan en afstemming met het bevoegd gezag en het publiek

20. Voorgenomen zandsuppleties worden door NAM tenminste drie maanden voorafgaand aan de uitvoeringsperiode gemeld bij het bevoegd gezag. Bij de melding worden tevens de locatie, wijze van uitvoering, hoeveelheden zand en maatregelen ter voorkoming of beperking van negatieve effecten op de beschermde natuurwaarden weergeven. Dat geldt onder andere voor gegevens over schelpenbanken (artikelen 1 en 3), de aanwezigheid van zeehonden nabij suppleties en transport (artikel 8, 10 en 15) en de ligging van de variabele corridors (artikel 17);
22. Gelijktijdig met de melding aan het bevoegd gezag volgens artikel 20 informeert NAM de betrokken gemeente en doet publieke mededeling van de voorgenomen suppletie. Hierbij geeft NAM ook aan op welke wijze de gegevens als vermeld in de artikelen 20 en 21 beschikbaar worden gesteld aan het publiek.

In aanvulling op deze vrijstellingsvoorwaarden, op grond van zijn zorgplicht volgens de Nb-wet, stelt Rijkswaterstaat voor de aannemers een protocol op waarin voorschriften zijn opgenomen als extra garantie van de nakoming van de vrijstellingsvoorwaarden. Het protocol maakt onderdeel uit van de aangenomen opdracht.

9.3.3 Beoordeling

Op basis van de conclusies uit de diverse onlangs uitgevoerde toetsingen ten behoeve van zandwinning- en -suppletie wordt geconcludeerd dat het toekomstige extra volume zandsuppletie niet zal leiden tot significant negatieve effecten op de natuurlijke kenmerken van het Natura 2000-gebieden Noordzeekustzone. Bij de toekomstige beoordeling van de ecologische effecten van het extra zandvolume bij specifieke zandsuppleties zal dit voor de specifieke situatie en met de dan beschikbare gegevens en kennis worden gedaan. In de beoordeling zijn de mitigerende maatregelen betrokken, die zijn genoemd in paragraaf 9.3.2, die overeenkomen met de vrijstellingsvoorwaarden die betrekking hebben op de reguliere kustsuppleties.

9.4 Conclusies

Op basis van de beoordeling van de effecten van de stikstofdepositie in de aanlegfase en de effecten van het extra volume zendsuppleties in de winningsfase die in het voorgaande is geschreven wordt geconcludeerd dat -mede gezien de mitigerende maatregelen die worden getroffen- geen sprake zal zijn van significante gevolgen voor de Natura 2000-gebieden Waddenzee, Noordzeekustzone, Duinen Ameland en Duinen Schiermonnikoog.

9.5 Monitoring

Als onderdeel van de HadK-systematiek bij de Gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen en Gaswinning Ameland wordt vanwege het voorzorgsprincipe monitoring uitgevoerd naar biotische en abiotische paramaters in de Waddenzee. Het monitoringsprogramma bestaat uit signaleringsmetingen, om vast te stellen of zich geen onverwachte meetbaar nadelige effecten voordoen op de instandhoudingsdoelen van het Natura 2000-gebied Waddenzee die zouden kunnen samenhangen met de bodemdaling voor gaswinning. In Bijlage D is het vigerende monitoringsprogramma voor de Gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen opgenomen.

Omdat de HadK-systematiek ook wordt gehanteerd bij de gaswinning Ternaard, wordt ook voor Ternaard een monitoringsprogramma opgesteld dat is gericht op het aantonen dat geen sprake is van meetbare nadelige ontwikkeling van de instandhoudingsdoelstellingen van het Natura 2000-gebied Waddenzee door de gaswinning Ternaard. Het invloedsgebied van de gaswinning Ternaard sluit aan bij en overlapt deels met dat van de gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Daarom wordt het monitoringsprogramma Ternaard gebaseerd op het monitoringsprogramma gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.

Het monitoringsprogramma Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen worden voor de gaswinning Ternaard uitgebreid in de ruimte, zodat ook in het gebied waar de bodemdaling door de gaswinning Ternaard plaatsvindt voldoende waarnemingen plaatsvinden. Deze aanvullingen zijn opgenomen in het addendum bij het monitoringprogramma (Bijlage E).

Het monitoringsprogramma bij de gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen wordt jaarlijks aangepast naar aanleiding van de monitoringsresultaten en de discussies daarover en het advies van de Auditcommissie. Omdat het vigerende monitoringsprogramma sinds 2014 van kracht is, hebben al aanpassingen plaatsgevonden. Ter wille van de overzichtelijkheid zijn deze aanpassingen opgenomen in het addendum bij het monitoringprogramma (Bijlage E). Iedere 6 jaar vindt een uitgebreide evaluatie plaats van de monitoring, die ook aanleiding kan zijn voor aanpassingen van het monitoringsprogramma. De volgende evaluatie zal plaatsvinden in 2019, zodat in 2020 een aangepast monitoringsprogramma zal worden vastgesteld.

10 LITERATUUR

Apeldoorn, R. van & C.J. Smit, 2006. Vuurwerk en Natuur, effecten van evenementenvuurwerk op beschermde natuurwaarden in Zeeland. Alterra rapport 1383. Alterra, Wageningen.

Arcadis, 2016. Deel II. Locatiespecifieke Passende beoordeling. Zandwinning, zandtransport & zandsuppletie Vlieland Oost en Vlieland Haven.

Baart F., R. Leander, J. de Ronde, H. de Vries, V. Vuik, R. Nicolai. 2015. Zeespiegelmonitor 2014; Rekenmethode voor huidige en toekomstige zeespiegelstijging. Deltares, HKV Lijn in Water, KNMI rapport 1209426-000-VEB-0011, Finale versie.

Ballasus, H. & Sossinka, R. 1996. Auswirkungen von Hochspannungstrassen auf die Flächennutzung überwinternder Bläß- und Saatgänse Anser albifrons, A. Fabalis. Journal of Ornithology 138: 215-228.

Beets, D.J., Van der Spek, A.J.F. & Van der Valk, L., 1994: Holocene ontwikkeling van de Nederlandse kust. RGD rapport 40.016 – Project Kustgenese. Haarlem, Rijks Geologische Dienst, Hoofdafdeling Ondiepe Ondergrond, 53 pp.

Blomert, A.M., 2002. De samenhang tussen bodemgesteldheid, droogligtijd en foerageerdichtheid van vogels binnen de intergetijdenzone. A&W-rapport 330. Altenburg & Wymenga Ecologisch onderzoek, Veenwouden.

Bray, R.N. (ed.) 2008. Environmental aspects of dredging. Taylor & Francis Group: London.

Broekmeyer, M.E.A. (redactie), 2006. Effectenindicator Natura 2000-gebieden; achtergronden en verantwoording ecologische randvoorwaarden en storende factoren. Wageningen, Alterra, rapport 1375.

Christianen, M.J.A., S.J. Holthuijsen, E.M. van der Zee, A. van der Eijk, L.L. Govers, T. van der Heide, H. de Paoli & H. Olff, 2015. Ecotopen- en Kansrijkdomkaart; Project Waddensleutels. Van de Nederlandse Waddenzee Waddensleutels rapportnummer 2015.04.01.

De Waal, J.A., J.P.A. Roest, P.A. Fokker, I.C. Kroon, J.N. Breunese, A.G. Muntendam-Bos, A.P. Oost & G. van Wirdum. 2012. The effective subsidence capacity concept: How to assure that subsidence in the Wadden Sea remains within defined limits? Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw, vol. 91 – 3, pag. 385 – 399.

Dijkema, K.S., W.E. van Duin, E.M. Dijkman, A. Nicolai, H. Jongerius, H. Keegstra, L. van Egmond, H.J. Venema & J.J. Jongsma, 2011. Vijftig jaar monitoring en beheer van de Friese en Groninger kwelderwerken: 1960-2009, Alterra Wot-werkdocument 22.

DLG, 2017. PAS-gebiedsanalyse Waddenzee (001). Versie januari 2017

Donker, J., 2015. Hydrodynamic processes and the stability of intertidal mussel beds in the Dutch Wadden Sea. Proefschrift Universiteit Utrecht.

Duran Matute, M., T. Gerkema, G.J. de Boer, J.J. Nauw, U. Gräwe, 2014. Residual circulation and fresh-water transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modeling study. Ocean Science, 10, 611–632. DOI:10.5194/os-10-611-2014.

Elias, E.P.L., 2019, Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Deltares rapport 11203683-001-ZKS-0002, Versie 0.2, 19 september 2019, definitief.

Elias E.P.L. en A. Bruens, 2013, Beheerbibliotheek Ameland – Feiten & cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1207724-004-ZKS-0015.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B. and De Ronde, J.G., 2012.“Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century,” Netherlands Journal of Geoscience, 91(3), 293–310.

Elschot, K., A. de Groot, K. Dijkema, C. Sonneveld, J.T. van der Wal, P. de Vries, B. Brinkman, W. van Duin, W. Molenaar, J, J. Krol., L. Kuiters, D. de Vries, R. Wegman, P. Slim, E. Koppenaal, J. de Vlas, 2017. Ontwikkeling kwelder Ameland-Oost; Evaluatie bodemdalingsonderzoek 1986-2016 in: Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland (red.). Monitoring effecten van bodemdaling op Oost-Ameland.

Ens B.J., Dokter A., Rappoldt K. & Oosterbeek K. 2015. Wat bepaalt de draagkracht van de Waddenzee voor wadvogels: onderzoek naar het verspreidingsgedrag van Scholeksters. Sovon-rapport 2015/02. Sovon Vogelonderzoek Nederland.

Ens, B.J. (ed.), Krol, J., van der Meer, J., Piening, H., Wijsman, J., Schekkerman, H., Rappoldt, K. 2015. Monitoring van het voor vogels oogstbare voedselaanbod in de kombergingen van het Pinkegat en Zoutkamperlaag. Sovon-rapport 2015.15. Sovon Vogelonderzoek Nederland.

Ens B.J., Kersten M., Krol J., van der Meer J., Wijsman J., Schekkerman H. & Rappoldt K. 2016. Monitoring van het voor vogels oogstbare voedselaanbod in de kombergingen van het Pinkegat en Zoutkamperlaag – rapportage tot en met monitoringjaar 2015. Sovon-rapport 2016/15. Sovon Vogelonderzoek Nederland.

Ens B.J., Kersten M., Wijsman J., van der Meer J., Schekkerman H., van Winden E. & Rappoldt K. 2017. Monitoring van het voor vogels oogstbare voedselaanbod in de kombergingen van het Pinkegat en Zoutkamperlaag - rapportage tot en met monitoringjaar 2016. Sovon-rapport 2017/15. Sovon Vogelonderzoek Nederland.

Ens B.J., van der Meer J., Troost K., van Winden E., Schekkerman H. & Rappoldt C. 2018. Monitoring van het voor vogels oogstbare voedselaanbod in de kombergingen van het Pinkegat en Zoutkamperlaag - rapportage tot en met monitoringjaar 2017. Sovon-rapport 2018/14. Sovon Vogelonderzoek Nederland.

Ens BJ. Van der Meer J. Troost K. Van Winden E. Schekkerman H. Rappoldt K., 2019. Monitoring van het voor vogels oogstbare voedselaanbod in de kombergingen van het Pinkegat en Zoutkamperlaag. Rapportage tot en met monitoringjaar 2018. Sovon-rapport 2019/22.

Eysink, W.D. and Biegel, E.J., 1992. ISOS*2 Project, Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function, Investigations on empirical morphological relations, Report H1300 Phase 2, WL | Delft Hydraulics Laboratory, September 1992, 73 p.

Eysink, W.D., 1979. Morfologie van de Waddenzee, gevolgen van zand- en schelpenwinning. Waterloopkundig Laboratorium, Rapport R1336.

Fokker, P.A., F.J. van Leijen, B. Orlic, H. van der Marel, R.F. Hanssen. 2018. Subsidence in the Dutch Wadden Sea. Netherlands Journal of Geosciences Volume 97, pag. 129-181.

Haasnoot, M., L. Bouwer, F. Diermanse, J. Kwadijk, A. van der Spek, G. Oude Essink, J. Delsman, O. Weiler, M. Mens, J. ter Maat, Y. Huismans, K. Sloff & E. Mosselman, 2018, Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning. Deltares rapport 11202230-005-0002.

Herman, P., N. Villars, J. Winterwerp, T. Van Kessel, Z. Wang, C. Brière, L. Van Rijn, and J. Cleveringa, 2016. Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland, Deltares rapport.

Hoeksema, H.J., H.P.J. Mulder, M.C. Rommel, J.G. de Ronde & J. de Vlas, 2004. Bodemdalingsstudie Waddenzee 2004: Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. RIKZ-rapport 2004-025. 67 p. + bijlagen.

Hoekstra, H., Winkels, H., & Gerritsen, J., 1998. De bodemopbouw van de buitendijkse gronden langs de noordkust van Friesland en Groningen. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directie IJsselmeergebied.

Institute of Estuarine & Coastal Studies, 2009. Construction and waterfowl: Defining sensitivity, response, impacts and guidance. University of Hull.

Kleijberg, R., M.J.C. Rozemeijer & J.T. van der Wal, 2017. Zandwinnng Noordzee 2018-2027; Nadere verdieping effecten Natura 2000. Arcadis rapport 079690040 A.

KNMI, 2015: KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34 pp.

Koolstra, 2017. Pilotsuppletie Amelander Zeegat, Passende beoordeling en Soortbeschermingstoets. Arcadis. Projectnummer C05062.000180 en referentie 079386961.A

Koolstra, 2018. Conformiteitstoets beheerplan. Zandwinning, zandtraansport en zandsuppletie Ameland Midden. Arcadis. Projectnummer C05062.000169 en referentie 079732789.B

Kragtwijk, N. G., Zitman, T. J., Stive, M. J. F. and Wang, Z. B., 2004. Morphological response of tidal basins to human interventions, Coast. Eng., 51(3): 207-221.

Krol, J. 2018. Wadsedimentatie metingen op Ameland, Piet Scheveplaat, Engelsmanplaat, Paesens en Schiermonnikoog 2007-2017. Rapport Natuurcentrum Ameland.

Louters, T. en Gerritsen, F., 1994. Het mysterie van de wadden, Hoe een getijdesysteem inspeelt op de zeespiegelstijging. Min. Van V. en W., Dir.Gen. RWS, RIKZ, Rapp. RIKZ94.040, oktober 1994. NAM, 1990. Bodemdaling door aardgaswinning, Groningen Veld en Randvelden, Statusrapport 1990, Prognose tot het jaar 2050, NAM, februari 1990.

Ministerie van Economische Zaken, 2006. Gaswinning binnen randvoorwaarden; Passende beoordeling van het rijksprojectbesluit gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2017. Effectenindicator website.

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2016a. Natura 2000-beheerplan Waddenzee Periode 2016-2022.

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2008a. Natura 2000-gebied Waddenzee. Directie Regionale Zaken DRZO/2008-001.

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2009. Profielendocument schorren en zilte graslanden.

Molenaar, J.G. de, 2003, Lichtbelasting. Overzicht van de effecten op mens en dier. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 778.

Mulder, J.P.M., 2000, Zandverliezen in het Nederlandse kustsysteem, Rijkswaterstaat RIKZ, rapport RIKZ/2000.36.

NAM, 2006. MER Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.

NAM, 2007. Meet- en regelprotocol Winning Waddenzeegas vanaf de locaties Moddergat, Lauwers en Vierhuizen. NAM rapport EP200612202112.

NAM, 2013b. Winningsplan MLV.

NAM, 2017. Long Term Subsidence vervolgstudie juli – oktober 2017; 30 jaar monitoring van bodemdaling in dynamisch waddengebied met de “hand aan de kraan” controle op bodemdaling. Notitie Nederlandse Aardolie maatschappij, 20 oktober 2017. Doc nr. EP201710200509.

NAM, 2018. Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen: publieksamenvatting en integrale beoordeling van de monitoringresultaten over 2017. Rapport Nederlandse Aardolie maatschappij.

NAM, 2019. Winningsplan Ternaard.

NAM, 2019. Monitoring van de effecten van bodemdaling door gaswinning in het Wadden- en Lauwersmeergebied, evaluatie monitoring 2013-2019. NAM rapport EP201907205142.

NAM, 2019. Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauweroog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2018. NAM Rapport EP201905200582

Nederbragt, G. 2005. Zandvoorraden van het kustsysteem, onderbouwing van een conceptueel model met behulp van trends van de winst- en verliesposten over de periode 1973-1997. Rapport RIKZ/2005.033. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Nederhoff, K., B. Smits & Z. B. Wang. 2017. KPP Wadden Data analyse: getij en morfologie Deltares rapport 11200521-000.

Oost, A.P., B.J. Ens, A.G. Brinkman, K.S. Dijkema, W.D. Eysink, J.J. Beukema, H.J. Gussinklo, B.M.J. Verboom & J.J. Verburgh, 1998. Integrale bodemdalingstudie Waddenzee. Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen. 372 p.

Perdon, K.J., Troost, K., Zwol, J. van, van Asch, M., van der Pool, J. 2018. Schelpdierbestanden in de Nederlandse kustzone in 2018. Stichting Wageningen Research, Centrum voor Visserijonderzoek (CVO) CVO rapport 18.010.

Provincie Fryslân, 2017. Kaartenapplicatie natuur (fryslan.maps.arcgis.com).

Rappoldt C. & Ens B.J. 2013. Het effect van bodemdaling op overwinterende scholeksters in de Waddenzee. Een modelstudie met WEBTICS. EcoCurves rapport 17/ Sovon-rapport 2013/19. EcoCurves / Sovon Vogelonderzoek Nederland.

Reijnen M.J.S.M. & R.P.B. Foppen. 1991. Effect van wegen met autoverkeer op de dichtheden van broedvogels (hoofdrapport). IBN-rapport 91/1.DLO-Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, Leersum.

Rijkswaterstaat, 2013. Kenmerkende waarden Getijgebied 2011.0. Rapport.

Rijkswaterstaat, 2016a. Kustlijnkaarten 2017. Rapport.

Rijkswaterstaat, 2016b. Toelichting bij de Vegetatiekartering Kwelderwerken Friesland & Groningen 2014. Op basis van false colour-luchtfoto’s 1:10.000. Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving (RWS-WVL).

Rijkswaterstaat, 2016c. Algemene Passende beoordeling zandwinning, zandtransport en zandsuppletie – Deel I. Versie 2016.

Schrijvershof, R., H. van den Boogaard & M. Visser, 2018. Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2017); Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltaresrapport 11202013-000

Smit, C.J., S.M.J.M Brasseur, B.J. Ens & K.H. Oosterbeek, 2007. Effecten van schietoefeningen vanaf fort Erfprins op natuurwaarden in het zeegat van Texel. IMARES rapport C109/07, SOVON onderzoeksrapport 2007/05. Imares, Den Burg; Alterra, Wageningen.

Steinborn, H., Reichenbach, M., Timmermann, H., 2011. Windkraft – Vögel – Lebensräum Ergebnisse einer siebenjährigen Studie zum Einfluss von Windkraftanlagen und Habitatparametern auf Wiesenvögel. Eine Publikation der ARSU GmbH.Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH.

TNO, 2016. Advies “actualisering beleidsscenario zeespiegelstijging voor delfstofwinning onder de Waddenzee”. Brief d.d. 27 juni 2016 met kenmerk AGE 16-10.066.

Van der Lugt M., Visser, M. & Van den Boomgaard, H., 2019. Analyse LiDAR-data voor het Friese zeegat (2010-2018) Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport.

Van den Ende, D., Troost, K., van Asch, M.,Perdon, J., van Zweeden, C., 2018. Mosselbanken en oesterbanken op droogvallende platen in de Nederlandse kustwateren in 2018: bestand en arealen IJmuiden : Stichting Wageningen Research, Centrum voor Visserijonderzoek (CVO) CVO rapport 18.023.

Van der Spek & D.J. Beets, 1992. Mid-Holocene evolution of a tidal basin in the western Netherlands: a model for future changes in the northern Netherlands under conditions of accelerated sea-level rise? Sedimentary Geology 80. 185-197.

van der Spek, A. J.F. 2018. The development of the tidal basins in the Dutch Wadden Sea until 2100: the impact of accelerated sea-level rise and subsidence on their sediment budget – a synthesis; Netherlands Journal of Geosciences Volume 97, pag. 71-78.

Van der Zee, E. 2014 Soft-bottom intertidal ecosystems shaped by ecosystem engineers. Consequences for trophic structure. Proefschrift Universiteit Groningen.

Van Duin, C., M. Vrij Peerdeman, H. Jaspers, A. Bucholc. 2017. Winning suppletiezand Noordzee 2018 t/m 2027; Milieueffectrapportage. Rapport Sweco versie D1.

Van Duin, W. E., H. Jongerius, A. Nicolai, J.J. Jongsma, A. Hendriks & C. Sonneveld, 2016a. Friese en Groninger kwelderwerken: monitoring en beheer 1960-2014. Wot/Imares-rapport C042/16.

Van Duin, W.E. & C. Sonneveld. 2016b. Vegetatie en opslibbing in de Peazemerlannen en het referentiegebied west-Groningen: Jaarrapport 2015. Alterra Rapport C034/16.

Van Duin, W.E. 2018. Kweldermonitoring in de Peazemerlannen en het referentiegebied West-Groningen: Jaarrapport 2017 Artemisiarapport 2017-03.

Van Goor, M. A., Zitman, T. J., Wang, Z. B. and Stive, M. J. F., 2003. Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets, Mar. Geol., 202(3-4): 211-227.

Vermaas, T. en V. Marges, 2015, Detailanalyse volumeveranderingen rondom Ameland, Deltares, Rapport 1220040-006.

Vermeersen, B.L.A., A.B.A. Slangen, T. Gerkema, F. Baart, K.M. Cohen, S. Dangendorf, M. Duran-Matute, T. Frederikse, A. Grinsted, M.P. Hijma, S. Jevrejeva, P. Kiden, M. Kleinherenbrink, E.W. Meijles, M.D. Palmer, R. Rietbroek, R.E.M. Riva, E. Schulz, D.C. Slobbe, M.J.R. Simpson, P. Sterlini, P. Stocchi, R.S.W. van de Wal, M. van der Wegen. 2018. Sea-level change in the Dutch Wadden Sea; Netherlands Journal of Geosciences Volume 97, pag. 79-127.

Voslamber, B. & Liefting, M., 2011. Standaard Rekenmethodiek grasetende watervogels in de Rijntakken. SOVON-onderzoeksrapport 2011/09. SOVON Vogelonderzoek Nederland, Nijmegen.

Wang, Z.B. en W.D. Eysink, 2005. Abiotische effecten van bodemdaling in de Waddenzee door gaswinning, Rapport Z3995, WL | Delft Hydraulics.

Wang, Z.B., Cleveringa, J. & Oost, A., 2017. Morfologische effecten bodemdaling in relatie tot gebruiksruimte. Report 1230937-000. Deltares (Delft).

Wang, Z.B., E.P.L. Elias, A.J.F. van der Spek, Q.J. Lodder, 2018. Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. Netherlands Journal of Geosciences Volume 97, pag. 183-214.

Weerman, E. 2011. Spatial patterns in phototrophic biofilms. The role of physical and biological interactions Proefschrift Radboud Universiteit Nijmegen.

Wiersma P. & van Dijk K. 2009. Hoogwatervluchtplaatsen op de kaart van het waddengebied (deel 1): kleine eilanden, platen en vastelandkust van Noord-Holland en Friesland. SOVON-informatierapport 2009/19. SOVON Vogelonderzoek Nederland, Beek-Ubbergen.

BIJLAGE A VERSTORINGSCONTOUREN

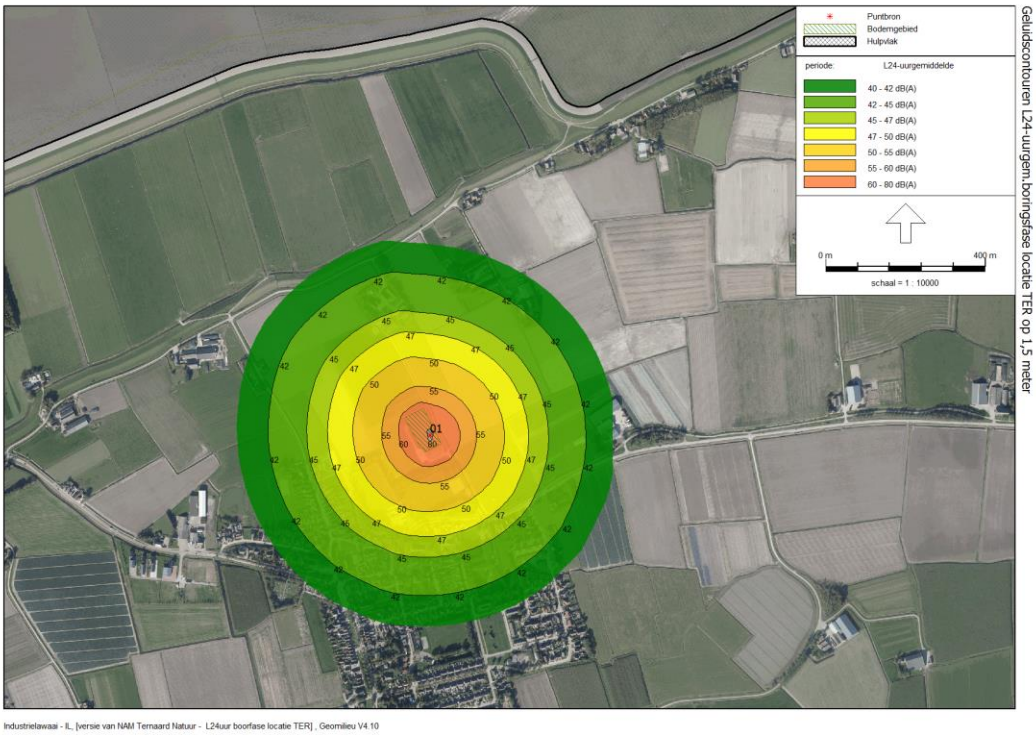
Geluidscontouren

De geluidscontourberekeningen zijn bij het opstellen van het MER voor de gaswinning Ternaard uitgevoerd, waarbij alleen voor de locatie nabij Ternaard een berekening is gedaan. De ligging van de uiteindelijke winlocatie (Locatie 2) wijkt echter niet wezenlijk af van deze berekeningslocatie (Locatie 1), met name door de vergelijkbare afstand tot aan de Waddenzee en dezelfde invulling en werkzaamheden. Hierdoor gelden dezelfde waarden, afstanden en eventuele effecten ook voor de locatie die in deze Passende beoordeling wordt beoordeeld.

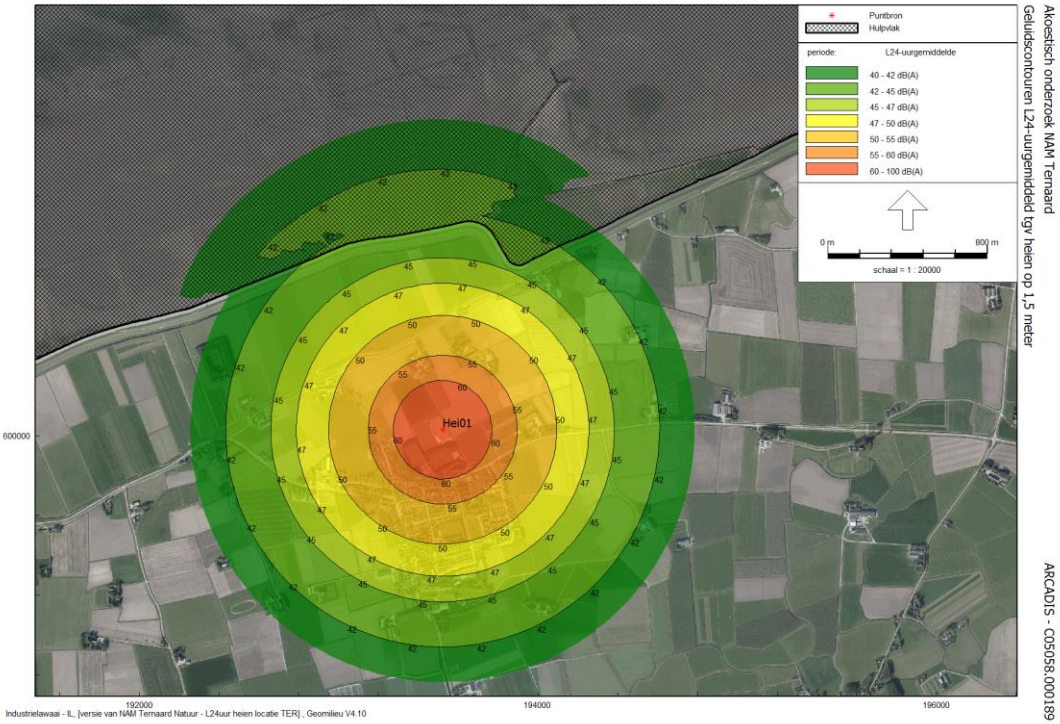
Voor de aanleg van de pijpleiding is geen visualisatie gemaakt, hiervoor geldt de volgende tabel:

Geluidscontour [dB(A)]	Afstand ten opzichte van de bron [meter]
40	193
42	160
45	123
47	103
50	80
55	54
60	37

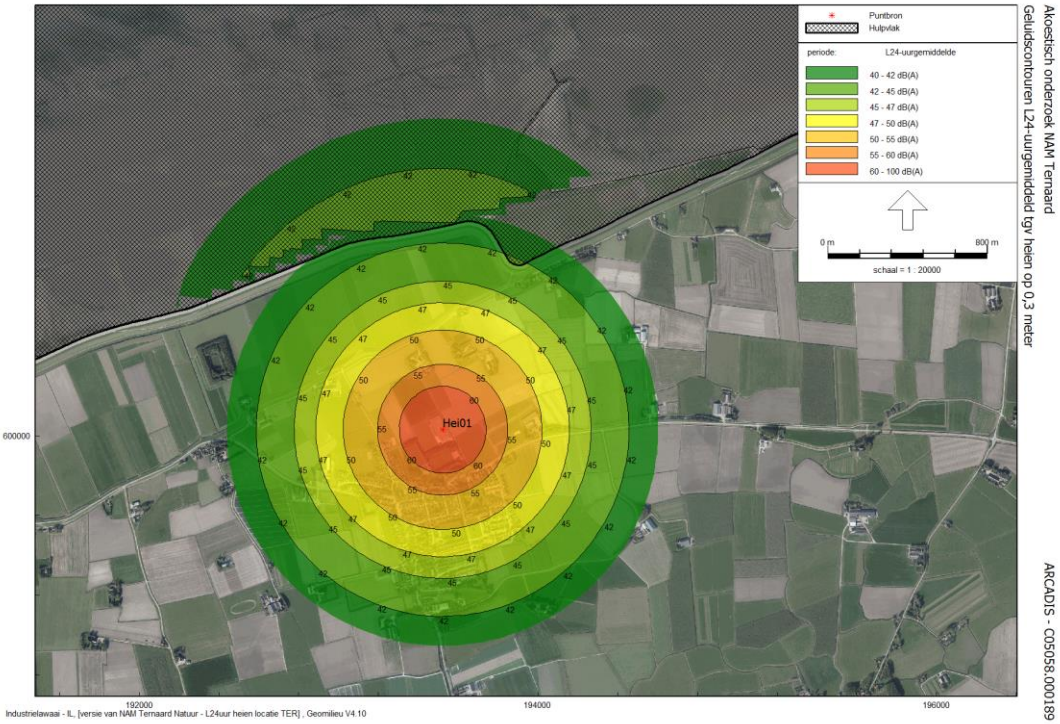
Aanlegfase 24-uurs equivalent op 1,5 meter



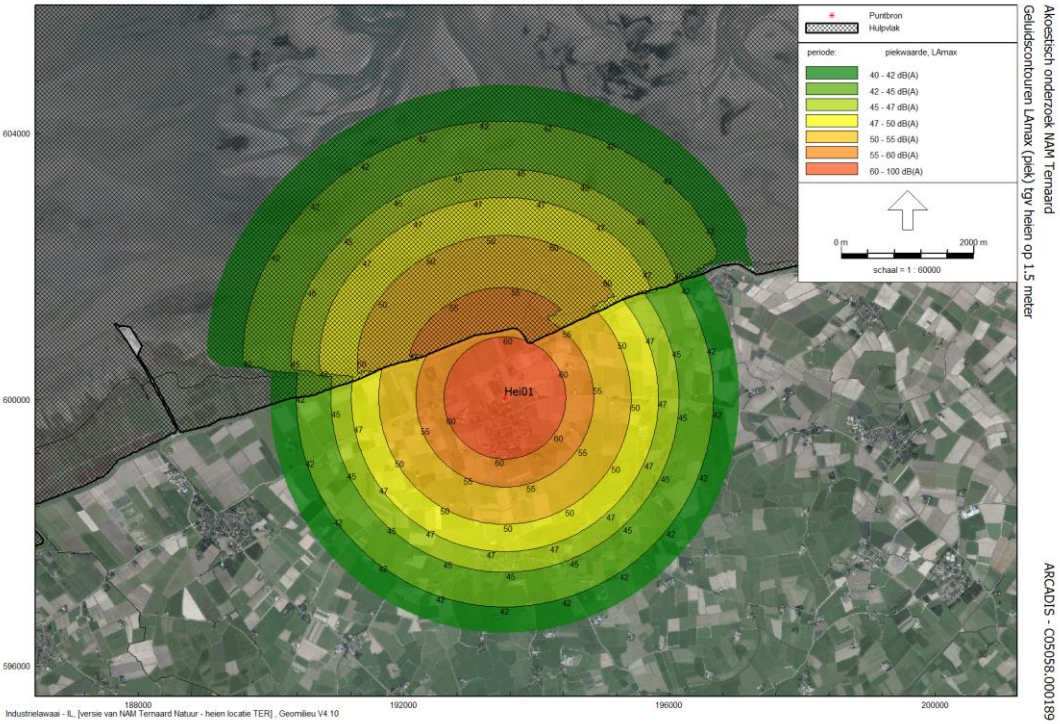
Aanlegfase heien 24-uurs equivalent op 1,5 meter



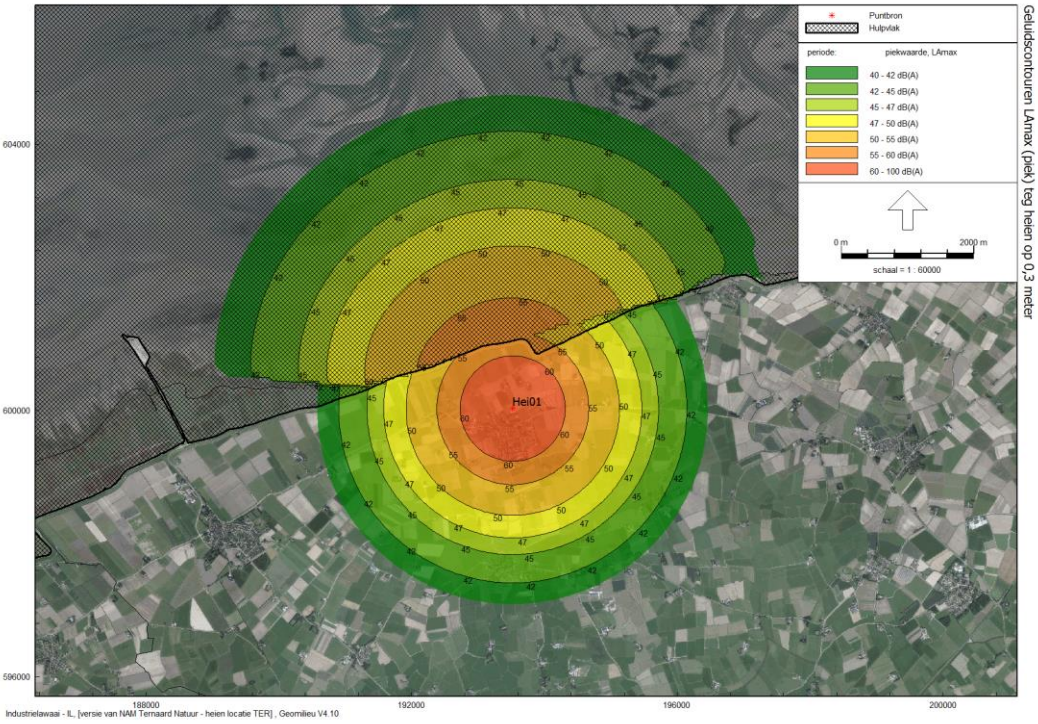
Aanlegfase heien 24-uurs equivalent op 0,3 meter



Aanlegfase heien piekbelasting op 1,5 meter



Aanlegfase heien piekbelasting op 0,3 meter

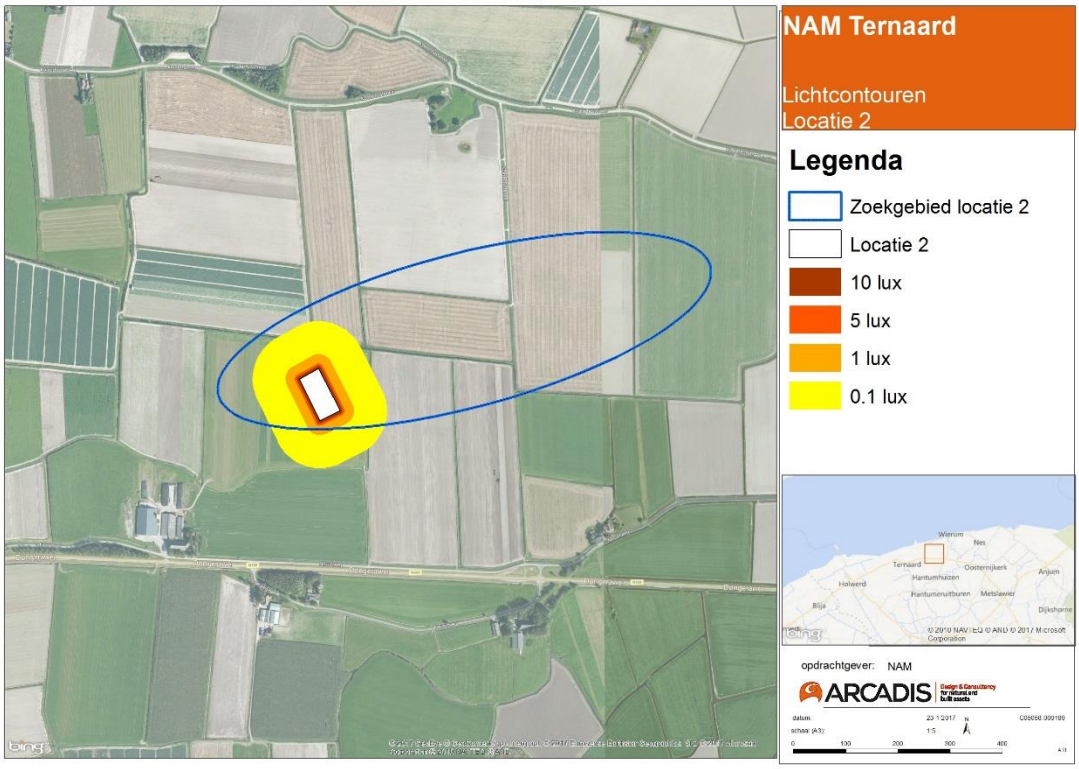


Winningsfase 24-uurs equivalent op 1,5 meter

Lichtcontouren

Locatie 2 productielocatie polder

De blauwe lijn is het zoekgebied, de locatie is illustratief



Locatie 2 Polder en Pijpleidingtracé

BIJLAGE B UITGANGSPUNTEN EN RESULTAAT AERIUS BEREKENING

Bijlage B1: Uitgangspunten depositieberekening

Activiteiten

In deze paragraaf worden de activiteiten van het project beschreven die mogelijk leiden tot een toename van stikstofdepositie op aangewezen stikstofgevoelige habitattypen of leefgebieden van aangewezen soorten in een Natura 2000-gebied, dat in bijlage 1 van de PAS is opgenomen, tot gevolg kunnen hebben. De activiteiten m.b.t. de voorgenomen activiteit vinden enkel op land plaats. Voor het inzetten van machines en aan- en afvoer van materiaal zal per as over de weg plaatsvinden.

In de onderstaande tabel zijn de verschillende activiteiten weergeven die invloed hebben op emissies.

Materieel	Activiteit
(Bestel)bussen/personenauto	Vervoeren personeel
Vrachtwagens	Aan- en afvoeren van de boorinstallatie
Laadschop	Voorbereiden productielocatie
Heistelling	Heien van funderingen voor de bouw van boorinstallatie
Hijskraan	Hijswerkzaamheden voor de boorinstallatie en materieel leidingtracé
Graafmachine	Graafwerkzaamheden t.b.v. aanleg leidingtracé en voorbereidend werk productielocatie
Bemalingspomp	Verpompen van water t.b.v. aanleg leidingtracé
Boorinstallatie	Boorwerkzaamheden kabelsystemen
Fakkelinstallatie	Affakkelen van gas
Generatoren	De dieselgeneratoren voorzien de boorinstallatie van elektriciteit.

Zichtjaar

Effecten kunnen optreden tijdens de aanleg- en tijdens de exploitatiefase. Bij het project Gaswinning Ternaard, is er geen sprake van effecten (of verwaarloosbare effecten) tijdens de winningsfase. In de winning zijn geen noemenswaardig emissies. De enige emissie van NOx en fijn stof in de winning is van een vrachtwagen die materialen komt brengen of afvoeren en/of een personenwagen van een operator. Enkel de aanlegfase is belangrijk voor de berekeningen in de AERIUS Calculator.

De boring duurt naar verwachting 4,5 maanden en is gepland voor of Q1/2 2020 Na de boring wordt de leiding aangelegd. De aanleg van het leidingtracé zal enkele maanden in beslag nemen.

In de modellering is worst case uitgegaan van een realisatieprocedure van 1 kalenderjaar. Het jaar dat is gekozen voor de berekeningen is 2020. De berekening voor het jaar 2020 kan als worst case worden gezien, omdat in toekomstige jaren lagere emissiefactoren voor wegverkeer worden gehanteerd.

Kenmerken emissiebronnen

Deze paragraaf beschrijft en onderbouwt de brongegevens die worden gebruikt bij de berekening van de depositiebijdrage van het project binnen het onderzoeksgebied. De beschreven brongegevens vormen de invoer voor de berekeningen met AERIUS Calculator. Bij de inventarisatie is onderscheid gemaakt tussen de verschillende typen bronnen, welke bij een of meer onderdelen worden ingezet.

Mobiele werktuigen

De werkvoertuigen behorend bij de mobiele werktuigen zijn: rupsgraafmachines, hijskranen, graafmachines, laadschoppen, heistellingen en bemalingspompen. De emissies van dieselmaterieel zijn afhankelijk van het motorisch vermogen, de gemiddelde belasting, het bouwjaar en de draaiuren. De emissiefactoren van onder andere dieselmaterieel is op Europees niveau gereguleerd via technische voorschriften aan het voertuig en de verbrandingsmotor.

Emissiefactoren
De voorschriften voor dieselmaterieel gelden sinds 1997. De EU-richtlijnen (97/68/EC en 2002/88/EC) bevatten normen voor de maximale uitstoot van luchtverontreiniging per vermogensklasse in gram/kWh. Er is sprake van invoering in vier fasen van strenger wordende emissienormen. De derde fase verloopt in twee stappen: Stage IIIA voor motoren met een variabel toerental met bouwjaar 2006/2008 en Stage IIIB voor bouwjaar 2011/2013. De vierde fase geldt vanaf 2014 (EU-richtlijnen 2004/26/EC).

Om de emissie van stikstof zo veel mogelijk te beperken is ervoor gekozen alleen materieel in te zetten dat voldoet aan de emissie-eisen van STAGE IV en om bij de generatoren een nageschakelde techniek toe te passen die een emissie realiseert die nog lager is van STAGE IV. De gehanteerde emissiefactor is een feitelijk gemeten waarde tijdens representatieve omstandigheden.

Motorbelasting
De motorbelasting (aanspreken van motorisch vermogen) van dieselmaterieel gedurende een werkcyclus is wisselend. Er wordt nooit of zelden het maximale motorisch vermogen aangesproken. De gemiddelde belasting varieert voor het meeste dieselmaterieel tussen 50 tot 60%. In de emissieberekeningen is gecorrigeerd voor de gemiddelde belasting. De gemiddelde belasting is afkomstig uit het genoemde TNO-rapport[19].

Emissievracht
Op basis van het totaalaantal bedrijfsuren, motorisch vermogen van materieel, de gemiddelde belasting en emissiefactoren, is de totale NO_x- en PM_{10}-emissievracht bepaald. Een overzicht van het in te zetten materieel in de aanlegfase en de gehanteerde uitgangspunten is opgenomen in onderstaande tabel.

Omschrijving	Aantal	Totaal aantal dagen	Totaal aantal uur [uren]	Motorisch vermogen [kW]	Gemiddelde belasting [%]	Emissie factor NO_x [g/kWh]	TAF fact	Totaal NO_x vracht [kg]
Voorbereiding/aanleg boor-/productielocatie								
Heistelling	1	15	120	250	60	0,36	1,1	7,13
Laadschop	1	30	240	265	60	0,36	1,05	14,42
Graafmachine	1	30	240	125	60	0,36	0,87	5,64
Asfalt	1	5	40	106	60	0,36	0,95	0,87

[19] Afkomstig uit TNO-rapport 'Emissiemodel Mobiele Machines gebaseerd op machineverkopen in combinatie met brandstof Afzet, EMMA' van november 2009.

Omschrijving	Aantal	Totaal aantal dagen	Totaal aantal uur [uren]	Motorisch vermogen [kW]	Gemiddelde belasting [%]	Emissie factor NO_x [g/kWh]	TAF fact	Totaal NO_x vracht [kg]
Aanleg leidingtracé								
Kranen	6	87	4.176	250	60	0,36	1,1	248,05
Graafmachines	4	87	2.784	125	60	0,36	0,87	64,40
Bemalingspompen	16	87	33.408	6	80	0,36	1,1	211,67

Dieselgeneratoren boorinstallatie

Voor de boringen wordt de boorinstallatie T700 ingezet of vergelijkbaar. De boorinstallatie wordt van elektrische energie voorzien door 4 dieselgeneratoren. Uit metingen blijkt dat de NOx uitstoot bij een boring 0,22 gram per kWh opgewekte energie betreft. Voor de totale boring is 3130 MWh aan elektriciteit nodig. In onderstaande tabel is een overzicht opgenomen met de gehanteerde uitgangspunten voor de emissieberekeningen.

Overzicht uitgangspunten emissieberekeningen dieselgeneratoren boorinstallatie

Omschrijving	Aantal	Totaal aantal dagen	Totaal energieverbruik [MWh]	Emissie factor NO_x [g/kWh]	NO_x-vracht [kg]
Boorinstallatie T700	1	134	3130	0,22	688,60

Affakkelen

De NO_x-emissiefactor is afgeleid uit EPA-rapport ‘AP42, 15.5 Industrial Flares’. In onderstaande tabel is een overzicht opgenomen met de gehanteerd uitgangspunten voor de emissieberekeningen.

Overzicht uitgangspunten emissieberekeningen fakkels

Omschrijving	Aantal	Hoeveelheid gas [m^3/]	Emissiefactor NO_x [g/m^3 gas]	NO_x- vracht [kg]
Fakkels	2	1.600.000	1,04	1.664

Wegverkeer

De emissiefactoren van gemotoriseerd wegverkeer worden jaarlijks, medio maart, gepubliceerd door het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat voor de huidige situatie en verschillende toekomstige jaren. Latere jaren reflecteren een afname van emissiefactoren vanwege strenge emissie-eisen die aan de motorvoertuigen worden gesteld. Hierdoor wordt het wagenpark in Nederland steeds schoner.

De emissiefactoren van wegverkeer zijn afhankelijk van het zichtjaar, de voertuigcategorie en het snelheidstype. De (grote) vrachtwagens zijn beschouwd als ‘zware motorvoertuigen’. De personenauto’s en autobusjes zijn beschouwd als ‘lichte motorvoertuigen’. In de berekeningen is uitgegaan van snelheidstype ‘stagnerend verkeer’ op de productielocatie tot aan de hoofdweg.

In de emissieberekeningen zijn de emissiefactoren van het zichtjaar 2020 gehanteerd. De invoerparameter in het rekenmodel is weekdaggemiddelde intensiteit over het hele jaar. Het aantal motorvoertuigbewegingen is omgerekend naar weekdaggemiddelde intensiteit. In onderstaande tabel is een overzicht opgenomen met de gehanteerde weekdaggemiddelde intensiteit per fase.

Omschrijving	Totaalaantal bewegingen
Aanlegfase:	
Licht verkeer	40
Zwaar vrachtverkeer	52

Bijlage B2: Stikstofdepositie als gevolg van het project

Aeriusberekening met kenmerk RvkCCjegsyz4 (30 april 2020) (dit is een snelkoppeling)

BIJLAGE C NATURA 2000 INSTANDHOUDINGSDOELEN

Legenda: SVI landelijk: Landelijke Staat van Instandhouding (-- zeer ongunstig; - matig ongunstig, + gunstig);
= Behoudsdoelstelling; > Verbeter- of uitbreidingsdoelstelling. Populatie: voor broedvogels is dit de draagkracht van het aantal broedpaar, voor niet-broedvogels de draagkracht voor het aantal exemplaren.

Waddenzee

Instandhoudingsdoel	SVI Landelijk	Oppervlak	Kwaliteit	Populatie
Habitattypen				
H1110A Permanent overstroomde zandbanken (getijdengebied)	-	=	>	
H1130 Estuaria	--	=	>	
H1140A Slik- en zandplaten (getijdengebied)	-	=	>	
H1310A Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)	-	=	=	
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	+	=	=	
H1320 Slijkgrasvelden	--	=	=	
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	-	=	>	
H1330B Schorren en zilte graslanden (binnendijks)	-	=	=	
H2110 Embryonale duinen	+	=	=	
H2120 Witte duinen	-	=	=	
H2130A Grijze duinen (kalkrijk)	--	=	=	
H2130B Grijze duinen (kalkarm)	--	=	>	
H2160 Duindoornstruwelen	+	=	=	
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	-	=	=	
Habitatrichtlijnsoorten				
H1014 Nauwe korfslak	-	=	=	=
H1095 Zeeprik	-	=	=	>
H1099 Rivierprik	-	=	=	>
H1103 Fint	--	=	=	>
H1364 Grijze zeehond	-	=	=	=
H1365 Gewone zeehond	+	=	=	>

Instandhoudingsdoel	SVI Landelijk	Oppervlak	Kwaliteit	Populatie
Broedvogels				
Duinen				
A081 Bruine kiekendief	+	=	=	30
A082 Blauwe kiekendief	--	=	=	3
A222 Velduil	--	=	=	5
Kwelders en stranden				
A034 Lepelaar	+	=	=	430
A063 Eider	--	=	>	5.000
A132 Kluut	-	=	>	3.800
A137 Bontbekplevier	-	=	=	60
A138 Strandplevier	--	>	>	50
A183 Kleine mantelmeeuw	+	=	=	19.000
A191 Grote stern	--	=	=	16.000
A193 Visdief	-	=	=	5.300
A194 Noordse stern	+	=	=	1.500
A195 Dwergstern	--	>	>	200
Niet-broedvogels				
Visetende soorten				
A005 Fuut	-	=	=	310
A017 Aalscholver	+	=	=	4.200
A034 Lepelaar	+	=	=	520
A069 Middelste zaagbek	--	=	=	150
A070 Grote zaagbek	+	=	=	70
A197 Zwarte stern	-	=	=	23.000^{max}
Duik- en grondeleenden				
A052 Wintertaling	-	=	=	5.000

Instandhoudingsdoel	SVI Landelijk	Oppervlak	Kwaliteit	Populatie
A053 Wilde eend	+	=	=	25.400
A054 Pijlstaart	-	=	=	5.900
A056 Slobeend	+	=	=	750
A067 Brilduiker	+	=	=	100
A051 Krakeend	+	=	=	320
A061 Kuifeend	--	=	>	
Naar schelpdieren duikende soorten				
A062 Topper	--	=	>	3.100
A063 Eider	+	=	=	90.000-115.000^{mid}
Kwelderfoerageerders				
A037 Kleine zwaan	-	=	=	1.600^{max}
A039b Toendrarietgans	+	=	=	-
A043 Grauwe gans	+	=	=	7.000
A045 Brandgans	+	=	=	36.800
A046 Rotgans	-	=	=	26.400
A050 Smient	+	=	=	33.100
Benthoseters				
A048 Bergeend	+	=	=	38.400
A130 Scholekster	-	=	=	140.000-160.000
A132 Kluut	+	=	=	6.700
A137 Bontbekplevier	--	=	=	1.800
A140 Goudplevier	+	=	=	19.200
A141 Zilverplevier	-	=	=	22.300
A142 Kievit	-	=	>	10.800
A143 Kanoet	-	=	=	44.400
A144 Drieteenstrandloper	+	=	=	3.700
A147 Krombekstrandloper	+	=	=	2.000^{max}

Instandhoudingsdoel	SVI Landelijk	Oppervlak	Kwaliteit	Populatie
A149 Bonte strandloper	--	=	=	206.000
A156 Grutto	+	=	=	1.100
A157 Rosse grutto	+	=	=	54.40020
A160 Wulp	+	=	=	96.200
A161 Zwarte ruiter	-	=	=	1.200
A162 Tureluur	+	=	=	16.500
A164 Groenpootruiter	--	=	>	1.900
A169 Steenloper	--	=	=	2.300-3.000
Roofvogels				
A103 Slechtvalk	--	=	>	40max

Noordzeekustzone

Instandhoudingsdoel	SVI Landelijk	Oppervlak	Kwaliteit	Populatie
Habitattypen				
H1110B Permanent overstroomde zandbanken (Noordzee-kustzone)	-	=	>	
H1140B Slik- en zandplaten (Noordzee-kustzone)	+	=	=	
H1310A Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)	-	=	=	
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	+	=	=	
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	-	=	>	
H2110 Embryonale duinen	+	=	=	
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	-	=	=	
Habitatrichtlijnsoorten				

[20] Enige afname in relatie tot herstel van schelpdierbanken is aanvaardbaar.

Instandhoudingsdoel	SVI Landelijk	Oppervlak	Kwaliteit	Populatie
H1095 Zeeprik	-	=	=	>
H1099 Rivierprik	-	=	=	>
H1103 Fint	--	=	=	>
H1351 Bruinvis	-	=	>	=
H1364 Grijze zeehond	-	=	=	=
H1365 Gewone zeehond	-	=	=	=
H1903 Groenknolorchis	--	=	=	=
Broedvogels				
Kwelders en stranden				
A137 Bontbekplevier	-	=	=	20
A138 Strandplevier	--	>	>	30
A195 Dwergstern	--	>	>	20
Niet-broedvogels				
Visetende soorten				
A001 Roodkeelduiker	-	=	=	behoud
A002 Parelduiker	?	=	=	behoud
A017 Aalscholver	+	=	=	1.900
Naar schelpdieren duikende soorten				
A062 Topper	--	=	=	behoud
A063 Eider	--	=	=	26.200
A065 Zwarte zee-eend	-	=	=	51.900
Benthoseters				
A048 Bergeend	+	=	=	520
A130 Scholekster	--	=	=	33.00
A132 Kluut	-	=	=	120
A137 Bontbekplevier	+	=	=	510
A141 Zilverplevier	+	=	=	3.200

Instandhoudingsdoel	SVI Landelijk	Oppervlak	Kwaliteit	Populatie
A143 Kanoet	-	=	=	560
A144 Drieteenstrandloper	-	=	=	2.000
A149 Bonte strandloper	+	=	=	7.400
A157 Rosse grutto	+	=	=	1.800
A160 Wulp	+	=	=	640
A169 Steenloper	--	=	=	160
A177 Dwergmeeuw	--	=	=	behoud

BIJLAGE D MONITORINGSPROGRAMMA

NAM document nummer: EP201403214360

31-03-2014

Monitoringprogramma 2014 t/m 2019 in het kader van de gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen

INLEIDING

1.1 Monitoringplan en -programma

In het kader van de gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen zijn vergunningen verleend op grond van de Natuurbeschermingswet (Nbwet) . In deze vergunningen is een monitoringplan opgenomen (zie bijlage 1). Dit monitoringplan is de basis voor het monitoringprogramma. Op 23 februari 2007 heeft de toenmalige minister van LNV het monitoringprogramma 2007-2012 goedgekeurd. Dit programma geldt voor een periode van 6 jaar. De monitoring over de jaren 2007-2012 is geëvalueerd in 2013. De Auditcommissie m.e.r. heeft de evaluatie beoordeeld en hierover op 5 maart 2014 een advies uitgebracht onder nummer 2796-83. Dit advies en de resultaten hiervan zijn verwerkt in het voorliggende monitoringprogramma 2014-2019. Het monitoringprogramma 2014-2019 past binnen het monitoringpplan 2007 en zal ter instemming worden voorgelegd aan het bevoegd gezag.

1.2 Gaswinning en bodemdaling

De gaswinning vanaf de locaties Moddergat (MGT), Lauwersoog (LWO) en Vierhuizen (VHN) kan effecten hebben op de Natura 2000 gebieden Waddenzee en Lauwersmeer. Omdat er geen installaties met betrekking tot opsporing of winning van aardgas in deze gebieden aanwezig zijn heeft de betreffende gaswinning alleen invloed op deze gebieden via bodemdaling.

Door sedimentuitwisseling tussen de Noordzeekustzone en de Waddenzee kunnen wadplaten ontstaan en groeien. Deze sedimentatiecapaciteit resulteert in een meegroeivermogen met de bodemdaling en relatieve zeespiegelstijging. Daling van wadplaten als gevolg van bodemdaling door gaswinning wordt dan ook niet verwacht. Vanuit de zorg dat wadplaten onder invloed van bodemdaling toch zouden kunnen krimpen vindt de gaswinning plaats volgens het ‘Hand aan de kraan’ principe. Daarbij wordt gestuurd op de abiotische parameter bodemdalingsnelheid. Bodemdaling in de diepe ondergrond kan leiden tot daling van het aardoppervlak met een snelheid van maximaal enkele mm’s per jaar in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. De bodemdalingssnelheid door gaswinning wordt bepaald op basis van een meet- en regelcyclus als opgenomen in het door de minister van Economische Zaken goedgekeurde Winningsplan MGT/LWO/VHN. Daarnaast vindt er een uitgebreide monitoring plaats van biotische en a-biotische parameters in de Waddenzee en het Lauwersmeergebied op basis van een door de toenmalige minister van LNV goedgekeurd monitoringprogramma 2007-2012. Deze monitoring moet er op gericht zijn te controleren of gaswinning vanaf de bovengenoemde locaties geen meetbaar nadelig effect heeft op de instandhoudingsdoelstellingen zoals beschreven in de Nota’s van toelichting op de aanwijzingsbesluiten voor de speciale beschermingzones Waddenzee (VHR-gebied) en Lauwersmeer (VR gebied). Deze instandhoudingsdoelen betreft een aantal habitattypen en doelsoorten, voornamelijk vogels.

In het monitoringprogramma worden 3 deelgebieden onderscheiden. Dit zijn de wadplaten, kwelder en het Lauwersmeergebied. Voor deze deelgebieden worden de relevante parameters gemonitoord. Deze worden in het voorliggende monitoringprogramma gepresenteerd.

1.3 Effectketenbenadering

Als bodemdaling door gaswinning invloed heeft op de natuur dan zijn veranderingen in het ecosysteem meetbaar. De eerste veranderingen treden op in abiotische systeemparameters, zoals bijvoorbeeld de grondwaterstand in het Lauwersmeergebied. Naar mate de invloed van bodemdaling op het abiotische systeem groter wordt, zullen zich ook meer veranderingen in de biotiek voordoen. Zo kunnen plantensoorten die een lagere grondwaterstand prefereren plaats maken voor soorten die beter bij een hogere grondwaterstand gedijen. Deze aaneenschakeling van effecten in het ecosysteem noemen we de effectketen. Het doel van de effectketenbenadering is om de doorwerking van bodemdaling in het ecosysteem te kunnen volgen tot aan de instandhoudingsdoelen. Omgekeerd moet voor een nadelig effect op de instandhoudingsdoelen kunnen worden vastgesteld of dit een effect is van bodemdaling door gaswinning of niet. Het is daarom belangrijk dat de effectketens voldoende specifiek zijn.

1.4 Hand Aan de Kraan

Het 'hand aan de kraan' (HAK) principe is ontwikkeld om te zorgen dat bodemdaling door gaswinning binnen vooraf vastgestelde grenzen blijft. Deze grenzen zijn de kombergingspecifieke sedimentatiecapaciteiten van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. De jaarlijkse zeespiegelstijging en bodemdaling door gaswinning mogen samen deze sedimentatiecapaciteit niet overschrijden. De NAM monitoort deze diepe bodemdaling door gaswinning en kan de bodemdalingsnelheid zonodig beperken door de productie uit de velden onder de Waddenzee te reduceren. Wetenschappelijk is aangetoond dat indien de natuurgrens niet wordt overschreden er geen meetbare nadelige effecten door gaswinning in de Waddenzee zijn te verwachten.

Ondanks de conservatief gekozen sedimentatiecapaciteit (natuurgrens) van respectievelijk 5 mm/jaar en 6 mm/jaar voor de kombergingen Zoutkamperlaag en Pinkegat, en de controle hierop via het HAK-principe, is er behoefte aan directe controle op de instandhoudingsdoelstellingen in het gebied dat onder invloed staat van de gaswinning. In het voorliggende monitoringprogramma wordt aangegeven op wat voor manier de ontwikkeling van deze instandhoudingsdoelstellingen gemonitoord wordt. Het hoofddoel van deze ecologische monitoring is aan te tonen dat er geen sprake is van een meetbare nadelige ontwikkeling van deze instandhoudingsdoelen. Wanneer toch uit de monitoring blijkt dat er sprake is van een nadelige ontwikkeling, dan dient aannemelijk te worden gemaakt dat dit niet het effect is van bodemdaling door gaswinning. Wanneer uit de data aannemelijk wordt dat de gaswinning wel de oorzaak is voor de nadelige ontwikkeling in het gebied dan dient hiervoor aan de hand van nader onderzoek een verklaring te worden gezocht en zo nodig met toepassing van het hand aan de kraan pricipe te worden ingegrepen.

1.5 Evaluatie 2007-2012

In de periode 2007 tot en met 2012 is bovenvermeld meet- en monitoringprogramma uitgevoerd. In 2013 heeft een evaluatie hiervan plaatsgevonden. Naast een aantal kleine aanpassingen zijn de hoofdpunten uit de evaluatie van de monitoring 2007-2012 de volgende:

- De jaarlijkse uitvoering van de Meet- en Regelcyclus werkt naar tevredenheid. De bodemdalingsnelheid vanwege de gaswinning blijft binnen de afgesproken gebruiksruimte. Er is geen reden om het systeem ten aanzien van de uitvoering van de Meet- en Regelcyclus aan te passen.
- Voor de monitoring van de wadplaathoogte met LIDAR is er nog discussie over de betrouwbaarheid van de veronderstelde meetnauwkeurigheid. Deze discussie moet op korte termijn beslecht worden. Daarnaast is het voorlopig nodig om parallel aan iedere

LIDAR-survey (§2.2.1) een *ground-truth* campagne door middel van hoogtemetingen ter controle en/of kalibratie uit te voeren.
- Voor de monitoring van de ontwikkeling van de wadplaten dient de bodemdieren data geïntegreerd met de wadplaathoogtemetingen te worden geanalyseerd. Hiervoor is een op voorhand vastgestelde meet- en analyse strategie onontbeerlijk.
- De monitoring voor de kwelder werkt naar tevredenheid, alleen de inpassing van de broedvogels in de effectketen is zwak. Omdat binnen het kader van de Amelandmonitoring de relatie tussen bodemdaling en kwelderbroedvogels nader wordt onderzocht, kan in de onderhavige monitoring het onderzoek naar effecten op broedvogels mogelijk worden beperkt.
- Het monitoringprogramma voor het *Lauwersmeergebied* zal naar het zuidelijke deel van het gebied moeten worden uitgebreid.
- In de effectketen van het Lauwersmeergebied mist de koppeling tussen vegetatie en vogels. Met deze koppeling zal in de toekomst rekening moeten worden gehouden.

1.6 Belangrijkste aanpassingen monitoringprogramma 2014-2019

Op basis van de uitkomsten van de evaluatie 2007-2012, de adviezen van de Auditcommissie m.e.r. en gesprekken/workshops met de betrokken onderzoekers is onderhavig Monitoringprogramma 2014-2019 opgesteld. (In 2013 is het monitoringprogramma 2007-2012 nog onverkort voortgezet).

In dit monitoringprogramma worden drie deelgebieden onderscheiden. Dit zijn de wadplaten in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag, de kwelder Peasemerlannen en het Lauwersmeergebied. De monitoringactiviteiten worden in dit programma per deelgebied gepresenteerd.

De wijzigingen die ten opzichte van het oude monitoringprogramma zijn aangebracht leiden tot meer focus en integratie van gemonitoorde variabelen in relatie tot instandhoudingsdoelen volgens de betrokken Natura 2000 gebieden en tot uitbreiding van het programma. Voor het onderdeel wadplaten werden de gemonitoorde variabelen vogels, bodemdieren en sedimentatie afzonderlijk geanalyseerd in relatie tot referenties in tijd en ruimte. De analysestrategie van het nieuwe monitoringprogramma is om deze variabelen eerst te integreren tot een variabele die zo goed mogelijk de instandhoudingsdoelen representeert en vervolgens diens relatie met bodemdaling te analyseren. Zo wordt de focus op de instandhoudingsdoelen expliciet gemaakt (zie ook bijlage 1). Ten bate van een goede integratie van de montoringgegevens is het wenselijk de aantallen trekvogels beter te schatten. Hiervoor worden de bestaande vogeltelling nabij het Peasemerwad aangevuld.

In het oude monitoringprogramma van het Lauwersmeergebied lag de nadruk op het monitoren van de ontwikkeling van enkele vegetatietypes. De Lauwersmeer is echter een vogelrichtlijngebied met instandhoudingsdoelen voor vogelsoorten en niet voor vegetatietypes of habitattypes. De analysestrategie van het nieuwe monitoringprogramma is daarom gefocust op het analyseren van de variatie in vegetatiestructuren die bepalend zijn voor het habitatareaal van Natura 2000 doelsoorten (zie ook bijlage 2). Omdat de vegetatiemonitoring alleen in het noordelijke deel en de vogeltelling grotendeels in het zuidelijke deel van het gebied plaatsvonden, zijn beide inventarisaties uitgebreid. In het nieuwe programma worden alle metingen verspreid over het gehele gebied en in dezelfde deelgebieden uitgevoerd. Hierdoor wordt koppeling van de gegevens in tijd en ruimte mogelijk.

De monitoring en analysestrategie van de Peasemerlannen verliep naar tevredenheid en wordt daarom onveranderd doorgezet. Het voornaamste punt van aandacht bij de kweldermonitoring is de verandering in het beheer van de kwelder of diens referentiegebied. In het nieuw

monitoringprogramma wordt daarom meer dan één referentiegebied aangehouden. Voor de analysestrategie voor de kweldervegetatie wordt verwezen naar het rapport van Van Duin *et al*. (2013) (ref. 13).

Met het inwerking treden van het nieuwe monitoringprogramma gaan er geen opgebouwde meetreeksen verloren. Alleen voor het Lauwersmeergebied is de tot dusver verzamelde data slechts in beperkte mate (alleen in deelgebieden) geschikt voor het monitoren van de instandhoudingsdoelen.

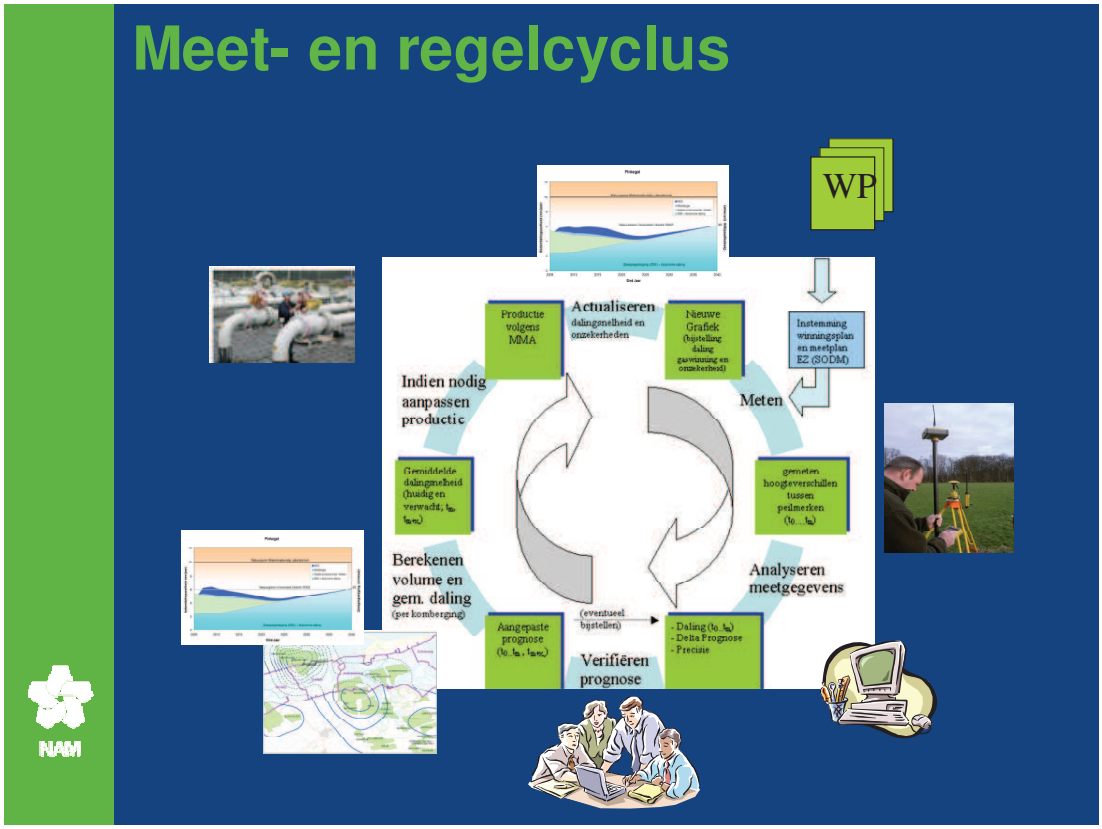
Voor een meer gedetailleerd beeld over de wijze waarop rekening is gehouden met het advies van de auditcommissie d.d. 5 maart 2014, zie bijlage 3.

1.7 Meet- & Regelcyclus

De beschrijving van de Meet – en regelcyclus is opgenomen in het vigerende winningsplan MGT/LWO/VHN. Het doel van het doorlopen van deze jaarlijkse cyclus is om aan te tonen dat de diepe bodemdalingsnelheid in de Waddenzee door gaswinning binnen vooraf bepaalde grenzen blijft (Fig 1). Daarnaast vormt de diepe bodemdaling, die a.d.h.v. de Meet & Regelcyclus in beeld wordt gebracht, de basis van de effectketen. De metingen betreffen:

- Continue metingen m.b.v. 3 permanente GPS-stations (AME, ANJ, MGT)
- Eens per 3 jaar GPS-campagne peilmerkclusters in Waddenzee,
- Eens per 3 jaar GPS peilmerken Lauwersmeer
- Eens per 3 jaar rapportage van waterpassingen en InSAR rond Lauwersmeer
- Eens per 3 jaar waterpassing op Ameland
- Eens per 3 jaar waterpassing op Schiermonnikoog
- Eens per 3 jaar GPS-campagne op de 2 ameland platformen (mogelijk permanente installatie, dus continue meting vanaf 2014)

Het Meet- en Regelprogramma is uitgewerkt in het Meet- en regelprotocol (22-01-2007) en komt in dit monitoring programma niet verder aan bod.



Figuur 1: Weergave van het proces achter de zgn. Meet- en Regelcyclus. In het vergunde winningplan voor de MLV winningen wordt aangegeven dat de aardgasproductie een bodemdalingsnelheid zal veroorzaken die binnen de sedimentatiecapaciteit (gebruiksruimte) voor de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag blijft. Jaarlijks zijn er meet campagnes op basis waarvan de voortgang en de snelheid van de diepe bodemdaling worden vastgesteld. Deze meetgegevens worden geanalyseerd in geomechanische modellen op basis waarvan de diepe bodemdalingkom ruimtelijk wordt berekend, de dalingsnelheid in de diepe ondergrond wordt bepaald en voorspellingen voor de toekomst worden gemaakt. Deze resultaten worden terug gerapporteerd aan het bevoegd gezag en, indien nodig, kan de productiesnelheid worden aangepast. Zo is de cyclus rond.

MONITORINGPROGRAMMA 2014 t/m 2019

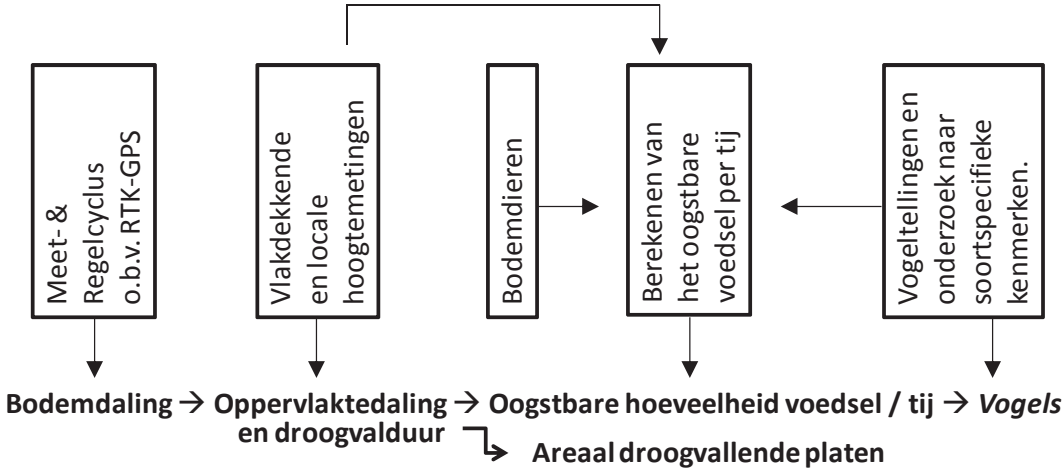
2. WADPLATEN

In de paragraven 2.1. tot en met 2.1.7 wordt de achtergrond en voorgestelde analyse van de wadplaatmonitoring uiteen gezet. Een schematisch overzicht van de analysestrategie voor het monitoringprogramma wadplaten is opgenomen in bijlage 1. De paragraven 2.2 tot en met 2.2.7 gaan in op de afzonderlijke monitoringonderdelen.

2.1. Monitoring Wadplaten

In het onderdeel wadplaten gaat het om het monitoren van twee types instandhoudingsdoelen. Dat zijn het areaal/droogvalduur 'droogvallende slik en zandplaten' en de functie van deze wadplaten als foerageergebied voor een aantal vogelsoorten (Natura 2000 doelsoorten). In het aanwijzingsbesluit Waddenzee spreekt men over de draagkracht van het gebied voor een bepaalde hoeveelheid vogels. Omdat de vogels de wadplaten gebruiken om te foerageren en omdat gaswinning enkel effect op dit foerageren heeft via bodemdaling, is voor deze studie de term draagkracht vertaald naar de parameter 'Oogstbare hoeveelheid voedsel per tij'. Deze parameter is vogelsoort specifiek. Hij is opgebouwd uit de biomassa en kwaliteit van de groep benthossoorten die onderdeel uitmaken van het dieet van de vogelsoort, en de bereikbaarheid van deze biomassa voor de vogels. Het is dus een parameter waarin de voedseldichtheid, de wadplaathoogte en een reeks vogelsoortspecifieke parameters zijn geïntegreerd. Dit is naderuitgewerkt in paragraaf 2.1.4.

De cascade van diepe bodemdaling tot de instandhoudingsdoelstellingen van de Waddenzee wordt de "effectketen" genoemd. De monitoringdoelstellingen van deze effectketen worden in de onderstaande paragraven nader toegelicht (§ 2.1.2). Uitgangspunt bij de keuze van de te monitoren en te onderzoeken parameters is dat ze de effectketen volgen of nodig zijn om veranderingen in de oogstbare hoeveelheid voedsel per tij van de wadplaten te kwantificeren. Naar aanleiding van de uitgevoerde evaluatie, het advies van de Auditcommissie m.e.r. en betrokken onderzoekers is de effectketen voor de wadplaten weergegeven zoals gepresenteerd in figuur 2.



Figuur 2: Effectketen wadplaten (vet gedrukt) en de daaraan gekoppelde monitoring en onderzoek (in de kaders). De pijlen geven de koppeling tussen de onderdelen weer. Het areaal droogvallende platen is apart weergegeven omdat dit een apart instandhoudingsdoel is. Het andere instandhoudingsdoel wordt bepaald door de oogstbare hoeveelheid voedsel per tij van het gebied voor een aantal soorten vogels (N2000 doelsoorten).

2.1.2 Monitoringdoelstellingen voor de wadplaten

Doel 1: Stel vast of er sprake is van een nadelige ontwikkeling van het instandhoudingsdoel 'oogstbare hoeveelheid voedsel per tij' voor verschillende Natura 2000 vogelsoorten in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag.

Doel 2: Stel vast of de onder doel 1 genoemde nadelige ontwikkeling veroorzaakt wordt door, of gecorreleerd is aan daling van de wadplaathoogte in het gebied.

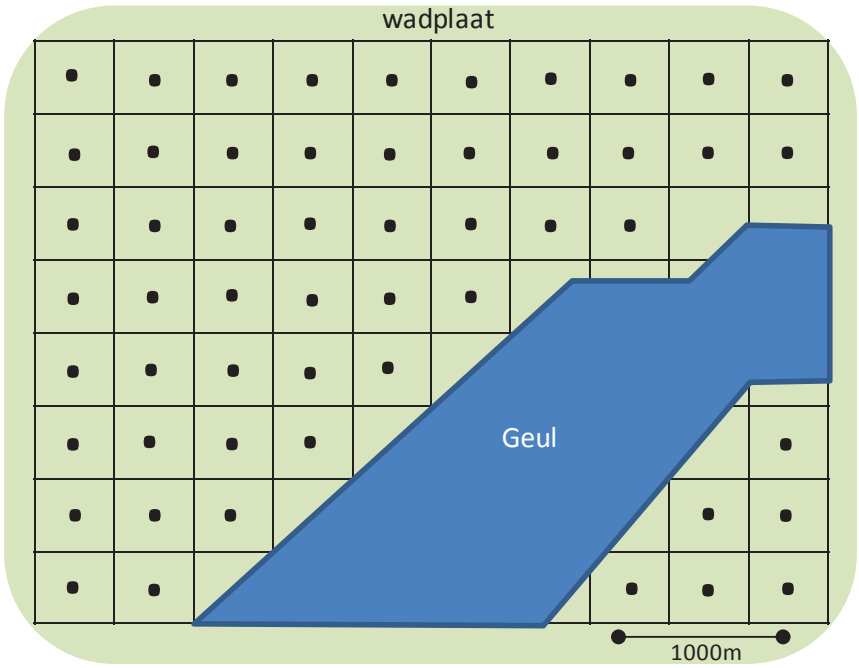
Doel 3: Stel vast of de onder doel 2 genoemde variatie in wadplaathoogte correleert met de mate van diepe bodemdaling. Doe dit door de variatie in wadplaathoogte in Pinkegat en Zoutkamperlaag met andere kombergingen te vergelijken of door binnen deze kombergingen de daling van de wadplaathoogte met de mate van diepe bodemdaling te correleren.

2.1.3 Monitoring op basis van een regelmatig grid

In de evaluatie (ref. 1) wordt aangegeven dat monitoring van deelgebieden nodig is om tot de juiste nauwkeurigheid van meten te kunnen komen en de verschillende variabelen (e.g. sedimentatie en benthos) op dezelfde geografische en temporele schaal te kunnen aggregeren. Een kernvraag hierbij is wat het gewenste schaalniveau moet zijn waarop gemonitoord zou moeten worden, Is het beter te monitoren in deelgebieden waarin de monitoringinspanning wordt geconcentreerd, of prefereren we een regelmatig grid, waarbij de monitoringinspanning gelijkmatig over het onderzoekgebied wordt verdeeld? In het eerste geval is het mogelijk nauwkeurigere schattingen van het voedselbestand per locatie te maken. Het tweede geval heeft als voordeel dat de steekproefnauwkeurigheid veel groter is.

De betrouwbaarheid waarmee de wadplaathoogte en het voedselbestand gemiddeld over het hele komberginggebied bepaald zal worden, hangt af van zowel de variatie tussen deelgebieden als de variatie binnen deelgebieden. Wanneer we de wadplaten in Pinkegat en Zoutkamperlaag opdelen in vakken van 500x500 meter kunnen we verschillende bemonsteringstrategieën hanteren. De eerste optie is dan het bezoeken van een heel beperkt aantal van deze deelgebieden en een groot aantal metingen/monsters per deelgebied te nemen. De tweede optie is alle deelgebieden te bezoeken, maar slechts één steekbuis per deelgebied te nemen. Uit al het eerder onderzoek naar de efficiëntie van benthosbemonsteringen komt naar voren dat de tweede optie te verkiezen valt (Zie bijvoorbeeld 'two-stage sampling' in Thompson, 1992; ref. 8). De reden is dat de bijdrage aan de nauwkeurigheid van de uiteindelijke schatting op conto van de binnen-deelgebied variantie afhangt van het totaal aantal steekbuizen dat genomen wordt (en dat is gelijk voor beide opties), maar dat de bijdrage op conto van de tussen-deelgebied variantie bepaald wordt door het aantal deelgebieden dat bezocht wordt (en dat is bij de tweede optie vele malen hoger). Eerdere studies komen dan ook tot de aanbeveling om zoveel mogelijk deelgebieden te bezoeken met zo weinig mogelijk inspanning per deelgebied (ref. 7 en 9).

Deze overwegingen hebben geleid tot de volgende aanpak:
Het droogvallend wad in Pinkegat en Zoutkamperlaag (boven -50 cm NAP) wordt verdeeld in gridcellen van 500x500 meter (Fig. 3). In iedere gridcel ligt minimaal 1 monsterpunt voor bodemdieren en sedimentsamenstelling. Per gridcel wordt op basis van de LIDAR-data zo nauwkeurig mogelijk de gemiddelde wadplaathoogte berekend. Deze variabelen zijn input voor een ecologisch model dat de oogstbare hoeveelheid voedsel per tij en het areaal geschikt foerageergebied zal schatten. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 2.1.4.



Figuur 3: Schematische weergave van de vergridding van het wad. Uit iedere gridcel wordt minimaal één benthosmonster genomen. Op deze wijze is het droogvallende wad van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag bedekt met gridcellen. Per gridcel wordt jaarlijks de gemiddelde wadplaathoogte bepaald.

2.1.4 Parameters voor analyses wadplaten

De parameters die per gridcel (Fig. 3) nodig zijn voor de analyses zijn de wadplaathoogte en de oogstbare hoeveelheid voedsel per tij. De gemiddelde wadplaathoogte wordt per gridcel bepaald aan de hand van LIDAR-opnames §2.2.1. De oogstbare hoeveelheid voedsel per tij is een combinatie van een dieet- en seizoenafhankelijk voedselbestand. Dit bestand wordt geschat op basis van locatiespecifieke metingen (vaste meetpunten op een grid; zie figuur 3) en van vogelsoort specifieke kenmerken. Daarnaast spelen de geografische ligging, de morfologie van de omgeving en de droogvalduur per monsterpunt een rol in het bepalen van deze parameter. In totaal gaat het om de volgende variabelen en kenmerken:

<u>Gridcel specifieke variabelen</u>

- Prooidichtheid (voedselbestand)
- Profijtelijkheid (kwaliteit, soortsamenstelling, conditie)
- Beschikbaarheid (prooidiepte, droogvalduur, ligging t.o.v. geul / HVP)
- Habitatkenmerken (bijvoorbeeld de sedimentsamenstelling)

<u>Vogelsoort specifieke kenmerken</u>

- Dieet
- Functionele respons = de intake rate / digestion rate
- Habitatvoorkeur

De functionele respons in combinatie met de droogvalduur leidt ertoe dat een locaal voedselbestand (aantal + biomassa per oppervlak) kan worden "vertaald" naar een voedselbeschikbaarheid per getijdenperiode. Dit levert een aantal locaties op waarvoor de dagelijkse voedselbehoefte kan worden gehaald. Dat is feitelijk een areaal. De ontwikkeling van

de grootte van dat areaal is ook een maat waarop de geschiktheid van de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag voor foeragerende doelsoorten kan worden uitgedrukt.

Voor een nader vast te stellen aantal Natura 2000 doelsoorten wordt de bovengenoemde kennis gebruikt als input voor een ecologisch model. Op basis van voortschrijdend inzicht (kennis over vogels en prooidieren) kunnen de berekeningen jaarlijks worden aangepast en elk jaar opnieuw worden berekend voor alle voorgaande jaren. De soortspecifieke modeluitkomst (de oogstbare hoeveelheid voedsel per tij) is een relatieve maat voor de ecologische ruimte per vogelsoort. Deze hoeveelheid is ongeschikt als maat voor de feitelijk beschikbare hoeveelheid voedsel, maar veranderingen erin kunnen wel iets zeggen. Bijvoorbeeld: neemt de droogvallende hoeveelheid kokkels en mossels toe dan verwacht je in het algemeen ook gunstiger condities voor (bijvoorbeeld) overwinterende scholeksters.

Voor de scholekster is de relatie tussen voedseldichtheid en bereikbaarheid uitgewerkt in het simulatiemodel Webtics. In dit model wordt bovendien de relatie gelegd met de voedselbehoefte van de scholekster. Voor de scholekster biedt Webtics de mogelijkheid na te gaan wat de relatieve betekenis is van rijke en arme foerageergebieden die op basis van de oogstbare hoeveelheid voedsel worden gedefinieerd.

2.1.5 De temporele variatie in wadplaathoogte

Bodemdaling door gaswinning is een traag proces met een snelheid die maximaal enkele millimeters per jaar betreft. Belangrijk is of de variatie in wadplaathoogte het gevolg is van diepe bodemdaling is dan ook de snelheid waarmee de verandering optreedt. Bijvoorbeeld in hoeverre de variatie in wadplaathoogte proportioneel is met de mate van diepe bodemdaling in dezelfde periode of met het bodemdalingvolume. Plotselinge veranderingen in wadplaathoogte zijn te verwachten als gevolg van gebeurtenissen zoals zware stormen. Een voorbeeld van het effect van een zware storm op het sedimentatieproces op het wad wordt gegeven in Krol, 2014 (ref. 10) en analoog voor de zeereep van oost Ameland in Slim et al. 2013 (ref. 11). Om de invloed van dergelijke gebeurtenissen aan te kunnen tonen dient de wadhoogte frequent gemeten te worden op verschillende locaties in Pinkegat en Zoutkamperlaag. Alleen op basis van frequente metingen met een voldoende mate van temporele autocorrelatie en een zekere ruimtelijke spreiding kan onderscheid worden gemaakt tussen de invloed van plotselinge (mogelijk tijdelijke) of gestage daling van de wadplaathoogte.

Het frequent meten van de wadplaathoogte wordt gedaan aan de hand van de zogenaamde spijkermetingen (§ 2.2.4). Dit zijn metingen die tot enkele millimeters nauwkeurig de variatie in sedimenthoogte op een locatie kunnen vastleggen. In een aantal van de geselecteerde gebieden (wadplaten) is een onregelmatig grid over deze monsterpunten neergelegd. De verschillende spijkermetingen op een wadplaat geven samen een beeld van de gemiddelde hoogte of hoogteverandering van zo'n wadplaat. Op basis van lopende spijkermetingen is variatie in wadplaathoogte tussen twee opvolgende jaren voor een aantal wadplaten vastgesteld. Hieruit blijkt dat de ontwikkeling van deze platen onderling varieert met een standaard deviatie van ca. 1,3 cm. Uitgaand van een monitoring van 8 wadplaten ligt de detecteerbare effectgrootte (verschil tussen jaren) op <2 cm.

Omdat de spijkermetingen op de stabielere delen van de wadplaten liggen geven ze geen beeld van het erosie/sedimentatieproces op de randen van de platen of andere hoogdynamische delen van het wad. De locaties waar spijkermetingen worden uitgevoerd zijn weergegeven in figuur 6. Dit jaar worden hier de wadplaten Brakzand en op het wad boven Ferwert aan toegevoegd.

2.1.6 Vogeltellingen op HVP's

Vogeltellingen op HVP's in Pinkegat en Zoutkamperlaag spelen een rol in het schatten van de oogstbare hoeveelheid voedsel per tij. Op basis van de vogeltellingen wordt namelijk de

foerageerperiode bepaald. Daarnaast kan per vogelsoort, per HVP, de oogstbare hoeveelheid voedsel worden gecorreleerd aan het aantal vogels per periode. Dit leert ons in hoeverre en voor welke soorten het aantal afhangt van de oogstbare hoeveelheid voedsel. Vogelsoorten waarvan de aantallen een sterke correlatie vertonen met de oogstbare hoeveelheid voedsel zijn gevoeliger voor locale nadelige effecten op hun voedselbron.

2.1.7 Wadplaathoogte en diepe bodemdaling

Indien er sprake is van een daling van de wadplaathoogte in Pinkegat en Zoutkamperlaag, dan zal worden beoordeeld of en in hoeverre deze wadplaatdaling met het proces van diepe bodemdaling correleert. Hiervoor wordt bestudeerd of A) er ook sprake is van daling in andere kombergingen in de Waddenzee; B) de oppervlakte daling ruimtelijk correleert met de diepe bodemdaling contouren; C) de oppervlakte daling proportioneel is aan de diepe bodemdaling of veroorzaakte bodemdalingvolume; D) de oppervlakte daling temporeel correleert met een gebeurtenis zoals een zware storm.

A Vergelijking van de variatie in wadplaathoogte in Pinkegat en Zoutkamperlaag met andere kombergingen in de Waddenzee vindt plaats a.d.h.v. de LIDAR-data van de NAM en RWS. Omdat de LIDAR-metingen van RWS eens per zes jaar verzameld worden, gaat het hier om vergelijkingen over een periode van zes jaar. Deze analyse wordt aan het eind van iedere monitoring- en lodingcyclus uitgevoerd.

B & C De correlatie tussen de diepe bodemdaling (ΔD_d) en de variatie in wadplaathoogte (Δh) vindt plaats op basis van waterpassingen die worden uitgevoerd bij de GPS-klusters (Fig. 5).op het moment dat daar ook de diepe bodemdaling wordt bepaald. In deze analyses zal de mogelijke invloed van gebeurtenissen worden onderzocht. Hierbij kan gedacht worden aan de invloed van een zware storm (E_t) op de resultaten: $\Delta D_d \sim \Delta h + E_t + \varepsilon$

D De invloed van gebeurtenissen, zoals een zware storm, kan in beeld worden gebracht aan de hand van de spijkermetingen. Analyse van de spijkermetingen geeft aan in hoeverre de waargenomen daling van de wadplaathoogte onderdeel is van een gestage trend of plotselinge gebeurtenis.

2.2 Monitoringonderdelen wadplaten

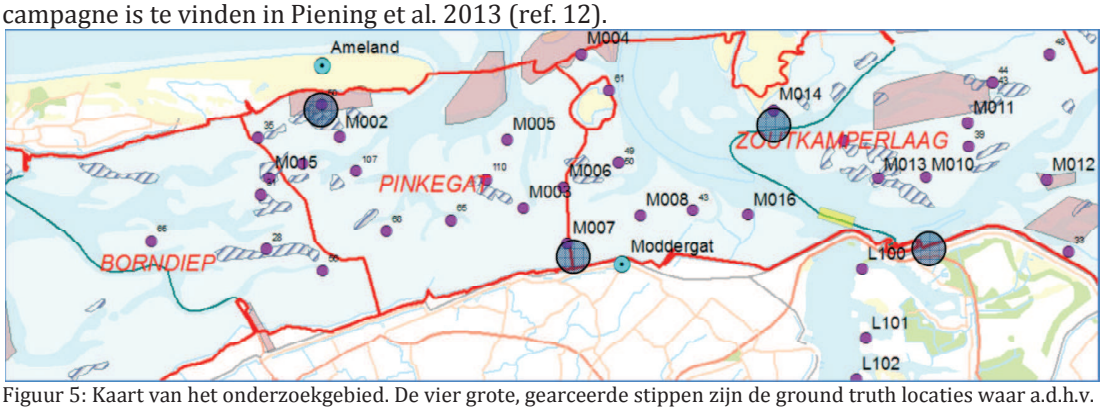
2.2.1 Wadplaathoogte

Het doel van de vlakdekkende hoogtemetingen is enerzijds om jaarlijks een goed beeld te krijgen van de ontwikkeling van het areaal wadplaten. Anderzijds wordt per gridcel (Fig. 3) jaarlijks de gemiddelde wadplaathoogte geschat. Omdat de wadplaten als gevolg van getijdenstromen en golfwerking continu onderhevig zijn aan sedimentatie en erosie is het nodig frequenter dan één maal per jaar een meting uit te voeren. Spijkermetingen laten zien hoe gedurende het voorjaar en de zomer sedimentatie dominant is en gedurende het najaar en de winter erosie optreedt (ref. 10). Vlakdekkende hoogtemetingen worden daarom aan het begin van de sedimentatieperiode en aan het begin van de erosieperiode uitgevoerd.

Vlakdekkende hoogtemetingen vinden plaats aan de hand van de best beschikbare techniek. Op dit moment gebeurt dit aan de hand van LIDAR. LIDAR staat voor Laser Imaging Detection And Ranging. Het is een techniek waarbij met laser pulsen de afstand tot een object wordt bepaald. In dit geval gaat het daarbij om de afstand tussen een vliegtuig en de wadplaten (Fig. 4).

Figuur 4: Vluchtlijnen voor het uitvoeren van de LIDAR-opname in Pinkegat en Zoutkamperlaag (geel). De blauwe vluchtlijnen dienen ter controle en kalibratie van de LIDAR-opname. Deze lijnen verbinden vaste reflectiepunten op het land waarvan de hoogte bekend is. Ontleend uit . FUGRO rapport ASM11085.

Ter controle van de LIDAR-opnames worden ook op de wadplaten zogenaamde ground-truth surveys uitgevoerd. Dit vindt plaats op vier locaties, parallel aan iedere LIDAR-meting (Fig. 5). Wanneer de LIDAR-opnames de gewenste consistentie bereiken kan met de ground truth metingen op het wad worden gestopt. De controle grids op het land blijven wel nodig voor de absolute plaatsbepaling van de gemeten wadhoogtes. Het protocol voor deze ground truth campagne is te vinden in Piening et al. 2013 (ref. 12).



Figuur 5: Kaart van het onderzoekgebied. De vier grote, gearceerde stippen zijn de ground truth locaties waar a.d.h.v. RTK-GPS metingen de wadhoogte wordt bepaald. De kleinere blauwe stippen zijn de GPS-klusters op basis waarvan de diepe bodemdaling wordt gemonitoord. Naast de GPS-klusters worden op de wadplaten de waterpassingen verricht. Ontleend uit Piening *et al.* 2013.

2.2.2 Satellietbeelden

Radarsatellietbeelden van het wad tijdens de laagwaterperiode kunnen na correctie voor de gemeten waterstand een beeld geven van het areaal droogvallende platen. Opnames bij verschillende waterstanden geven mogelijk ook een beeld van de hoogteverdeling van het areaal. Omdat er gedurende een jaar een groot aantal satellietbeelden beschikbaar is, heeft deze techniek de potentie een representatief jaargemiddelde van het wadplaten areaal te schatten. Bovendien leveren deze opnames een beeld van alle kombergingen in de Waddenzee waardoor veranderingen in Pinkegat en Zoutkamperlaag met de rest van het waddengebied vergeleken kunnen worden. Gedurende de tweede monitoringcyclus wordt de nauwkeurigheid en bruikbaarheid van deze techniek onderzocht en, indien bruikbaar, verder geoptimaliseerd.

2.2.3. Lodingcyclus RWS

De morfologische ontwikkeling in de Waddenzee wordt gemonitoord in opdracht van Rijskwaterstaat. Deze monitoring wordt de 'lodingcyclus' genoemd. Gedurende een 6-jarige cyclus wordt a.d.h.v. zgn. vaklodingen een hoogte/dieptekaart van de Waddenzee en de Noordzeekustzone gemaakt. In het sublitoraal bestaan vaklodingen uit sonar opnames. De hoogteverdeling van het litoraal wordt a.d.h.v. LIDAR-opnames bepaald (zie paragraaf 2.1.1.1). Dit resulteert in een hoogtekaart voor iedere komberging eens per 6 jaar. Van deze monitoring is een historische dataset beschikbaar op basis waarvan de historische dynamiek kan worden bestudeerd. Vergelijking van de variatie in de geomorfologie in kombergingen onder invloed van bodemdaling met de ontwikkeling van de andere kombergingen in de Waddenzee, maakt inzichtelijk of de aangetroffen variatie binnen het Pinkegat en de Zoutkamperlaag valt binnen de natuurlijke dynamiek.

2.2.4 Spijkermetingen

Spijkermetingen zijn metingen waarbij een zogenaamd grondanker in de wadbodem wordt geplaatst op ca. 1m diepte. Aan dit anker is een lijntje bevestigd met aan het eind een labeltje. De afstand tussen het sedimentoppervlak en het labeltje wordt bepaald met een liniaal. Op deze wijze kan de locale variatie in wadplaathoogte op enkele millimeters nauwkeurig worden gemonitoord. Spijkermetingen worden 5x per jaar uitgevoerd een aantal wadplaten (Fig. 6). Het aantal metingen per wadplaat varieert van 19 en 18 onder de oostpunt van Ameland en Paesens tot ca. 7 op de andere locaties.

Figuur 6: locaties waar spijkermetingen worden uitgevoerd. De gele cirkels zijn indicatief voor de ligging van de bodemdalingcontouren (diepe bodemdaling). Ontleend uit Krol 2014 (ref. 10).

2.2.5 Waterpassingen op de wadplaten

Sinds 2010 worden nabij de GPS clusters terrestrische maaiveldmetingen uitgevoerd. Hierbij is een grid uitgezet van 9x5 punten of 7x5 punten, welke op een onderlinge afstand van 5m liggen. De horizontale positie wordt met GPS bepaald, terwijl de maaiveldhoogte middels waterpassing wordt verkregen. Hiervoor wordt de hoogte van de GPS-peilmerken als referentie gebruikt om te komen tot een NAP-hoogte van de gridpunten op het maaiveld. Daar waar de bodem zacht is (slib) wordt de meetbaak voor waterpassing voorzien van een brede voet, zodat deze niet kan wegzakken in het zand van de wadplaat. De nauwkeurigheid van de waterpassing voor deze relatief korte afstanden is ~1mm. Afhankelijk van de gesteldheid van de bodem, zal de absolute nauwkeurigheid per meetpunt < 1cm bedragen.

2.2.6 Bodemdiereninventarisatie

Bodemdieren worden geïnventariseerd aan de hand van puntmonsters op droogvallende platen. Deze bemonstering wordt uitgevoerd op een 500x500 meter grid en vormt de basis van

de in paragraaf 2.1.4 beschreven data-analyse. Indien mogelijk wordt voor dit monitoringonderdeel aansluiting gezocht bij een lopende Waddenzeebrede bodemdiereninventarisatie. Dit biedt de mogelijkheid de variatie in Pinkegat en Zoutkamperlaag met andere kombergingen te vergelijken. De kombergingbrede bodemdiereninventarisatie vindt plaats in de zomer.

Naast deze puntbemonstering (Fig. 3) wordt het aandeel mossel/oesterbanken aan gridcellen toegekend. Deze biogenestructuren worden reeds gekarteerd en bepalen in sterke mate wat de oogstbare hoeveelheid per tij is voor een deel van de Natura 2000 doelsoorten.

De essentie van de bodemdierenmonitoring is het schatten van het voedselbestand voor vogels. Het inventariseren van de "macrofauna" op soortniveau is daarbij niet altijd noodzakelijk. In dit monitoringprogramma wordt de focus gelegd op diëten van vogelsoorten. Hiervoor wordt het volgende taxonomische niveau aangehouden.

1) Schelpdieren. Bivalvia worden daarbij op soortniveau gedetermineerd. Bovendien wordt per soort een grootteklasse verdeling gemaakt. Gastropoda worden op familieniveau gedetermineerd. Per taxonomische eenheid wordt de biomassa vastgesteld.
2) Wormen. Polychaeta worden minimaal op familieniveau gedetermineerd. Per taxonomische eenheid wordt de biomassa bepaald.
3) Kreeftachtigen. Crustacea worden op familiniveau gedetermineerd. Per taxonomische eenheid wordt de biomassa bepaald. Voor krabachtigen met een schildbreedte groter dan 20mm wordt de biomassa apart bepaald. Sessiele crustacea, zoals bijvoorbeeld zeepokken, kunnen buiten beschouwing worden gelaten.

Net als voor de kreeftachtigen en schelpdieren kan het nuttig zijn om wormen in grootteklassen te onderscheiden. Als onderdeel van een studie naar de gebiedspecifieke dieetwensen (en andere kenmerken) van vogelsoorten zal dit jaar een keuze worden gemaakt over het detailniveau waarop het voedselbestand zal worden gemonitoord.

2.2.7 Vogeltellingen op HVP's

Voor de vogeltellingen op de HVP's in Pinkegat en Zoutkamperlaag wordt aansluiting gezocht bij de bestaande monitoring die door SOVON wordt gecoördineerd. Op Ameland zijn deze tellingen uitgebreid met als doel de piekperiode en -aantallen goed te kunnen schatten. Ook voor de HVP's bij het Paezummerwad zullen deze metingen om dezelfde reden tijdens de voor- en najaartrek met enkele tellingen worden uitgebreid.

3 KWELDERS

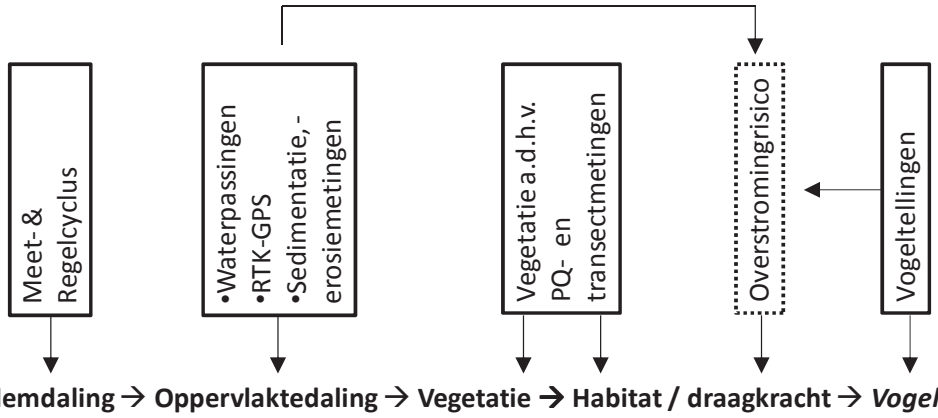
De habitattypen *Pionierbegroeiingen* H1310 en *Schorren en zilte graslanden* H1330 vormen de kwelders van de Waddenzee. Het doel van het beheer van deze kwelders is de diversiteit in de geomorfologie en de kweldervegetatie met alle successiestadia te behouden en te ontwikkelen. De natuurlijke ontwikkeling (successie) van de kwelder leidt echter tot veroudering en verruiging van deze habitats als gevolg van opslibbing, ontwikkeling van vegetatie en verlanding. Om deze ontwikkeling tegen te gaan worden kwelders beweid met schapen, paarden en koeien en wordt de morfologie van kwelders aangepast zodat de zee periodiek het gebied kan blijven overspoelen.

3.1 De Peasemerlannen

Ook onder de kwelder vindt bodemdaling plaats. Als de kwelder mee daalt kan dit tot veranderingen in de hydrologie (drainage) en de overstromingfrequentie leiden. Uit de monitoring van de sedimentatie op de vaste land kwelders blijkt dat de sedimentatiesnelheid gemiddeld groter is dan de bodemdaling die optreedt als gevolg van gaswinning. Alleen op de

hoge kwelder onder Ameland heeft bodemdaling duidelijk geleid tot vernatting. Tot dusver blijkt dat bodemdaling geen nadelige effect op de ontwikkeling van de kwelder heeft. Locale regressie van de kwelder van Ameland draagt bij aan het natuurlijk kwelderbeheer. Wat onzeker is, is of er door bodemdaling in de loop der jaren een toename van het overstromingrisico voor nesten in de broedperiode zal optreden.

De monitoring van de invloed van bodemdaling op de Paezummerlannen vindt plaats a.d.h.v. een effectketenbenadering (Fig. 7), waarbij een deel van de Groninger kwelder die niet onder invloed staat van diepe bodemdaling als referentiegebied wordt bestudeerd.



Figuur 7: Effectketen kwelder (vet gedrukt) en de daaraan gekoppelde monitoringonderdelen (in de kaders). Het gestippelde kader "overstromingrisico" wordt berekend uit de metingen voor oppervlaktedaling en niet apart gemeten. De pijlen geven de koppeling tussen de onderdelen weer. De schakels "Habitat / draagkracht" vormen de instandhoudingsdoelen.

De studie concentreert zich op de vraag of diepe bodemdaling meetbaar is aan het oppervlak, of in hoeverre de sedimentatie (opslibbing) de bodemdaling compenseert. Netto daling van het maaiveld wordt op dit moment alleen verwacht op een deel van de hoger gelegen zomerpolder (ref. 13).

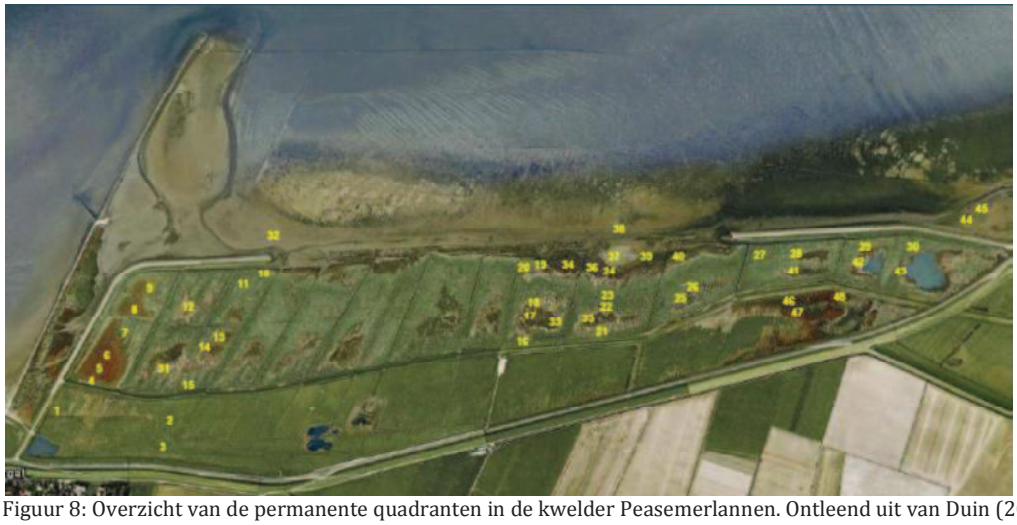
3.2 Metingen en analysestrategie

Op de kwelder wordt twee keer per jaar de opslibbing gemeten op vaste punten (§ 3.3). Na correctie voor bodemdaling wordt zo de hoogteontwikkeling van de kwelder gemonitoord. Deze hoogteontwikkeling wordt ruimtelijk gecorreleerd met de veranderingen die in de vegetatie optreden. Veranderingen in de vegetatie worden gemonitoord in permanente kwadraten die over de kwelder verspreid liggen (Fig. 8). In de kwadraten zijn kleine veranderingen in de vegetatie waarneembaar omdat er op soortniveau gemonitoord wordt. Eens per 6 jaar wordt de vegetatie op de gehele kwelder gekarteerd met als doel vast te stellen hoe veranderingen in de permanente kwadraten doorwerken naar het areaal beschermde habitats en habitats voor Natura 2000 doelsoorten.

3.3 Kwelderhoogte en klifvorming

De natuurlijke opslibbing van de kwelder kan voldoende zijn om de zeespiegelstijging en de bodemdaling bij te houden. De opslibbing op de kwelders wordt gemeten a.d.h.v. zogenaamde SEB-metingen. SEB-meting staat voor Sedimentatie-Erosie-Balkje-metingen. Deze metingen hebben dezelfde nauwkeurigheid als de eerder besproken spijkermetingen. De SEB-metingen zullen de komende monitoringcyclus 2x per jaar worden uitgevoerd. Inmiddels is een deel van de SEB-constructies aan onderhoud/vervanging toe. In 2013-2014 zal een groot deel van dit onderhoud worden uitgevoerd.

Kliferosie wordt jaarlijks gemeten a.d.h.v. RTK-GPS-metingen. Momenteel is dit lastig omdat de groeiende kwelder geen klif heeft, maar sprake is van een geleidelijke overgang tussen wadplaat en kwelder.



Figuur 8: Overzicht van de permanente quadranten in de kwelder Peasemerlannen. Ontleend uit van Duin (2014), ref. 13.

3.4 Kweldervegetatie

Voor het monitoren van kweldervegetaties is aansluiting gezocht bij bestaande monitoringprogramma's van IMARES en RWS, waarmee de ontwikkelingen van de vegetaties en habitats in de tijd (trends) in beeld kunnen worden gebracht.

De ontwikkeling van de kwelders in de bodemdalinggebieden wordt bestudeerd aan de hand van de vegetatieontwikkeling in permanente kwadraten en vergeleken met kwadranten op kwelders in referentiegebieden. Deze referentiekwadraten zijn onderdeel van de lopende kweldermonitoring van Rijkswaterstaat.

De combinatie van een lage bodemdalingsnelheid en hoge natuurlijk opslibbing op de Peasemerlannen heeft nog niet tot maaivelddaling geleid. Ook de komende monitoringcyclus wordt geen sterke bodemdaling verwacht en is een verandering in de kweldervegetatie als gevolg van bodemdaling onwaarschijnlijk. In dit monitoringprogramma wordt daarom voorgesteld de vegetatiemonitoring eens per twee jaar uit te voeren. Omdat de SEB-metingen en hoogtemetingen frequenter worden uitgevoerd kan in response op onverwacht sterke daling of opslibbing (> 5 cm) tot een extra vegetatieopname worden overgegaan.

3.5 Broedvogels en overstromingrisico

Uit de evaluatie van de monitoring 2007-2012 blijkt dat er een zwakke, onduidelijke koppeling is tussen broedvogels op de kwelder en de rest van de effectketen. Daarnaast blijkt uit onderzoek dat diepe bodemdaling onder de Peasemerlannen de komende jaren nog niet gaat bijdragen aan het overstromingrisico van nesten (ref. 5). Er is in 2013 een onderzoek gestart naar de mate waarin het overstromingrisico voor nesten op de meetbaar gedaalde kwelder van Ameland is toegenomen. De uitkomst van dit onderzoek wordt verwacht in 2015. Voor vervolgonderzoek van het overstromingrisico op de Peasemerlannen wordt eerst de uitkomsten van dit onderzoek afgewacht. Monitoring van de broedvogelaantallen op de Peasemerlannen wordt door vrijwilligers uitgevoerd en gecoördineerd door SOVON. Aan het eind van deze monitoringcyclus zal de ontwikkeling van de broedvogels op de Peasemerlannen

a.d.h.v. trendspotter analyses worden gerapporteerd in relatie tot ontwikkeling in vegetatie en beheer.

3.6 Kwelderbeheer

De zomerpolder in de Peasemerlannen wordt beweid. Voor de lager gelegen kwelder geldt dat nog niet. Binnenkort wordt er gestart met het beweiden van de Groninger kwelder die als referentiegebied voor de Peasemerlannen wordt gebruikt. Dit leidt waarschijnlijk tot grote veranderingen in de vegetatie, waardoor de opgebouwde meetreeks verstoort wordt. Met de betrokken onderzoekers is bediscussieerd of de onderzoekvakken en transecten op de Groninger kwelder moeten worden afgeschermd. Uit de discussie kwam naar voren dat het beter is om het aantal referentiekwelders uit te breiden. Het idee hierachter is dat geen enkele referentie kwelder volledig representatief zal zijn voor de Peasemerlannen. Voor de hand liggende additionele referentiekwelders zijn de Julianapolder en de Negenboerenpolder. De Julianapolder zijn geen plannen voor toekomstige beweiding. Voor de Negenboerenpolder wel. Van beide kwelders zijn meetreeksen voor vegetatie en sedimentatie opgebouwd. In 2014/15 wordt de bruikbaarheid van deze kwelders geëvalueerd en gerapporteerd.

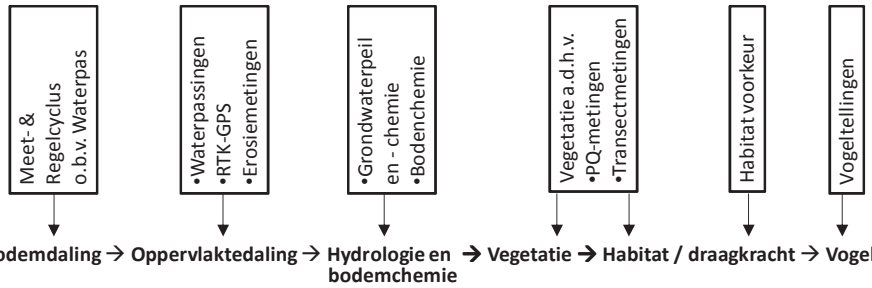
4 LAUWERSMEERGEBIED

4.1 Monitoring en instandhoudingsdoelen

De mogelijke effecten van gaswinning in het Lauwersmeergebied beperken zich tot effecten van bodemdaling. Het Lauwersmeer is een binnendijks gebied waar geen opslibbing plaatsvindt en bodemdaling van het maaiveld meetbaar is. Door de groei van vegetatie treedt wel verlanding op waardoor water overgaat in moeras en moeras in land. In het Lauwersmeergebied vindt actief beheer plaats om deze verlanding tegen te gaan of zelfs terug te draaien. Enkele polders zijn dieper gemaakt en hebben een kunstmatig waterpeilbeheer waardoor struweellandschap weer plaats maakt voor moeras en open water. Het uiteindelijke doel van bovengenoemde beheermaatregelen is de avifauna te beïnvloeden. Dit speelt o.a. in het deelgebied Ezumakeeg, het gebied waar ook de meeste bodemdaling zal optreden als gevolg van de Anjum-winning sinds 1997.

Naast een intensief beheer kent het gebied ook een zeer dynamisch waterpeil met veranderingen in waterhoogte tot 1 meter. Dit maakt dat naast het meer gelegen graslanden periodiek onder water staan. De randen van de platen en lobben in het gebied zijn hierdoor onderhevig aan erosie. Omdat het Lauwersmeer voor de afsluiting van de Lauwerszee een brede geul was met wadplaten en kwelders is het gebied nog steeds in verandering van zout naar zoet. In het gebied worden door locaal brakke omstandigheden nog enkele zeldzame vegetatietypen gevonden.

Omdat het Lauwersmeer alleen als vogelrichtlijngebied is aangewezen zijn in het aanwijzingbesluit alleen instandhoudingdoelstelling voor vogelsoorten opgenomen. Deze doelstellingen luiden dat activiteiten niet mogen leiden tot een afname van de draagkracht van het gebied voor een bepaald aantal vogels of broedparen per soort (Tab. 1 en 2). De mogelijke doorwerking van bodemdaling door gaswinning op het ecosysteem wordt bestudeerd a.d.h.v. een effectketen zoals weergegeven in figuur 8.



Figuur 8: Effectketen Lauwersmeergebied (vet gedrukt) en de daaraan gekoppelde monitoringonderdelen (in de kaders). De pijlen geven de koppeling tussen de onderdelen weer. De schakels "Habitat / draagkracht" vormen de instandhoudingsdoelen.

In de effectketen wordt verondersteld dat de draagkracht van het gebied voor Natura 2000 doelsoorten wordt bepaald door de vegetatie. Daarnaast zijn ook andere, bijvoorbeeld voedsel gerelateerde gebiedkenmerken van belang. In tabel 1 en 2 zijn de vogelsoorten die in het gebied worden waargenomen opgedeeld in groepen op basis van habitatvoorkeur. De broedvogels zijn gegroepeerd op basis van een vegetatietype. De niet-broedvogels op basis van hun voedselvoorkeur of foerageergebied. Van de zeer geringe bodemdaling in het Lauwersmeergebied worden geen effecten verwacht op aquatische organismen. Ook zal, door het eroderen van de platen en de afwezigheid van getijdenstroming het meer alleen maar ondieper worden. De focus in dit monitoringprogramma ligt daarom op de terrestrische vegetatie. Daarnaast wordt er langs enkele transecten gekeken naar de ontwikkeling in de muizenpopulatie. Muizen zijn gevoelig voor vernatting en vormen een belangrijke voedselbron voor o.a. de bruine kiekendief.

Tabel 1: Indeling broedvogels naar habitatvoorkeur, op basis van het vegetatietype. Vet-gedrukt zijn de Natura 2000 doelsoorten, aangevuld met niet-doelsoorten. De tabel is afgeknipt op 5 soorten. In werkelijkheid zijn de meeste groepen groter. Zo bestaat de groep onder "waterriet" uit 18 soorten.

structuurtypen	Waterriet	Droog riet Natte ruigte Droge ruigte	Droge ruigte Open struweel Dicht struweel	Grasland-open Grasland-open en brak Grasland-hoger opgaand	Kale grond Zilte pioniervegetaties Zoete pioniervegetaties
N2000-soorten = vet	**Roerdomp**	**Grauwe Kiekendief**	**Paapje**	**Kemphaan**	**Kluut**
	Bruine Kiekendief	**Velduil**	Koekoek	**Kluut**	**Bontbekplevier**
	Porseleinhoen	**Blauwborst**	Boompieper	Zometertaling	**Noordse Stern**
	Snor	**Rietzanger**	Winterkoning	Slobeend	Scholekster
soort	Dodaars	Blauwe Kiekendief	Heggenmus	Scholekster	Strandplevier

Tabel 2: Indeling niet-broedvogels naar voedselvoorkeur of foerageergebied. Vet-gedrukt zijn de Natura 2000 doelsoorten, aangevuld met niet-doelsoorten. De tabel is afgeknipt op 8 soorten.

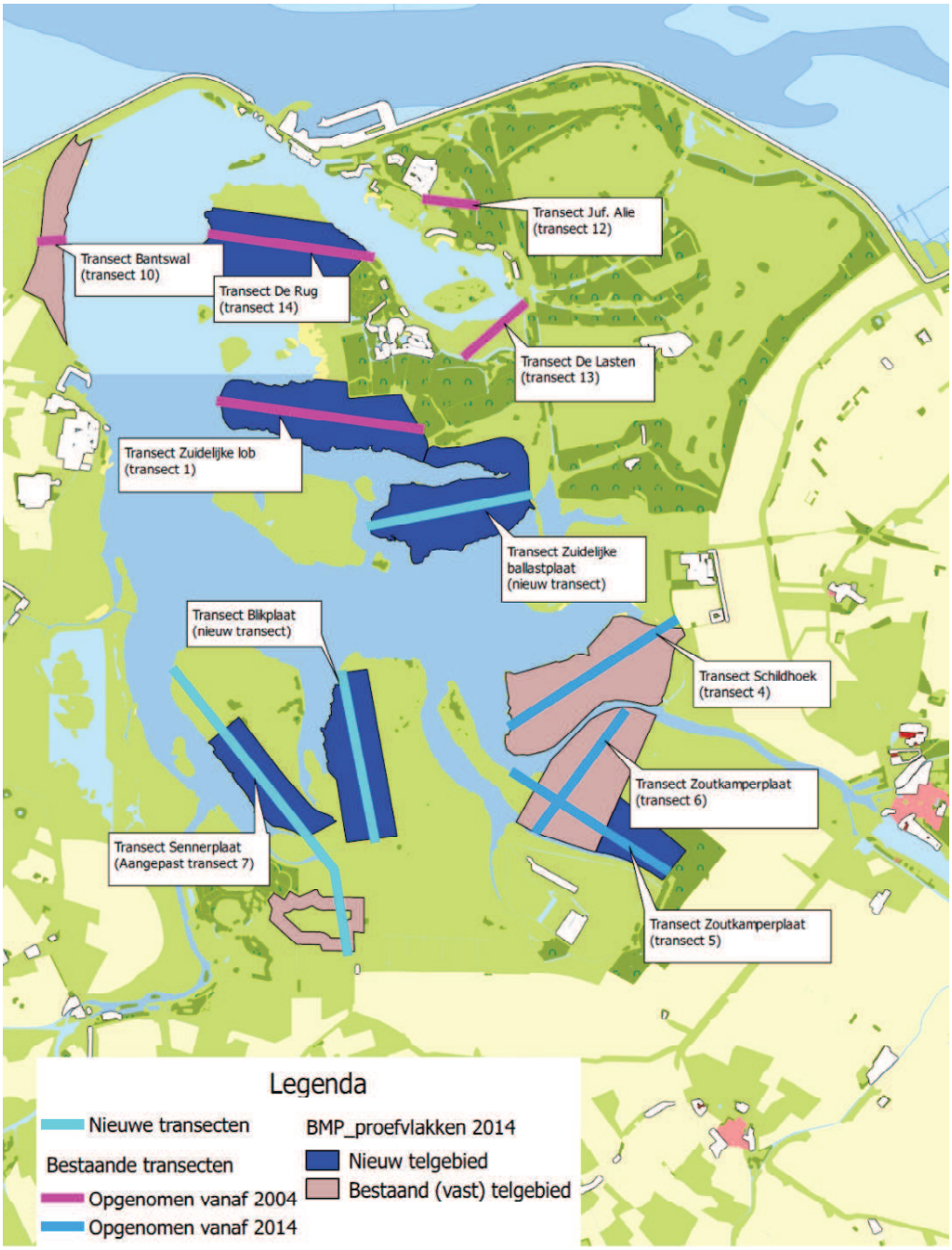
voedel	vis	zoetwater-mosselen	benthos slik/ ondiep water	(kleine) zoogdieren / (zang)vogels	wormen grasland	gras	fonteinkruiden	akkers
N2000-soorten = vet	**Fuut**	**Kuifeend**	**Bergeend**	**Zeearend**	**Goudplevier**	**Kolgans**	**Kleine Zwaan**	**Wilde Zwaan**
	Aalscholver	**Meerkoet**	**Pijlstaart**	**Bruine Kiekendief**	**Grutto**	**Dwerggans**	**Tafeleend**	Toendrarietgans
	Lepelaar		**Slobeend**	Blauwe Kiekendief	**Wulp**	**Grauwe Gans**	Knobbelzwaan	
	Nonnetje		**Brilduiker**	Grauwe Kiekendief	Scholekster	**Brandgans**		
soort	**Reuzenstern**		**Kluut**	Havik	Kievit	**Smient**		
	Dodaars		**Bontbekplevier**	Sperwer	Kemphaan	**Krakeend**		
	Fuut		**Zwarte Ruiter**	Buizerd	Watersnip	**Wintertaling**		
	Geoorde Fuut		Kleine Strandloper	Ruigpootbuizerd	Regenwulp	**Wilde Eend**		

4.2 Meet- en analysestrategie

De monitoring van het Lauwersmeergebied bestaat uit de volgende onderdelen: diepe bodemdaling, maaiveldhoogte, grondwaterstanden, grondwaterchemie, bodemchemie, weersomstandigheden, meerpeil, vegetatie op soortniveau, vegetatie op structuurtype niveau, vogels en muizen. Het doel is vast te stellen in hoeverre er sprake is van een nadelige ontwikkeling van de draagkracht van het gebied voor Natura 2000 doelsoorten (vogels). Omdat een effect van bodemdaling alleen op het land meetbaar zal zijn is draagkracht hier vertaald naar beschikbare vegetatiestructuur op te nestelen en te foerageren. Daarnaast wordt er ook naar muizen als voedselbron voor roofvogels gekeken. In het beantwoorden van de onderzoekvraag staat de ontwikkeling van de vegetatie centraal. De hieraan te grondslag

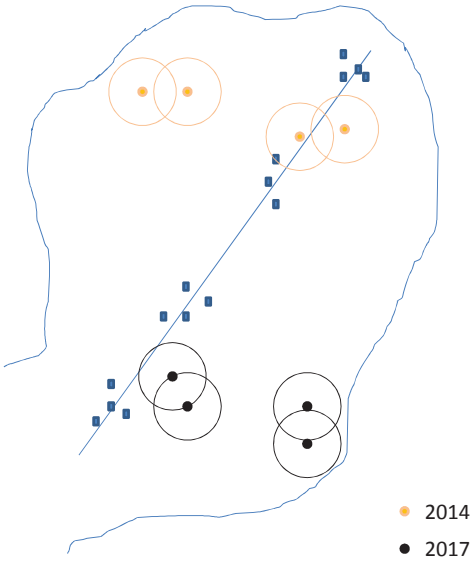
liggende analyse kan in twee blokken worden verdeeld. In het eerste blok wordt de vegetatieontwikkeling in permanente kwadraten op soortniveau geanalyseerd als functie van het meerpeil, de oppervlakte daling, het weer en het beheer. In het tweede blok wordt gekeken in hoeverre de in blok 1 aangetroffen effecten zich doorvertalen op gebied niveau en hoe Natura 2000 doelsoorten daarop reageren. Hiervoor wordt de ontwikkeling van de vegetatiestructuur, gemeten langs zeer brede transecten, geanalyseerd en ruimtelijk gecorreleerd met eerder genoemde variabelen (zie bijlage 2).

De meeste monitoringonderdelen worden jaarlijks gemeten. De reden hiervoor is dat de invloed van het weer en meerpeil op de vegetatie alleen kan worden vastgesteld a.d.h.v. deze meetfrequentie. De vegetatiestructuur langs transecten en de diepe bodem- en maaiveld daling worden eens in de drie jaar vastgestel. Frequentere metingen leiden niet tot aanvullende informatie.



Figuur 9: Monitoringprogramma voor het Lauwersmeergebied. De rechte lijnen zijn de transecten waarlangs de vegetatie wordt gemonitoord. Langs de transecten liggen de permanente kwadraten en de peilbuizen. Deze zijn niet op deze kaart weergegeven. De contouren vormen de vogeltelgebieden.

In dit nieuwe monitoringprogramma is de monitoring uitgebreid naar het zuidelijk deel van het Lauwersmeergebied. Daarnaast is voor overlap gezorgd tussen alle monitoringonderdelen (Fig. 9). Langs de in figuur 9 gepresenteerde transecten liggen de permanente kwadraten waarin de vegetatie op soortniveau wordt gemonitoord. Bij deze kwadraten zijn of worden peilbuizen geplaatst en worden bodemmonsters genomen (Fig. 10). Tevens wordt per lob of plaat het beheer gemonitoord, waardoor inzichtelijk wordt wat voor beheer in welke periode van het jaar heeft plaatsgevonden.



Figuur 10: Hypothetisch voorbeeld van de koppeling tussen de vegetatiemonitoring en de broedvogelkartering voor een plaat of lob in het Lauwersmeergebied (contour). De rechte lijn met de vierkantjes symboliseren het transect en de PQ's ten behoeve van de vegetatiemonitoring. Bij de PQ's liggen de peilbuizen. Deze zijn niet in dit voorbeeld weergegeven. De cirkels vormen de territoria van een bepaalde vogelsoort met de stip als centrum, hetgeen ook het nest kan zijn. In dit voorbeeld zijn de groene territoria in 2014 bepaald, terwijl deze in 2017 naar het zuidelijk deel van deze plaat zijn verplaatst. Per plaat kan zo bekeken worden of de variatie in de vegetatie en de verspreiding van de territoria of nesten correleren. Wanneer voor meerdere platen/ lobben vergelijkbare correlaties worden aangetroffen is er sprake van een causaal verband.

De deelgebieden (lobben of platen) in het gebied kunnen als statistische eenheden worden gezien. In een aantal gevallen kunnen deelgebieden verder worden onderverdeeld in meerdere blokken. Alle relevante deelgebieden die beschikbaar zijn, zijn onderdeel van het nieuwe monitoringprogramma waardoor de steekproef optimaal is. Het aantal "waarnemingen" kan in de ruimte niet veel verder worden uitgebreid. We gaan er vanuit dat we met dit nieuwe monitoringprogramma een optimaal monitoringprogramma voor het Lauwersmeergebied hebben neergezet. De power van het programma kan verder worden verhoogt door het kiezen van relatief stabiele variabelen (vogelsoorten of soortgroepen. Tabel 1 en 2 zijn daar een voorbeeld van. Deze groepen kunnen in de toekomst worden bijgesteld op basis van voortschrijdend inzicht. De Invulling hiervan zal ook deels uit de eerste analyses moeten blijken.

4.3 Monitoringonderdelen Lauwersmeergebied

In de onderstaande paragraven worden de afzonderlijke monitoringonderdelen besproken. Voor de metingen en analyses die plaatsvinden om het ruimtelijke en temporele verloop van de diepe bodemdaling in kaart te brengen wordt verwezen naar het meet- en regelprotocol (2007).

4.3.1 Ontwikkeling maaiveldhoogte

Bij de permanente meetkwadraten waarin de ontwikkeling van de vegetatie wordt gemonitoord, wordt eens in de drie jaar de maaiveldhoogte bepaald. Dit gebeurt a.d.h.v. RTK-GPS-metingen of waterpassingen. Tevens zullen op een aantal platen SEB-metingen worden

uitgevoerd. De reden hiervan is dat als gevolg van de dynamiek in het meerpeil erosie van delen van platen wordt vermoed.

4.3.2 Grondwaterpeil en –chemie

Bodemdaling in het Lauwersmeergebied kan er voor zorgen dat een groter deel van het brakke grondwater het maaiveld bereikt. Anderzijds kan aan de rand van het meer laaggelen grasland vernatten. Voor het bestuderen van de vernatting en verzilting wordt peilbuismonitoring uitgevoerd. Hiervoor is aangesloten bij de monitoring zoals die is ingezet door TNO in 2005 en 2006 in opdracht van de BodemdalingsCie Frieland en in overleg met het Waterschap Friesland. Daarbij wordt gebruik gemaakt van bestaande meetnetten (Data en Informatie Nederlandse Ondergrond ofwel DINO-loket; netwerk van peilbuizen), uitgebreid met nieuwe meetpunten. In de peilbuizen wordt het waterpeil, de waterdruk en het zoutgehalte van het oppervlakte- en grondwater bepaald. Aan de hand van de gegevens worden de ontwikkelingen in het oppervlakte- en grondwater gevolgd in de tijd en ruimte. Naast bestaande peilbuizen worden peilbuizen gemonitoord die bij de permanente kwadraten, langs de transecten worden geplaatst. In de effectketen vormen de peilbuismetingen de koppeling tussen bodemdaling/ maaiveldhoogte en de stapeling van organische stof / ontwikkeling van de vegetatie.

4.3.3 Bodemradar

Met als doel de ruimtelijke gradiënten in het zoutgehalte van het grondwater goed in beeld te krijgen willen we de komende periode gaan experimenteren met bodemradar opnames. Het idee hierachter is dat op basis van meer gedetailleerde informatie beter voorspeld kan worden waar langs de transecten veranderingen door bodemdaling kunnen optreden. Over de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van een bodemradarsysteem voor dit doel is nog weinig bekend (ref. 6).

4.3.4 Stapeling van organisch materiaal

Veranderingen in het grondwaterpeil en –chemie kunnen ertoe leiden dat plantenresten niet langer afgebroken worden en er accumulatie van organisch materiaal optreedt. Deze veranderende bodemsamenstelling kan een effect hebben op de vegetatie. Het monitoren van de bodemchemie is een stap tussen veranderingen in het grondwaterpeil en –chemie en de vegetatie. Een extra schakel in de effectketen die helpt om het proces achter eventuele veranderingen te achterhalen/ interpreteren. De stapeling van organische stof wordt bij de permanente kwadraten eens in de drie jaar gemonitoord.

Uit de reeds uitgevoerde monitoring bleek dat op een aantal locaties een hoog percentage organischestof uit de toplaag van de bodem verdween. Onderzoekers gaven aan dat dit mogelijk door erosie werd veroorzaakt. Als tijdens het spuien het water van overstroomde plaatdelen stroomt, erodeert de toplaag en spoelt organische stof naar het meer. Op een aantal locaties worden SEB-opstellingen geplaatst met als doel deze erosie te bepalen en te onderscheiden van bodemdaling door gaswinning (§ 4.3.1).

4.3.5 Vegetatie-opnames PQ's en transecten

Op basis van de samenstelling van de vegetatie kan in het Lauwersmeergebied een aantal vegetatie(structuur)typen worden onderscheiden. Bodemdaling kan leiden tot veranderingen in de verhouding tussen deze vegetatietypen. Ook kunnen de locaal aanwezige zilte vegetaties door bodemdaling worden beïnvloed. Deze zilte vegetaties bestaan door de aanwezigheid van brak kwelwater. Het idee is dat de invloed van brak grondwater onder invloed van bodemdaling een belangrijkere rol gaat spelen. De vegetatie in het Lauwersmeergebied wordt op twee schaalniveau's gemonitoord.

- Permanente kwadraten
- Transectmetingen

Permanente kwadraten

Vegetatieopnames vinden plaats aan de hand van permanente kwadraten die langs transecten in het Lauwersmeergebied zijn gesitueerd. Voor het monitoren van vegetaties is aansluiting gezocht bij bestaande monitoringprogramma's van A&W en SBB waarmee de ontwikkelingen van de vegetaties en bijbehorende habitats in de tijd en ruimte in beeld kunnen worden gebracht.

In de permanente kwadraten wordt per plantsoort de aanwezigheid en bedekking geschat. Hierdoor is het in de kwadraten in een vroeg stadium zichtbaar als bepaalde soorten opkomen of verdwijnen. Wanneer dat geobserveerd wordt, wordt voor deze soorten (indien relevant voor de vegetatiestructuur) de verspreiding in de transectmonitoring meegenomen. Het gaat hierbij om soorten of groepen soorten die de draagkracht van het gebied voor broedvogels kunnen beïnvloeden. Typische voorbeelden hiervan zijn riet, kruipwilg, grassen, etc.. Naast veranderingen in de mate van aanwezigheid worden ook de hoogte van de vegetatie en de ruimtelijke structuur bepaald (zie voorbeeld onder doel 2 in bijlage 2).

Transectmetingen

Transectmetingen zijn karteringen van vegetatiestructuurtypen en typerende soorten (zie hier boven) die bedoeld zijn om veranderingen in permanente kwadraten ruimtelijk te kwantificeren en te koppelen aan veranderingen in de Natura 2000 doelsoorten. Als bodemdaling tot verschuivingen in vegetatiepatronen leidt, zullen deze vooral loodrecht op de dalingscontouren zichtbaar zijn en in de gekozen transecten tot uiting komen. De transectmetingen worden eens in de drie jaar uitgevoerd.

4.7 Vogel- en muizenstand van het Lauwersmeergebied

Het Lauwersmeergebied is een vogelrichtlijngebied. Binnen het kader van de effectketenbenadering worden jaarlijks de broedvogelaantallen gemonitoord. Dit vindt plaatst in telgebieden die strategisch over de bovengenoemde transecten zijn geplaatst waarlangs ook de ontwikkeling in vegetatiestructuur (habitat) wordt gemonitoord (Fig. 10). Voor de broedvogels worden territoria ingemeten a.d.h.v. 8 veldbezoeken in de broedperiode. Voor de niet-broedvogels is aansluiting gezocht bij het lopende monitoringprogramma van SOVON.

De vogelmonitoring is van belang om de relatie tussen het beschikbaar habitat en het bezette habitat te schatten. Als blijkt dat deze overeen komen, dan leidt een vermindering van het habitatareaal (in dit geval vegetatiestructuurtype) tot een afname van de draagkracht van het gebied voor een doelsoort (of groep). Ook de bezetting van het areaal beschikbaar habitat door andere soorten is daarbij van belang.

Roofvogels in het gebied hebben belang bij een omvangrijke muizenpopulatie. Deze muizen leven in de bodem en zijn gevoelig voor schommelingen in het grondwater- en meerpeil. In de tweede monitoringcyclus zal gestart worden met het monitoren van de muizenpopulatie.

5. OVERLEGSTRUCTUUR en COMMUNICATIE MONTORINGRESULTATEN.

Het monitoringprogramma 2014-2019 geldt voor de komende 6 jaar. In 2020 vindt de volgende uitgebreide methodologische evaluatie van de monitoringgegevens plaats. Aanpassing van het monitoringprogramma (in omvang en frequentie) op basis van deze tussenrapportages en adviezen van de Auditcommissie m.e.r. blijft mogelijk.

Jaarlijks zullen de monitoringresultaten door alle betrokken onderzoekers tezamen worden bediscussieerd, waarna door de groep een integrale, kwantitatieve analyse wordt opgesteld

a.d.h.v. de effectketen en rekening houdend met de instandhoudingsdoelen. Dit zal voor de onderdelen wadplaten, kwelder en Lauwersmeer afzonderlijk gebeuren. Het geheel wordt gerapporteerd aan het bevoegd gezag. Voorafgaande aan de rapportage zullen de resultaten worden besproken met de Commissie monitoring waddengas 2006.

Alle rapporten worden na indiening op de NAM website (www.nam.nl) openbaar gemaakt.

Referenties

1. Gaswinning Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen (MLV); Evaluatie meten en Integrale beoordeling monitoring 2007-2012, versie december 2013, NAM rapportage EP201312202561.
2. Edwin Elias & Zheng Bing Wang (2013) Abiotische gegevens voor monitoring effect bodemdaling. Deltares rapport.
3. Tanya J. Compton, Jaap van der Meer, Sander Holthuijsen, Anita Koolhaas, Anne Dekinga, Job ten Horn, Lise Klunder, Niamh McSweeney, Maarten Brugge, Henk van der Veer and Theunis Piersma (2013) SYNOPTIC INTERTIDAL BENTHIC SURVEYS ACROSS THE DUTCH WADDEN SEA 2008 to 2011 NIOZ 2013-1
4. Zwarts et al. 2004 Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIZA rapport RIZA/2004.028. incl. cd-rom.
5. Kees Koffijberg, Christian Kampichler & Bruno J. Ens (2013) Overstromingsrisico's en verspreiding van kwelderbroedvogels in de Nederlandse Waddenzee in relatie tot bodemdaling door gaswinning. Sovon-rapport 2013/26
6. Rooke (2007) Overgangen van zout-zoet water op Texel. Medusa rapport 2007P181.
7. Bijleveld A.I. et al. (2011) Designing a benthic monitoring programme with multiple conflicting objectives. Methods in Ecology and Evolution. doi: 10.1111/j.2041-210X.2012.00192.x
8. Thompson S.K. (1992) Sampling. Wiley, New York.
9. Van der Meer, J. (1997) Sampling design of monitoring programmes for marine benthos: a comparison between the use of fixed versus randomly selected stations. J. Sea Res. 37: 167-179
10. Krol J. (2014) Wadsedimentatiemetingen Ameland, Engelsmanplaat, Paesens en Schiermonnikoog 2007-2013. Natuurcentrum Ameland.
11. de Jong, B, Michel J.P.M. Riksen, Johan Krol and Pieter A. Slim (2013) EFFECT OF MANAGEMENT ON COASTAL DUNES ON A NORTH SEA BARRIER ISLAND, submitted.
12. Piening H. Piening, J.A. van der Sluijs, H. Kooistra, E. Claassen, B. Valten, R. Hoddenbach (2013) Plan van aanpak voor controle meting Lidar data. NAM
13. W.E. van Duin, P.-W. van Leeuwen & C. Sonneveld (2014) Vegetatie en opslibbing in de Peazemerlannen en het referentiegebied west-Groningen: *Jaarrapport 2013.* IMARES Rapport C026/14
14. van Thienen-Visser K, M Nepveu en J Hettelaar (2012) Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland. TNO-rapport R10198

Tabel 3: samenvattende tabel met daarin de verschillende monitoringonderdelen en de frequentie waarmee ze worden uitgevoerd.

Gebied	Doel	Meting	Frequentie	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Waddenzee (wadplaten)	Areaal/ wadplaathoogte	Vaklodingen	1x / 6 jaar					X		
Pinkegat & Zoutkamperlaag	Areaal/ wadplaathoogte	LIDAR	2x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
Enkele wadplaten	Sedimentatie	Spijkermetingen	5x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
Enkele wadplaten	Sedimentatie	Waterpassingen	1x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
Pinkegat & Zoutkamperlaag	Vogelvoer	Bodemdieren	1x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
HVP's	Piekaantallen/timing	Vogeltellingen	5x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
Noordzeekustzone	Morfologische ontwikkeling	Vaklodingen	1x / 3 jaar		X			X		
Waddenzee (Kwelders)	Areaal	Vegetatiekartering	1x / 2 jaar	X		X		X		
Waddenzee (Kwelders)	Kliferosie	TRK-GPS-metingen	1x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
Waddenzee (Kwelders)	Sedimentatie	SEB-metingen	2x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
Waddenzee (Kwelders)	Vegetatie opname/kaart	PQ-metingen	1x / 2 jaar	X		X		X		X
Waddenzee (Kwelders)	vlakdekkende kartering	vegetatie en hoogte	1x / 6 jaar	X						X
Lauwersmeergebied bij PQ's	Grondwaterpeil	peilbuisbemonstering	continu	X	X	X	X	X	X	X
Lauwersmeergebied bij PQ's	Grondwaterchemie	peilbuisbemonstering	4x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
Lauwersmeergebied bij PQ's	maaiveldhoogte	RTK-GPS metingen	1x / 3 jaar	X			X			X
Lauwersmeergebied PQ's	Vegetatieopname	PQ-metingen	1x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
Lauwersmeergebied PQ's	Organische stof	Steekbuisbemonstering	1x / 3 jaar	X			X			
Lauwersmeergebied transecten	Vegetatie kartering	Transectmetingen	1x / 3 jaar	X			X			
Lauwersmeergebied telgebieden	Broedvogelstand	Vogeltellingen	1x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
Lauwersmeergebied telgebieden	Muizenpopulatie	Vallen	1x / jaar	X	X	X	X	X	X	X
Evaluatie 2de monitoringcyclus										X

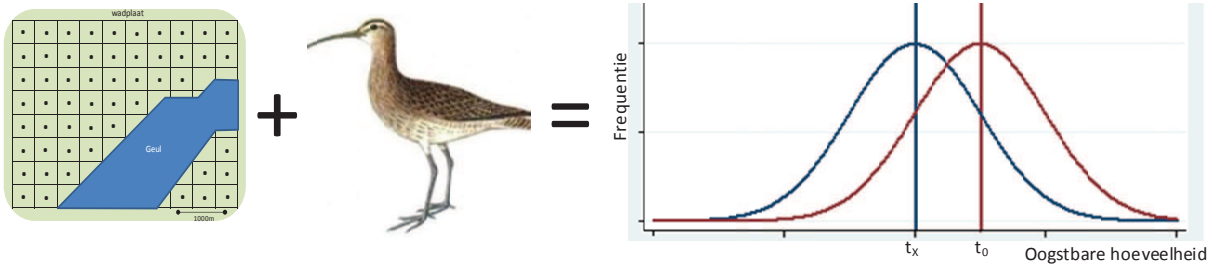
Nederlandse Aardoliemaatschappij BV
Assen, 31 maart 2014.

Bijlagen

Bijlage 1, Analysestrategie van het monitoringprogramma voor de wadplaten.
Bijlage 2, Analysestrategie van het monitoringprogramma voor het Lauwersmeerbebied.
Bijlage 3, Verwerking van het advies van de auditcommissie d.d. 5 maart 2014, rapportnummer 2796-83 in het monitoringprogramma 2014-2019.

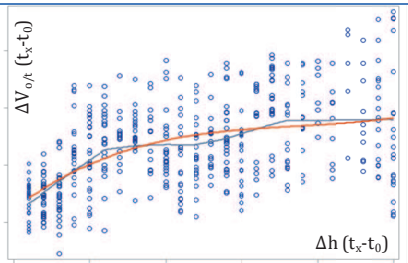
Analysestrategie monitoringprogramma wadplaten

Doel 1: Stel vast of er sprake is van een nadelige ontwikkeling van het instandhoudingsdoel 'oogstbare hoeveelheid voedsel per tij' voor verschillende Natura 2000 vogelsoorten in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag.



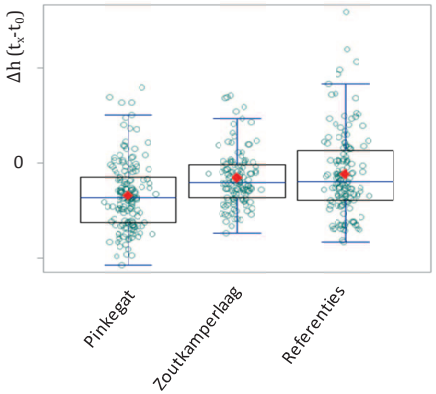
Op basis van veldmetingen (**benthos en LIDAR**) en vogelsoort specifieke kenmerken wordt per gridcel van 500x500 m de oogstbare hoeveelheid voedsel per tij berekend voor N2000 soorten. Deze variabele wordt in de tijd gevolgd.

Doel 2: Stel vast of de onder doel 1 genoemde nadelige ontwikkeling veroorzaakt wordt door, of gecorreleerd is aan daling van de wadplaathoogte in het gebied.

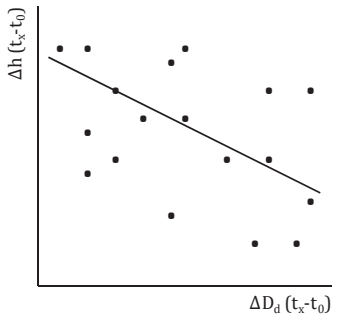


Modelleer de variatie in de oogstbare hoeveelheid voedsel per tij als functie van de variatie in wadplaathoogte:
$\Delta V_{o/t} = \Delta h$ + ruimtelijke correlatie structuur + ε

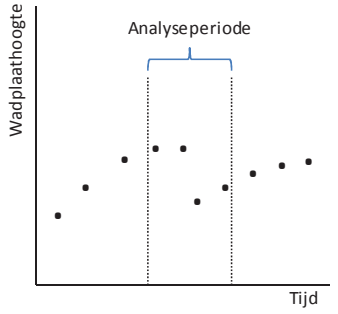
Doel 3: Stel vast of de onder doel 2 genoemde variatie in wadplaathoogte correleert met de mate van diepe bodemdaling. Doe dit door de variatie in wadplaathoogte in Pinkegat en Zoutkamperlaag met andere kombergingen te vergelijken of door binnen deze kombergingen de daling van de wadplaathoogte met de mate van diepe bodemdaling te correleren.



Test of de gemiddelde daling van de wadplaathoogte binnen Pinkegat en Zoutkamperlaag afwijkt van in andere kombergingen in de Waddenzee. Meetpunten kunnen random geselecteerde kwadraten zijn of hoogteklassen. (**LIDAR / Vaklodingen**)



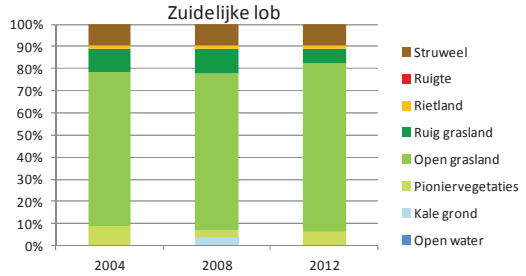
Test of de temporele variatie in wadplaathoogte (Δh) binnen Pinkegat en Zoutkamperlaag ruimtelijk afhangt van de mate van diepe bodemdaling (D_d) onder deze gebieden. (**Waterpassingen en GPS-klusters, of op basis van LIDAR per gridcel**)



Test of de variatie in wadplaathoogte in de 'analyse periode' onder invloed heeft gestaan van een plotselinge gebeurtenis. (**Spijkermetingen**)

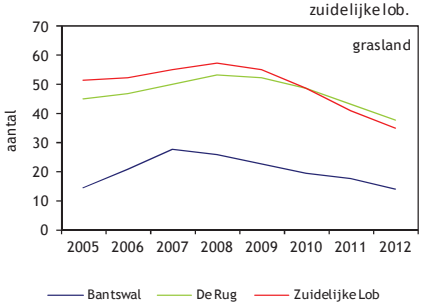
Analysestrategie monitoringprogramma Lauwersmeergebied

Doel 1) Stel vast of er sprake is van een afname van het beschikbaar oppervlak van een **vegetatiestructuurtype**, zijnde het habitat van bepaalde Natura 2000 doelsoorten .
Controleer in hoeverre de betreffende Natura 2000 doelsoorten de ontwikkeling in vegetatiestructuur volgen.



De verhouding tussen het met territoria bezette oppervlak van een bepaalde vegetatiestructuur en het totaal aanwezige areaal geeft inzicht in de mate waarin de variatie in beschikbaar oppervlak invloed heeft/ kan hebben op de populatie-ontwikkeling van de doelsoorten.

Ontwikkeling van met grasland geassocieerde vogelsoorten in drie deelgebieden, waaronder de zuidelijke lob.



Doel 2) Stel vast welke verandering in vegetatie er aan de bovengenoemde verandering in vegetatiestructuurtype ten grondslag ligt. Naast beschikbaar oppervlak zijn ook andere structuurkenmerken van belang zoals de hoogte van de vegetatie en de randlengte van een structuurtype. Zie voorbeeld:

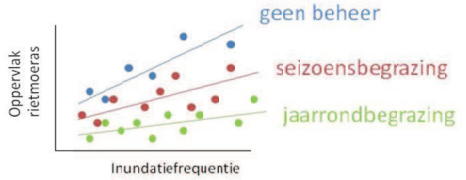
Rietland (geel) en grasland (groen) in gelijke hoeveelheid, maar geringe randlengte

Rietland (geel) en grasland (groen) in gelijke hoeveelheid, maar veel randlengte

Doel 3) Stel vast of de onder 2 gevonden verandering in vegetatie het resultaat is van vernatting of verzilting en wat de rol is van andere variabelen.

Modelleer de ruimtelijke variatie in vegetatie (bv. riet) (Δr) als functie van de verandering in 1) grondwaterpeil (ΔG_p), grondwaterchemie (ΔG_{ch}), bodemchemie (ΔB_{ch}), overstromingfrequentie (ΔO), neerslag (ΔN) en beheer (ΔM) en corrigeer voor ruimtlijke autocorrelatie in de data (Corr)

$$\Delta r \sim \Delta G_p + \Delta G_{ch} + \Delta B_{ch} + \Delta O + \Delta N + \Delta M + Corr + \varepsilon$$



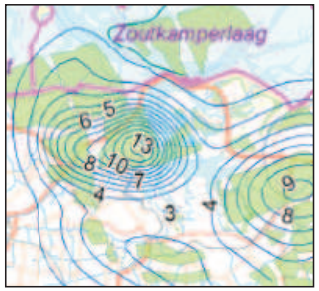
Links: hypothetisch voorbeeld van de invloed van beheer en de inundatiefrequentie op het oppervlak rietmoeras

Doel 4) Stel vast of de vernatting/ verzilting het resultaat is van maaivelddaling of andere variabelen zoals oppervlakte waterstanden en neerslag

Modelleer de ruimtelijke variatie in vernatting/verzilting (Δw) als functie van de maaivelddaling(Δh) en corrigeer voor ruimtlijke autocorrelatie in de data (Corr).

$$\Delta w \sim \Delta h + Corr + \varepsilon$$

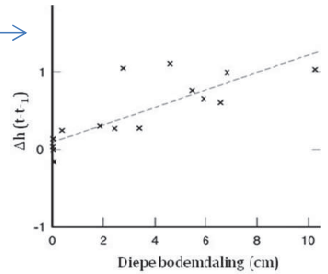
Doel 5) Stel vast of de maaivelddaling het resultaat is van diepe bodemdaling



Diepe bodemdaling bij de PQ's wordt geschat a.d.h.v. de ruimtelijke interpolatie via geomechanische modellen.

Modelleer de ruimtelijke variatie in maaivelddaling (Δh PQ's) als functie van de diepe bodemdaling (Δd) en corrigeer voor ruimtlijke autocorrelatie in de data (Corr)

$$\Delta h \sim \Delta d + Corr + \varepsilon$$



Bijlage 3:

Verwerking advies van auditcommisie d.d. 5 maart 2014 rapportnummer 2796-83 in monitoringprogramma 2014-2019

Pagina	Advies	Verwerking in monitoringprogramma 2014-2019
4,5	**Samenvattend oordeel** <u>Algemeen:</u> • Meer aandacht voor wetenschappelijke opzet	In het nieuwe monitoringprogramma is gezorgd voor overlap van metingen in tijd en ruimte, waardoor correlaties tussen variabelen geanalyseerd kunnen worden. Er is in samenwerking met de betrokken onderzoekers een duidelijke analysestrategie opgezet. Voor de wadplaten en Lauwersmeergebied zijn deze tevens schematisch weergegeven in bijlage 1 en 2 van het programma. Ook is samen met de onderzoekers een afgesproken dat er een ecologisch model gebouwd wordt a.d.h. waarvan de variatie in de instandhoudingsdoelen automatisch geanalyseerd wordt. Input voor dit model zijn de benthos en LIDAR data en vogelsoort specifieke parameters. Voor iedere meting en variabele is duidelijk wat de rol daarvan is in de data-analyse.
	• Meer aandacht voor verklaring trendbreuken	In de analyse van het nieuwe programma wordt geen enkele trend afzonderlijk beoordeeld, maar altijd in relatie tot verklarende variabelen. Hoe trends in bijvoorbeeld voedselbeschikbaarheid of vegetatiestructuur geanalyseerd worden is samengevat in bijlagen 1 en 2.
	• Betere overlegstructuur en betere afstemming tussen betrokken onderzoekers	Het overleg met de onderzoekers is geïntensiveerd. Deels door de overlegfrequentie op te voeren en deels door de groep op te splitsen in onderzoekers die zich met de wadplaten, kwelder, en Lauwersmeer bezighouden. De onderzoekers hebben een verantwoordelijkheid in de integratie van de verschillende datasets gekregen. NAM functioneert als aanjager, facilitator en secretaris. We ontvangen positieve reacties van de onderzoekers op de nieuwe overlegstructuur en -intensiteit.
	<u>Bijzondere aandachtspunten zijn:</u> • Lidar metingen en nauwkeurigheden	De ground-truth programma's door FUGRO en de NAM werpen hun vruchten af. Analyse van deze data en de door FUGRO gemaakte LIDAR-opnames door Deltares leidt tot inzicht in de omvang van de meetnauwkeurigheid. NAM organiseert momenteel een workshop met alle bij deze workshop betrokken partijen om tot gezamenlijke conclusies te kunnen komen en eventuele vervolgstappen vast te stellen. Voorlopig wordt parallel aan iedere LIDAR-opname een ground-truth survey uitgevoerd.
	• Bruikbaarheid SIBES onderzoek	Door aanpassing van de binnen SIBES gehanteerde onderzoekvraag zal de bodemdierendata een rol gaan vervullen in het schatten van de variatie in draagkracht voor foeragerende wadvogels in Pinkegat en Zoutkamperlaag. De eerder toegepaste statistische toetsing met beperkte statistische power is daarbij niet meer van toepassing. De SIBES data wordt aangevuld met informatie over de ligging en kwaliteit van de litorale mosselbanken uit de surveys van IMARES. Dit is nodig om het zwaarwegende belang van de mosselbanken als foerageergebied voor een aantal N2000 soorten goed te laten meewegen in de analyses.
	• Bruikbaarheid wadvogeltellingen	Naast de rol die deze tellingen hebben als signaleringparameter hebben de wadvogeltellingen op de HVP's een duidelijke rol in de

	• Verbetering zeggingskracht signaleringsmetingen	analyse gekregen. Hiervoor is het nodig de HVP-tellingen nabij het Peasemerwad rond de najaartrek uit te breiden. De zeggingskracht van de signaleringparameters is sterk verbeterd door het meten op dezelfde ruimtelijke en temporele schalen. Daarnaast is voor een belangrijk deel van de parameters/variabelen de monitoring flink uitgebreid.
8	Aangeven wat de mogelijke gevolgen zijn van aardbevingen door de winning uit de betrokken gasvelden voor het monitoringprogramma	Op basis van een seismische risicoanalyse is er een kans op aardbevingen vanwege onderhavige gaswinning. In het vigerende winningsplan is deze kans beschreven. Aan de hand van nieuwe inzichten kan/zal de kans op aardbevingen worden geactualiseerd. . In het winningsplan beschreven gasvelden worden continu door het KNMI gemonitoord op eventuele aardbevingen met behulp van een aangelegd netwerk van seismische registratie apparatuur. In het kader van dit monitoringprogramma is er geen noodzaak aanvullende monitoring uit te voeren die verband houdt met genoemde mogelijke aardbevingen.
10	Aangeven welke maatregelen ter verbetering van de nauwkeurigheid van de LIDAR metingen worden genomen	Ter controle van de LIDAR-opnames worden ook op de wadplaten zogenaamde ground-truth surveys uitgevoerd. Dit vindt plaats op vier locaties, parallel aan iedere LIDAR-meting (Zie hoofdtekst, pagina 10 en Fig. 5). Wanneer de LIDAR-opnames de gewenste consistentie bereiken kan met de ground truth metingen op het wad worden gestopt.
11	Uitwerken wat de rol van spijkermetingen in het programma is.	Om te bepalen of de variatie in wadplaathoogte het gevolg is van diepe bodemdaling is de snelheid waarmee de verandering optreedt van belang. Onderzocht wordt in hoeverre de variatie in wadplaathoogte proportioneel is met de mate van diepe bodemdaling in dezelfde periode of met het bodemdalingvolume. Plotselinge veranderingen in wadplaathoogte zijn te verwachten als gevolg van gebeurtenissen zoals zware stormen. Spijkermetingen zijn nodig om de temporele variatie in wadplaathoogte op locaties te monitoren. Zie paragraaf 2.1.5 en bijlage 1.
12	Uitwerken van een meet- en analysestrategie voor bodemfauna van de wadplaten. Hierin moet duidelijk worden aangegeven wat de koppeling met overige signaleringparameters inhoud	De parameters die per gridcel (Fig. 3) nodig zijn voor de analyses zijn de wadplaathoogte en de oogstbare hoeveelheid voedsel per tij. De variabele is een combinatie van een dieet- en seizoenafhankelijk voedselbestand. Dit bestand wordt geschat op basis van locatiespecifieke metingen (bodemfauna en LIDAR) en van vogelsoort-specifieke kenmerken. Daarnaast spelen de geografische ligging, de morfologie van de omgeving en de droogvalduur per monsterpunt een rol in het bepalen van deze parameter. Zie paragraaf 2.1.2 t/m 2.1.4 en bijlage 1.
13	Nagaan of het monitoringsprogramma voor de kwelders moet worden aangepast n.a.v. het gewijzigde beheer aangaande (vernatting /beweiding)	Met de onderzoekers is geconcludeerd dat de beste oplossing voor dit probleem is meerdere referentiekwelders te hanteren. Het idee hierachter is dat geen enkele referentie kwelder volledig representatief zal zijn voor de Peasemerlannen. Voor de hand liggende additionele referentiekwelders zijn de Julianapolder en de Negenboerenpolder. De Julianapolder zijn geen plannen voor toekomstige beweiding. Voor de Negenboerenpolder wel. Van beide kwelders zijn meetreeksen voor vegetatie en sedimentatie opgebouwd. In 2014/15 wordt de bruikbaarheid van deze kwelders geëvalueerd en gerapporteerd.
14	Uitwerken van een alternatieve meet-en analyse strategie voor de watervogeltellingen op de HVP's in de Waddenzee	Vogeltellingen op HVP's in Pinkegat en Zoutkamperlaag spelen een rol in het schatten van de oogstbare hoeveelheid voedsel per tij. Op basis van de vogeltellingen wordt namelijk de foerageerperiode bepaald. Daarnaast kan per vogelsoort, per HVP, de oogstbare hoeveelheid voedsel worden gecorreleerd aan het aantal vogels per periode. Dit leert ons in hoeverre en voor welke soorten het aantal afhangt van de oogstbare hoeveelheid voedsel. Vogelsoorten waarvan de aantallen een sterke correlatie vertonen met de oogstbare hoeveelheid voedsel zijn gevoeliger voor locale nadelige effecten op hun voedselbron."
14	Nagaan of de uitwerking van de broedvogeltellingen op de kwelder bij Peasens de komende jaren zinvol is.	Uit onderzoek blijkt dat diepe bodemdaling onder de Peasemerlannen de komende jaren nog niet gaat bijdragen aan het overstromingrisico van nesten. Er is in 2013 een onderzoek gestart naar de mate waarin het overstromingrisico voor nesten op de

		meetbaar gedaalde kwelder van Ameland is toegenomen. De uitkomst van dit onderzoek wordt verwacht in 2015. Voor vervolgonderzoek van het overstromingrisico op de Peasemerlannen wordt eerst de uitkomsten van dit onderzoek afgewacht. Monitoring van de broedvogelaantallen op de Peasemerlannen wordt door vrijwilligers uitgevoerd en gecoördineerd door SOVON. Aan het eind van deze monitoringcyclus zal de ontwikkeling van de broedvogels op de Peasemerlannen a.d.h.v. trendspotter analyses worden gerapporteerd in relatie tot ontwikkeling in vegetatie en beheer.
15	Aanpassen van de meet- en analyse strategie voor de monitoring in het Lauwersmeergebied, n.a.v. eventuele wijzigingen in het beheer	We hebben bij de uitbreiding van het monitoringprogramma rekening gehouden met het huidige beheer in het gebied. Nieuwe onderzoekplots zijn samen met de beheerder (SBB) vastgesteld. Tevens zijn afspraken gemaakt over het monitoren/ registreren van het beheer en het behouden van bestaande exclosures in het gebied die mogelijk een rol gaan spelen in toekomstige analyses. In de analyses van de ontwikkeling van de vegetatie worden beheer en meerpeil in de analyses meegenomen. De Vegetatiemonitoring zal daarvoor jaarlijks worden uitgevoerd i.p.v. eens per drie jaar.
16 (tabel 1 en 2)	Beperk de analyses van de broed en watervogels in het Lauwersmeergebied tot de soorten waarvoor instandhoudingsdoelstelling gelden.	Voor de analyses is dat zeker de bedoeling. Wel hebben we voor goede analyses en een gedegen discussie ook de andere soorten nodig. Analyses vinden namelijk eerst plaats op het niveau van groepen vogels (bv struweel vs riet broedende vogels, etc.). Vervolgens wordt gekeken hoe de N2000 soort zich binnen de groep gedraagt i.r.t. veranderingen in de vegetatiestructuur. Dit is nodig omdat individuele soorten in de meeste gevallen geen bruikbare datasets opleveren om analyses mee uit te voeren.

Nederlandse Aardoliemaatschappij BV
Assen, 31 maart 2014.

BIJLAGE E ADDENDUM MONITORINGSPROGRAMMA

Algemeen

De gaswinning vanuit het gasveld Ternaard veroorzaakt bodemdaling onder de Waddenzee. Deze bodemdaling cumuleert met bodemdaling door gaswinning uit de gasvelden Nes en Ameland onder het kombergingsgebied Pinkegat. Deze bodemdaling komt niet aan het wadoppervlak tot uiting door sedimentaanvoer vanuit de kustzone en sedimentverdeling binnen het kombergingsgebied. Schade als gevolg van de bodemdaling door de gaswinning Ternaard aan instandhoudingsdoelen op het Natura 2000-gebied Waddenzee is dan ook uitgesloten. Uit het oogpunt van zorgvuldig handelen binnen het Natura 2000-gebied Waddenzee, wordt aan de hand van monitoring in de gaten gehouden of dit inderdaad het geval is, dit is onderdeel van de HadK-systematiek. In deze bijlage wordt dit monitoringprogramma beschreven.

Relatie overige monitoringprogramma's

Ter begeleiding van de gaswinning onder het Pinkegat zijn verschillende meet- en monitoringprogramma's van kracht. Dit zijn het monitoringprogramma voor de gaswinning Ameland, het monitoringprogramma voor de gaswinningen Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen en het Meet- & Regelprotocol voor deze winningen. De twee monitoringprogramma's worden in 2018 geëvalueerd en per 2019 worden ze opnieuw vastgesteld.

De monitoring ten behoeve van de gaswinning Ternaard v vormt technisch gezien een uitbreiding van het monitoringprogramma "Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen". Voorgesteld wordt dat de monitoring voor de gaswinning Ternaard per 2019 onderdeel uit gaat maken van dat monitoringprogramma.

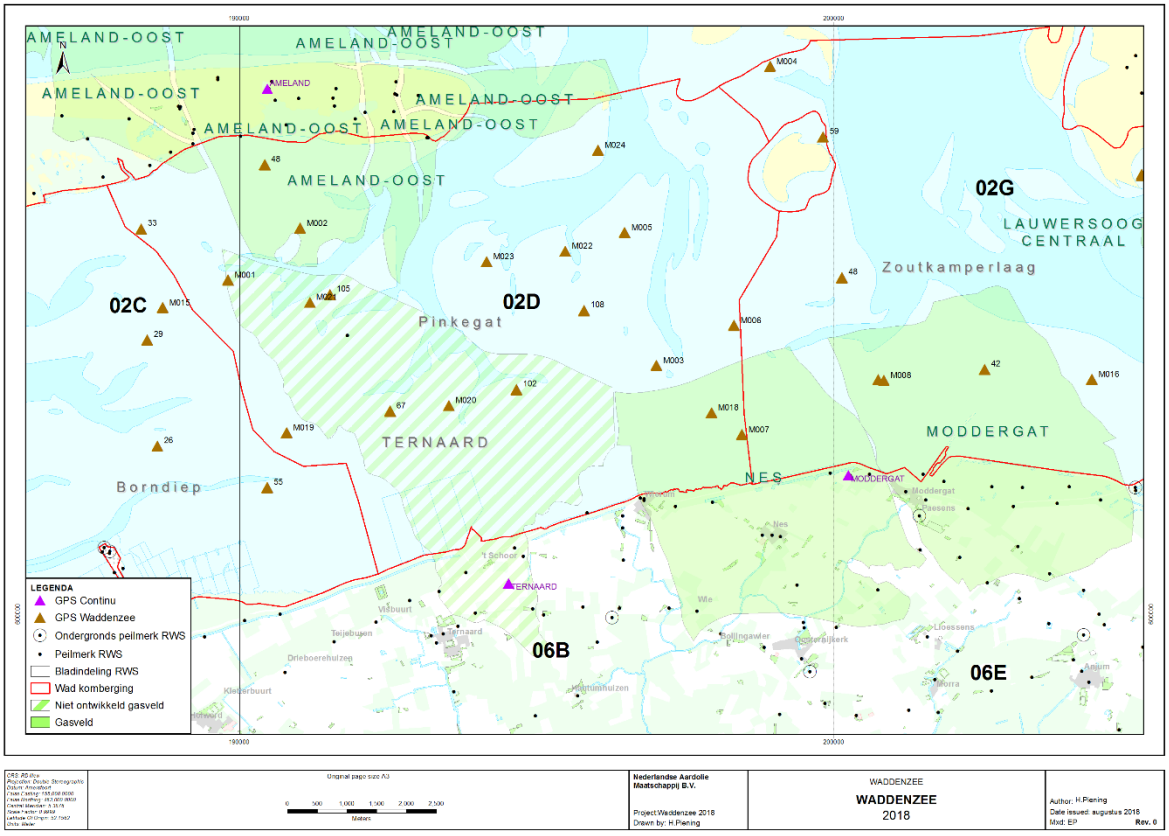
In deze bijlage wordt toegelicht welke aanvullingen er in dat monitoringprogramma nodig zijn om de mogelijke effecten van de gaswinning Ternaard op de instandhoudingsdoelstellingen voor de Waddenzee te monitoren.

Bodemdaling

Het meten van de bodemdaling die daadwerkelijk optreedt onder de Waddenzee werkt conform het Meet- & Regelprotocol (NAM, 2007) en pro-forma geen onderdeel van het Monitoringsprogramma. Vanwege het grote belang van de waargenomen bodemdaling bij de interpretatie van de monitoringsgegevens wordt hier beknopt weergegeven welke inspanningen hierin zijn voorzien. Bodemdaling als gevolg van de gaswinning Ternaard wordt gemodelleerd op basis van de drukdaling in en geologische eigenschappen van het gasveld en aangrenzende watervoerende lagen in de diepe ondergrond. Ook de cumulatie met bodemdaling door andere gaswinningen in de omgeving wordt hierin meegenomen. De modellen worden gekalibreerd op basis van geodetische monitoring. Deze monitoringtechnieken en methode wordt in detail toegelicht in het Meet- & Regelprotocol (NAM, 2007).

Omdat bodemdaling aan het wadoppervlak niet meetbaar is, zijn verspreid over het kombergingsgebied Pinkegat peilmerken geplaatst (Figuur 1) Deze peilmerken staan 6 meter diep in het zand en dalen mee met de diepe bodemdaling. Op de peilmerken wordt minimaal eens per drie jaar de hoogte gemeten. Ten behoeve van de gaswinning Ternaard is reeds een serie peilmerkclusters bijgeplaatst. Dit zijn M23, M20 en M19 in figuur 1. Hierop worden sinds twee jaar metingen verricht.

Op enkele plekken op het land zijn continue GPS-loggers geïnstalleerd. Deze loggers worden maandelijks uitgelezen. Ze hebben dan ook een signalerende functie. Wanneer de bodemdaling sneller gaat dan verwacht, kan dat aanleiding zijn tot aanvullende geodetische metingen in de omgeving. Ten behoeve van de monitoring van de bodemdaling door de gaswinning Ternaard is in de omgeving van Ternaard een GPS-logger geplaatst (Figuur 1).



Figuur 1: Kombergingsgebied Pinkegat met in groen de gasvelden. Het groen-wit gestreepte gasveld Ternaard is nog niet in productie. Verspreid over het gebied zijn de ligging van peilmerkclusters in de Waddenzee (rode driehoekjes), GPS loggers die continu de hoogte meten (paarse driehoekjes) en peilmerken voor geodetische metingen op het land (zwarte stippen) weergegeven.

Wadplaten

Voor de wadplaten (Habitattype 1140) gaat het om het behoud van de omvang en kwaliteit van dit habitattype. De mogelijke invloed van de bodemdaling op het areaal wordt gemonitord door tweemaal per jaar de wadplaathoogte in te meten met laser altimetrie (LiDAR). Schrijvershof et al. (2018) geven een up-to-date overzicht van de LiDAR metingen die tot nu toe zijn uitgevoerd en de uitkomsten daarvan. Naast de metingen van de wadplaathoogte worden op een aantal hoge wadplaten Spijkermetingen uitgevoerd die de hoogteontwikkeling op een aantal locaties zeer nauwkeurig weergeven (Krol, 2018). In voorbereiding op de mogelijke monitoring voor de gaswinning Ternaard is in 2015 begonnen met spijkermetingen op de Piet Scheve plaat.

De kwaliteit van de droogvallende wadplaten wordt onder andere bepaald door aanwezigheid van zogenoemde biogene structuren en door de biomassa en verspreiding van bodemdieren die bepalend is voor de foerageerfunctie voor beschermde vogelsoorten. Biogene structuren bestaan hoofdzakelijk uit schelpdierbanken (mossels/oesters). Deze worden jaarlijks door Wageningen Marine Research gekarteerd. De biomassa en verspreiding van bodemdieren wordt jaarlijks gemeten door het NIOZ (SIBES monitoring) en Wageningen Marine Research (MOSKOK monitoring). Samen met de LiDAR-data worden deze gegeven over bodemdieren verwerkt in het ecologisch draagkrachtmodel voor wadvogels (WADMAP). Een update beschrijving van deze werkwijze is te vinden in Ens et al. (2018).

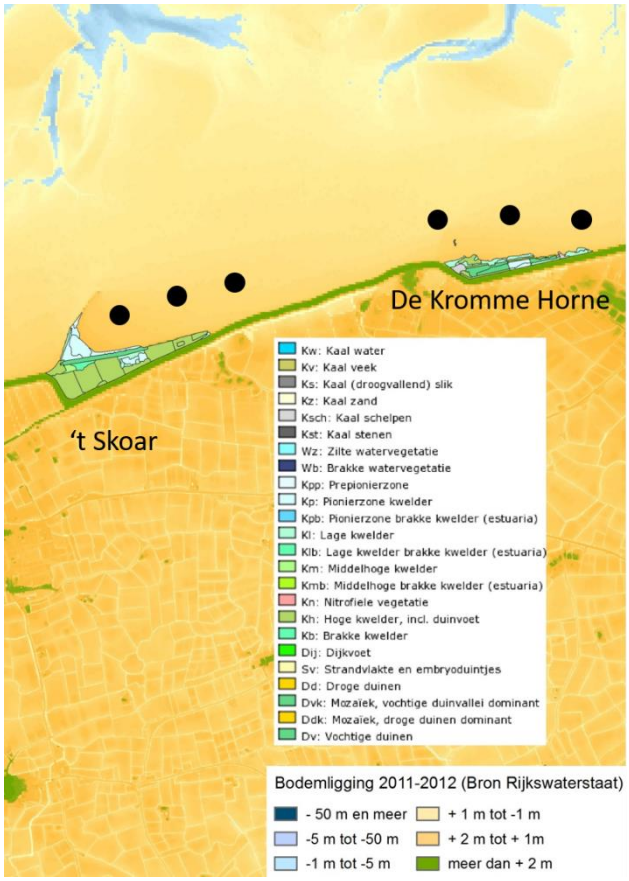
Vogels

De monitoring van vogeldichtheden op hoogwatervluchtplaatsen wordt gecoördineerd door Sovon. In het kader van het monitoringprogramma voor gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen wordt de ontwikkeling in het aantal vogels jaarlijks geëvalueerd (Ens et al. 2018). Voor soorten die een afwijkende ontwikkeling vertonen in het bodemdalingsgebied wordt gekeken of er sprake is van een

afname van de draagkracht van het voorliggende wad om te foerageren. Hiertoe dient het ecologisch draagkrachtmodel WADMAP te worden ingezet.

Kwelders

Binnen het beïnvloedingsgebied van de bodemdaling door de gaswinning Ternaard liggen 2 kleine kwelders. Dit zijn 't Skoar en de Kromme Horne (Fig. 2). Beide kwelders zijn onderdeel van de VEGWAD kartering, wat inhoudt dat er een maal per zes jaar een vegetatiekartering plaatsvindt. Omdat de bodemdaling door de gaswinning Ternaard zich onder het wad concentreert, is de bodemdalingssnelheid onder deze kwelders naar verwachting minder dan 1mm per jaar. Deze beperkte bodemdalingssnelheid betekent dat de meetfrequentie van de VEGWAD kartering voldoende is om de ontwikkelingen te monitoren. Jaarlijks zal informatie worden verzameld over de opslibbingsnelheid op de kwelder. Dit gebeurt, afhankelijk van de mate van beweiding, a.d.h.v. SEB metingen of tegelmetingen (6 eenheden per kwelder).



Figuur 2: De Kwelders 't Skoar en de Kromme Horne. De gekleurde vakken tonen de resultaten uit de vegetatiekartering "VEGWAD". De zwarte stippen zijn mogelijk locaties voor aanvullende spijkermetingen.

Uit de kweldermonitoring op Ameland en de Paezumerlannen weten we dat regressie, kliferosie en successie van een kwelder gerelateerd kunnen worden aan de mate van sedimentatie/erosie van het voorliggende wad. Om de relaties tussen de ontwikkelingen op het voorliggende wad en deze kleine kwelders te kunnen bepalen worden er op het wad boven de betreffende kwelders aanvullende Spijkermetingen uitgevoerde geplaatst. Dit zijn er 3 per kwelder en fig. 2 geeft een indicatie van de locatie voor de Spijkermetingen.

Rapportage

Als onderdeel van het monitoringprogramma voor gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, worden de resultaten uit het hierboven beschreven monitoringprogramma jaarlijks gerapporteerd aan het bevoegd gezag. De ministers van EZK en LNV leggen de rapportages ter controle voor aan de Auditcommissie m.e.r., waarna de resultaten door de minister van EZK met de Tweede Kamer kunnen worden gedeeld. De NAM draagt er zorg voor de resultaten te delen met de commissie Waddengas 2006.

COLOFON

PASSENDE BEOORDELING GASBORING EN GASWINNING TERNAARD

KLANT
Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

AUTEUR
Arcadis

PROJECTNUMMER
C05058.000189

ONZE REFERENTIE
084048153 D

DATUM
20 mei 2020

STATUS
Definitief

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland
+31 (0)88 4261 261

www.arcadis.com

AERIUS CALCULATOR

Dit document bevat rekenresultaten van AERIUS Calculator. Het betreft de hoogst berekende stikstofbijdragen per stikstofgevoelig Natura 2000-gebied, op basis van rekenpunten die overlappen met habitattypen en/of leefgebieden die aangewezen zijn in het kader van de Wet natuurbescherming, gekoppeld aan een aangewezen soort, of nog onbekend maar mogelijk wel relevant.

De berekening op basis van stikstofemissies gaat uit van de componenten ammoniak (NH_3) en/of stikstofoxide (NO_x).

Wilt u verder rekenen of gegevens wijzigen? Importeer de pdf dan in Calculator. Voor meer toelichting verwijzen wij u naar de website www.aerius.nl.

Berekening Basisvariant

- Kenmerken
- Samenvatting emissies
- Depositieresultaten
- Gedetailleerde emissiegegevens

Verdere toelichting over deze PDF kunt u vinden in een bijbehorende leeswijzer. Deze leeswijzer en overige documentatie is te raadplegen via: https://www.aerius.nl/handleidingen-en-leeswijzers.

AERIUS CALCULATOR

Contact

Rechtspersoon	Inrichtingslocatie
NAM	xxxx, xxxx xx Ternaard

Activiteit

Omschrijving	AERIUS kenmerk
Gaswinning Ternaard	RvkCCjegsyz4

Datum berekening	Rekenjaar	Rekenconfiguratie
30 april 2020, 08:20	2020	Berekend voor natuurgebieden

Totale emissie

	Situatie 1
NOx	2.905,84 kg/j
NH3	< 1 kg/j

Resultaten

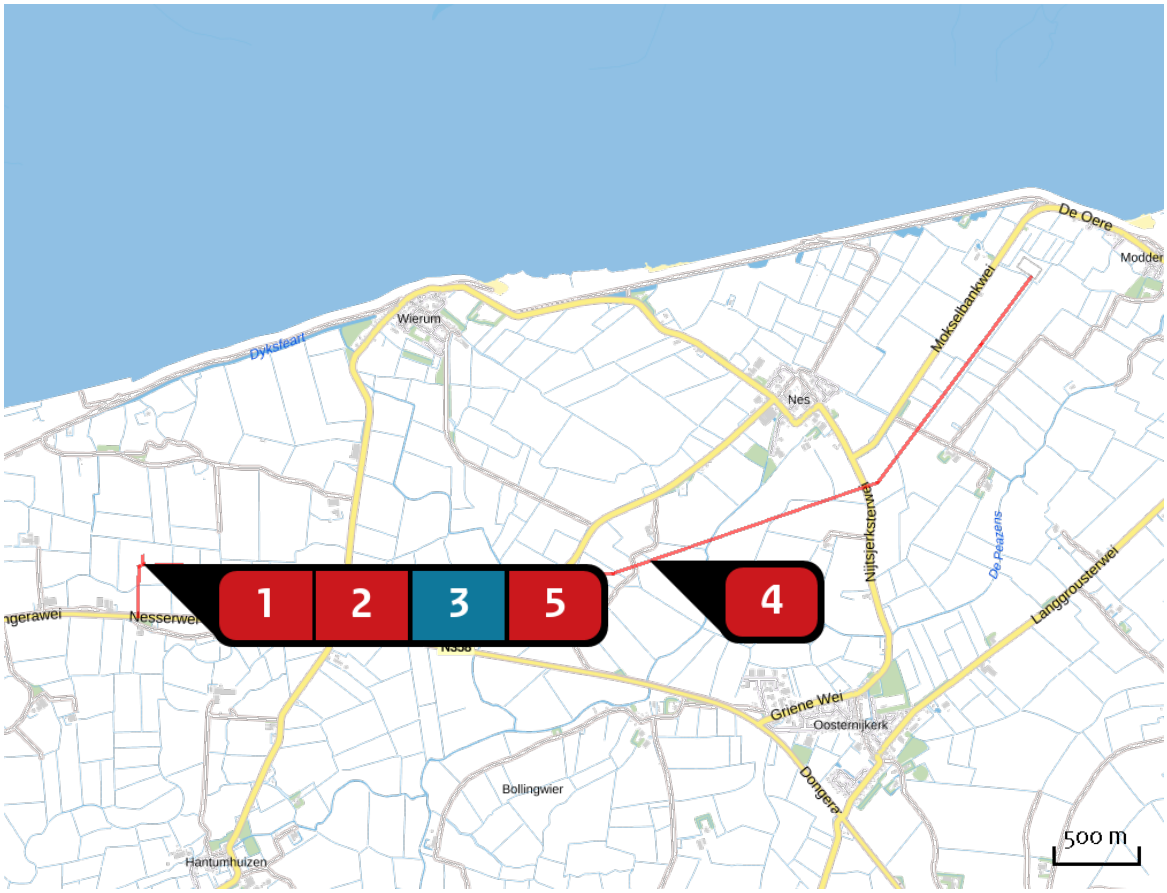
Hectare met hoogste bijdrage (mol/ha/j)

Natuurgebied	Bijdrage
Waddenzee	0,11

Toelichting

Berekening depositie boring en aanleg leiding op basis van de herziene uitgangspunten van 31 maart 2020. Basisvariant.

Locatie
Basisvariant



Emissie
Basisvariant

Bron Sector		Emissie NH3	Emissie NOx
1	TRN_Inrichting locatie Mobiele werktuigen | Bouw en Industrie	-	28,06 kg/j
2	TRN_Generatoren boorinstallatie Mobiele werktuigen | Bouw en Industrie	-	688,60 kg/j
3	TRN_2 fakkels Energie | Energie	-	1.664,00 kg/j
4	TRN_Aanleg leidingtracé zuid Mobiele werktuigen | Bouw en Industrie	-	525,12 kg/j
5	TRN_verkeer Wegverkeer | Buitenwegen	< 1 kg/j	< 1 kg/j

Resultaten stikstof gevoelige Natura 2000 gebieden (mol/ha/j)

Natuurgebied	Hoogste bijdrage	Bijdrage op (bijna) overbelaste hexagonen*
Waddenzee	0,11	0,07
Duinen Schiermonnikoog	0,02	
Noordzeekustzone	0,01	
Duinen Ameland	0,01	

* Als de hoogste depositietoename plaatsvindt op een hexagoon waar géén sprake is van een (naderende) stikstofoverbelasting, dan is de hoogste toename op een hexagoon met wel een (naderende) stikstofoverbelasting in deze kolom weergegeven.

Resultaten per habitattype (mol/ha/j)

voor de 10 stikstofgevoelige Natura 2000-gebieden met het hoogste resultaat

Waddenzee

Habitattype	Hoogste bijdrage	Bijdrage op (bijna) overbelaste hexagonen*
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	0,11	0,07
H1310A Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)	0,09	0,01
H1320 Slijkgrasvelden	0,05	0,01
H2120 Witte duinen	0,01	
H2130A Grijze duinen (kalkrijk)	0,01	
H2110 Embryonale duinen	0,01	
H2160 Duindoornstruwelen	0,01	
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	0,01	
H2170 Kruipwilgstruwelen	0,01	
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	0,01	

Duinen Schiermonnikoog

Habitattype	Hoogste bijdrage	Bijdrage op (bijna) overbelaste hexagonen*
H2180B Duinbossen (vochtig)	0,02	
ZGH2180Abe Duinbossen (droog), berken-eikenbos	0,02	
ZGH2130B Grijze duinen (kalkarm)	0,02	
ZGH2160 Duindoornstruwelen	0,01	
H9999:6 Habitattype onbekend/onzeker KDW op basis meest kritische relevante type (H2130B;H2130C).	0,01	
H2170 Kruipwilgstruwelen	0,01	
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	0,01	
H2190C Vochtige duinvalleien (ontkalkt)	0,01	
ZGH2180B Duinbossen (vochtig)	0,01	
H2190Aom Vochtige duinvalleien (open water), oligo- tot mesotrofe vormen	0,01	
ZGH2120 Witte duinen	0,01	
ZGH2170 Kruipwilgstruwelen	0,01	
H2130C Grijze duinen (heischraal)	0,01	
ZGH2180C Duinbossen (binnenduinrand)	0,01	
ZGH2190C Vochtige duinvalleien (ontkalkt)	0,01	
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	0,01	
H6410 Blauwgraslanden	0,01	
ZGH2130A Grijze duinen (kalkrijk)	0,01	
ZGH2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	0,01	

Duinen Schiermonnikoog

Habitattype	Hoogste bijdrage	Bijdrage op (bijna) overbelaste hexagonen*
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	0,01	

Noordzeekustzone

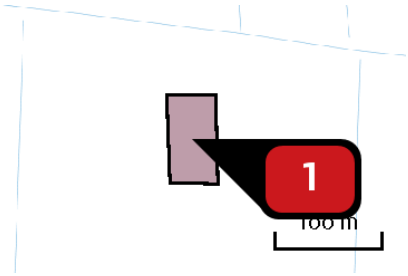
Habitattype	Hoogste bijdrage	Bijdrage op (bijna) overbelaste hexagonen*
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	0,01	
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	0,01	
H2110 Embryonale duinen	0,01	
H1310A Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)	0,01	
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	0,01	

Duinen Ameland

Habitattype	Hoogste bijdrage	Bijdrage op (bijna) overbelaste hexagonen*
ZGH2160 Duindoornstruwelen	0,01	
ZGH2120 Witte duinen	0,01	
H2160 Duindoornstruwelen	0,01	
ZGH2130B Grijze duinen (kalkarm)	0,01	
H2170 Kruipwilgstruwelen	0,01	
H9999:5 Habitattype onbekend/onzeker KDW op basis meest kritische relevante type (H2130B;H2130C;H6230).	0,01	
H2130B Grijze duinen (kalkarm)	0,01	
H2180Abe Duinbossen (droog), berken-eikenbos	0,01	
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	0,01	
H2180B Duinbossen (vochtig)	0,01	
H2120 Witte duinen	0,01	
ZGH2180B Duinbossen (vochtig)	0,01	
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	0,01	
ZGH2130A Grijze duinen (kalkrijk)	0,01	
H2130A Grijze duinen (kalkrijk)	0,01	
ZGH2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)	0,01	
ZGH2180Abe Duinbossen (droog), berken-eikenbos	0,01	
H2190Aom Vochtige duinvalleien (open water), oligo- tot mesotrofe vormen	0,01	

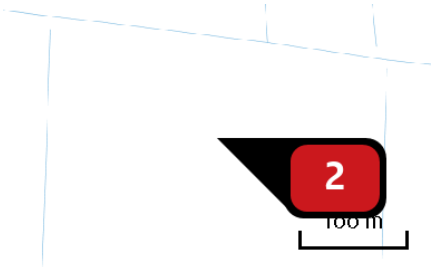
* Als de hoogste depositietoename plaatsvindt op een hexagoon waar géén sprake is van een (naderende) stikstofoverbelasting, dan is de hoogste toename op een hexagoon met wel een (naderende) stikstofoverbelasting in deze kolom weergegeven.

Emissie (per bron)
Basisvariant



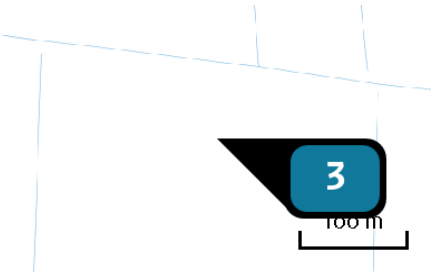
Naam	TRN_Inrichting locatie
Locatie (X,Y)	195170, 600384
NOx	28,06 kg/j

Voertuig	Omschrijving	Brandstof verbruik (l/j)	Uitstoot hoogte (m)	Spreiding (m)	Warmte inhoud (MW)	Stof	Emissie
AFW	voorbereiding + constr.werkz.		4,0	4,0	0,0	NOx	28,06 kg/j

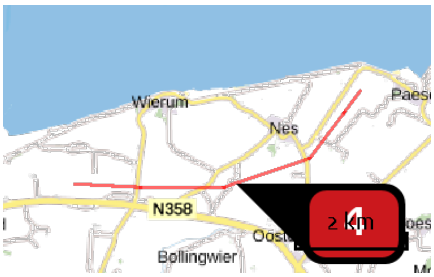


Naam	TRN_Generatoren boorinstallatie
Locatie (X,Y)	195168, 600392
NOx	688,60 kg/j

Voertuig	Omschrijving	Brandstof verbruik (l/j)	Uitstoot hoogte (m)	Spreiding (m)	Warmte inhoud (MW)	Stof	Emissie
AFW	Generator		6,0	0,0	0,1	NOx	688,60 kg/j

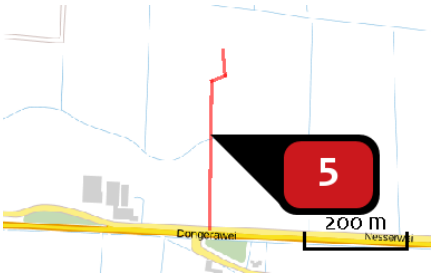


Naam	TRN_2 fakkels
Locatie (X,Y)	195177, 600414
Uitstoothoogte	21,0 m
Warmteinhoud	197,000 MW
Temporele variatie	Standaard profiel industrie
NOx	1.664,00 kg/j



Naam	TRN_Aanleg leidingtracé zuid
Locatie (X,Y)	198116, 600380
NOx	525,12 kg/j

Voertuig	Omschrijving	Brandstof verbruik (l/j)	Uitstoot hoogte (m)	Spreiding (m)	Warmte inhoud (MW)	Stof	Emissie
AFW	Dieselmaterieel		4,0	4,0	0,0	NOx	525,12 kg/j



Naam	TRN_verkeer
Locatie (X,Y)	195130, 600242
NOx	< 1 kg/j
NH3	< 1 kg/j

Soort	Voertuig	Aantal voertuigen	Stof	Emissie
Standaard	Licht verkeer	40,0 / jaar	NOx NH3	< 1 kg/j < 1 kg/j
Standaard	Zwaar vrachtverkeer	52,0 / jaar	NOx NH3	< 1 kg/j < 1 kg/j

Disclaimer

Hoewel verstrekte gegevens kunnen dienen ter onderbouwing van een vergunningaanvraag, kunnen er geen rechten aan worden ontleend. De eigenaar van AERIUS aanvaardt geen aansprakelijkheid voor de inhoud van de door de gebruiker aangeboden informatie. Bovenstaande gegevens zijn enkel bruikbaar tot er een nieuwe versie van AERIUS beschikbaar is. AERIUS is een geregistreerd handelsmerk in Europa. Alle rechten die niet expliciet worden verleend, zijn voorbehouden.

Rekenbasis

Deze berekening is tot stand gekomen op basis van:

AERIUS	versie 2019A_20200403_6c571f9654
Database	versie 2019A_20200403_6c571f9654

Voor meer informatie over de gebruikte methodiek en data zie:
https://www.aerius.nl/nl/factsheets/release/aerius-calculator-2019A

12 Bijlage B: Seismische Risico Analyse

De winning van aardgas gaat gepaard met een daling van de druk in de ondergrond met als gevolg een verandering van de gesteentespanningen. Deze verandering van spanning kan leiden tot plotselinge bewegingen langs bestaande breuken, waardoor mogelijk een lichte aardbeving kan plaatsvinden. In Nederland is/wordt uit ongeveer 140 olie- en gasvelden op het vasteland geproduceerd. Boven ongeveer 20% van de velden zijn bevingen geregistreerd. Boven 11 velden zijn bevingen geregistreerd die ook duidelijk aan het oppervlak voelbaar waren (Magnitude meer dan 2,0 op de schaal van Richter).

Stap 1: Inschatten risicopotentieel voor de verschillende voorkomens. Voor het inschatten van het risicopotentieel is uitgegaan van de maximale drukdaling volgens het “high case” productieprofiel[14].

De kans op beven van een olie- of gasvoorkomen
In de studie ‘Deterministische Hazard Analyse voor Geïnduceerde Seismiciteit (DHAIS)[15] is onderzocht welke eigenschappen (geologische, productietechnische en geomechanische eigenschappen) van olie- en gasvoorkomens invloed hebben op het wel of niet optreden van aardbevingen. In 2012 is een update van deze studie uitgevoerd, waarin alle nieuwe data zijn meegenomen tot mei 2010[16]. Aan de hand van de volgende parameters van een olie- of gasvoorkomen wordt de kans op beven van dat voorkomen bepaald:

- DP/Pini: De ratio van drukval (DP) en initiële druk (Pini) in het reservoir;
- E: de verhouding tussen de Young’s moduli (stijfheidsmoduli) van de ‘overburden’ en het reservoirgesteente;

$$E = \frac{E_{burden}}{E_{reservoir}}$$

- B: een maat voor de breukdichtheid van het reservoir.

$$B = \frac{breukoppervlakte^{3/2}}{brutogesteentevolume} = \frac{l_b^{3/2} \cdot h^{3/2}}{A \cdot h} = \frac{l_b^{3/2} \cdot \sqrt{h}}{A}$$

Waarbij:

l_b = De totale breuklengte van de intra reservoir breuken en de randbreuken van het voorkomen in meters;
h = De maximale dikte van de gaskolom van het voorkomen in meters;
A = De oppervlakte van het voorkomen gemeten binnen de gas-water-contact-dieptecontour (in vierkante meters);

---

[14] Het hoog scenario productieprofiel is gebruikt om de druk te bereken in het veld. Om een conservatieve schatting te geven van de mogelijke bovengrondse gevolgen is in dit geval gekozen om de druk te middelen voor het gehele veld.
[15] TNO-rapport NITG 04-171-C. Van Eijs, 2004. Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit
[16] TNO-rapport 2012 R10198. Van Thienen, 2012. Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland.

De combinatie van de parameterwaarden geven een kans op beven voor een bepaald voorkomen gedurende de productietijd.

Reeds bevende voorkomens	
$DP/P_{ini} \geq 28\%$	B > 0,86 en E ≥ 1,34: P_h = 0.42 ± 0.08
	B > 0,86 en 1,01 ≤ E ≤ 1,33: P_l = 0.19 ± 0.05
	B < 0,86 en/of E < 1,01: verwaarloosbare kans
$DP/P_{ini} < 28\%$	Verwaarloosbare kans

De waarden die zijn gebruikt in de bepaling van de DHAIS-kans zijn gegeven in Tabel 12-1.

Tabel 12-1: Invoergegevens voor de bepaling van de DHAIS en de DHAIS kansen

Voorkomen	Reservoir dikte / gaskolom (m)[17]	Initiële druk (bar)	Totale drukdaling volgens hoog-scenario (bar)	Totale breuk-lengte (km)	Reservoir opper-vlakte (km^2)	Maximale waar-genomen aardbeving	Aantal aard-bevingen per jaar	DHAIS E[18]	DHAIS B	DHAIS kans
Ternaard	112	557	181	23,7	18,5	geen	geen	1,28	2,08	19%

Realistisch sterkste beving

Naast de kans op beven, wordt ook een theoretische waarde voor de “realistisch sterkste beving” (Mmax) bepaald. Er worden twee methoden gebruikt om de Mmax waarde te bepalen: op basis van breukgeometrie en op basis van energiebalans. In de Seismisch Risico Analyse leidraad worden beide methoden gebruikt. Voor de berekeningen van de Mmax is uitgegaan van de standaardwaarden voor de “stress drop” en “partitie coëfficiënt” die gegeven zijn in de leidraad (respectievelijk 5 MPa en 0,01). De veldspecifieke waarden die benodigd zijn voor de berekeningen en de uitkomsten voor de Mmax staan vermeld in Tabel 12-2.

Tabel 12-2: Invoergegevens voor de bepaling van de Mmax, en de Mmax waarden volgens de twee methoden.

Voorkomen	Langste breuklengte (km) [19]	Poisson's ratio[20]	Breukhoogte (m)	Mmax energiebalans	Mmax breukslip
Ternaard	6,5	0,2	112	3,4	3,7

Stap 2: Risico matrix

Voor het voorkomen Ternaard is het nodig gebleken om de risicomatrix te gebruiken (“Stap 2” van de SRA). Voor elke factor die bepaald is voor de onder- en bovengrond wordt een score gegeven waarbij de som van de scores een positie geeft in de risico matrix.

---

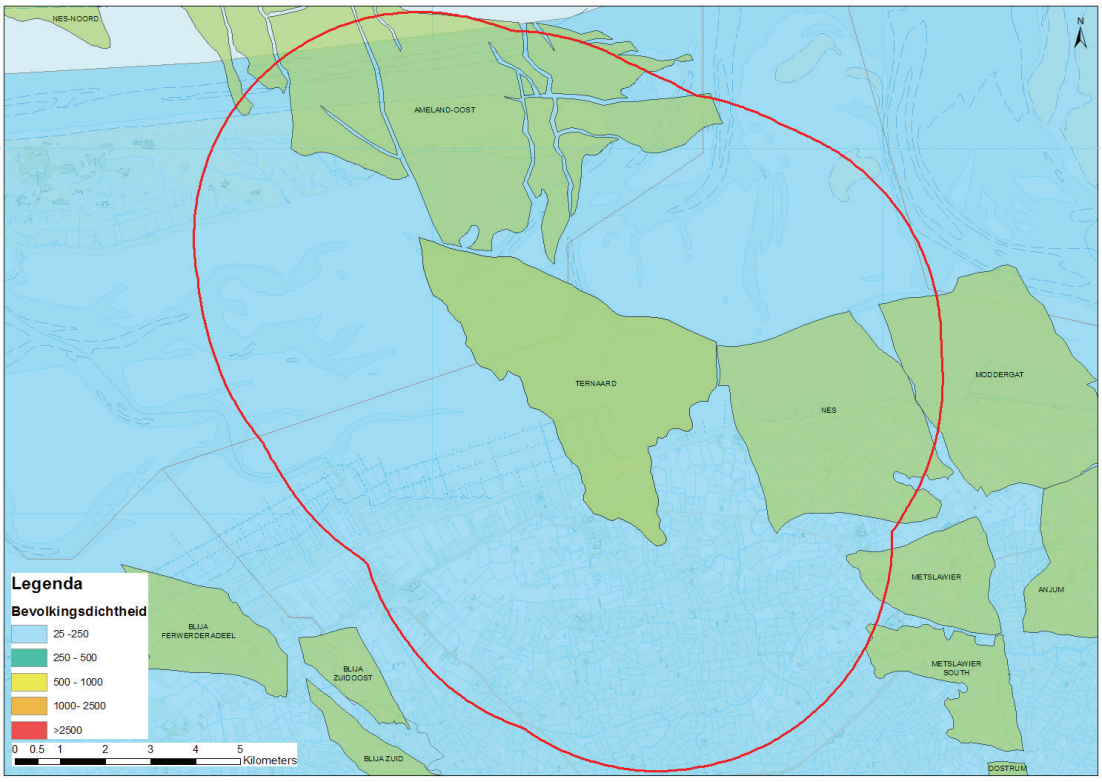
[17] Voor de DHAIS berekening wordt zowel de hoogte van de gaskolom als de totale reservoir dikte beschouwd. Het minimum van deze twee wordt gekozen voor de berekening van de “B” waarde zoals voorgeschreven door de DHAIS methodiek

[18] Young’s moduli ratio volgens TNO rapport: Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde Seismiciteit, NITG 04-171-C. Voor nieuwe velden wordt de ratio van een analoog veld met dezelfde reservoir seal combinatie gebruikt

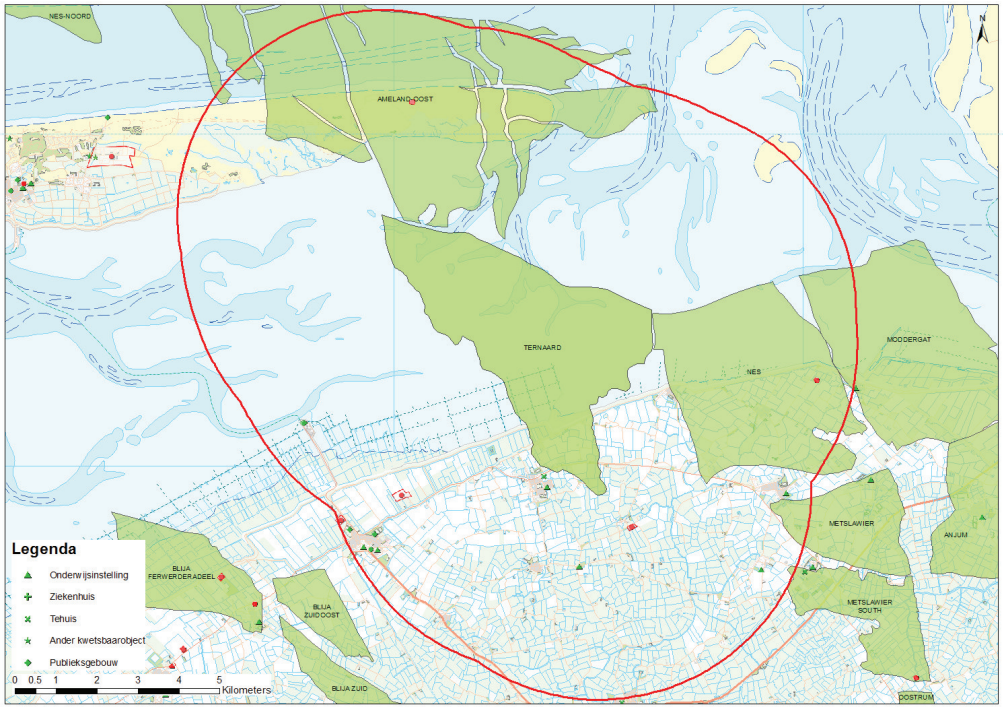
[19] Langste breuklengte is aangegeven op de kaart in bijlage C met blauwe pijl

[20] Poisson’s ratio gebaseerd op gemiddelde waarde voor gecementeerde zandsteen op basis van kernplugmetingen

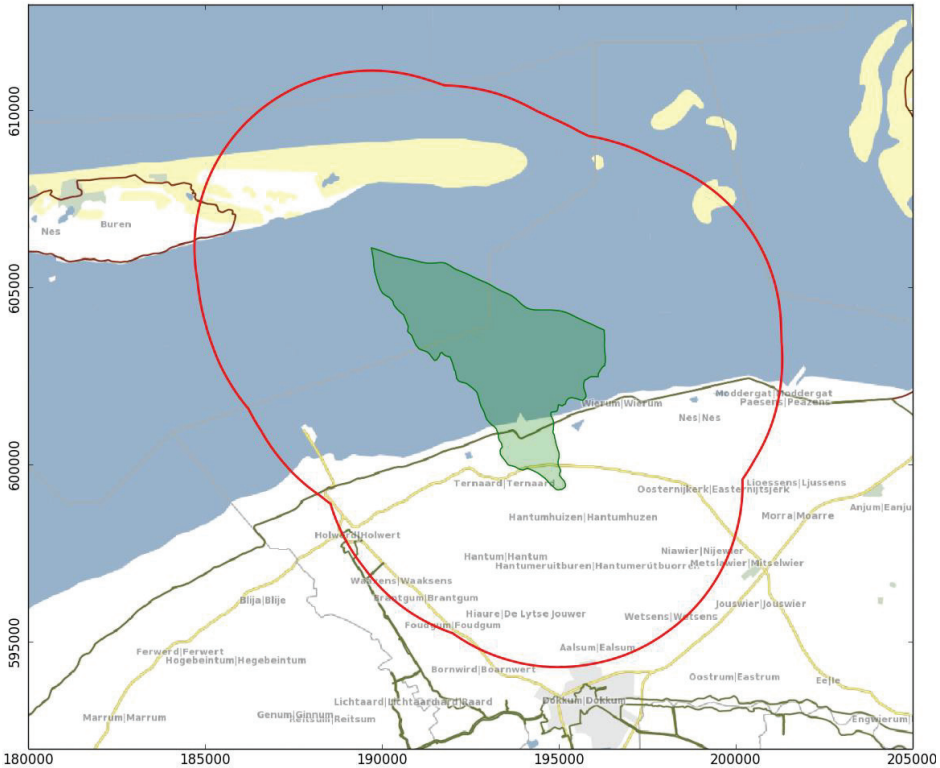
In dit deel van de bijlage worden de figuren en tabellen getoond die gebruikt zijn om tot een risicobeoordeling te komen. Figuur 12-1, Figuur 12-2, Figuur 12-3 tonen de situaties voor respectievelijk “Bevolkingsdichtheid”, “Industriële inrichtingen”, “Speciale gebouwen en vitale infrastructuur” en ”Dijken”. Figuur 12-4 toont de kaart van de grondsoorten in de ondiepe ondergrond kaart om de mate van opslingering te bepalen. Tabel 12-3 A en B toont de evaluatie en scores voor de invloedfactoren. De risicomatrix is afgebeeld in Figuur 8-4.



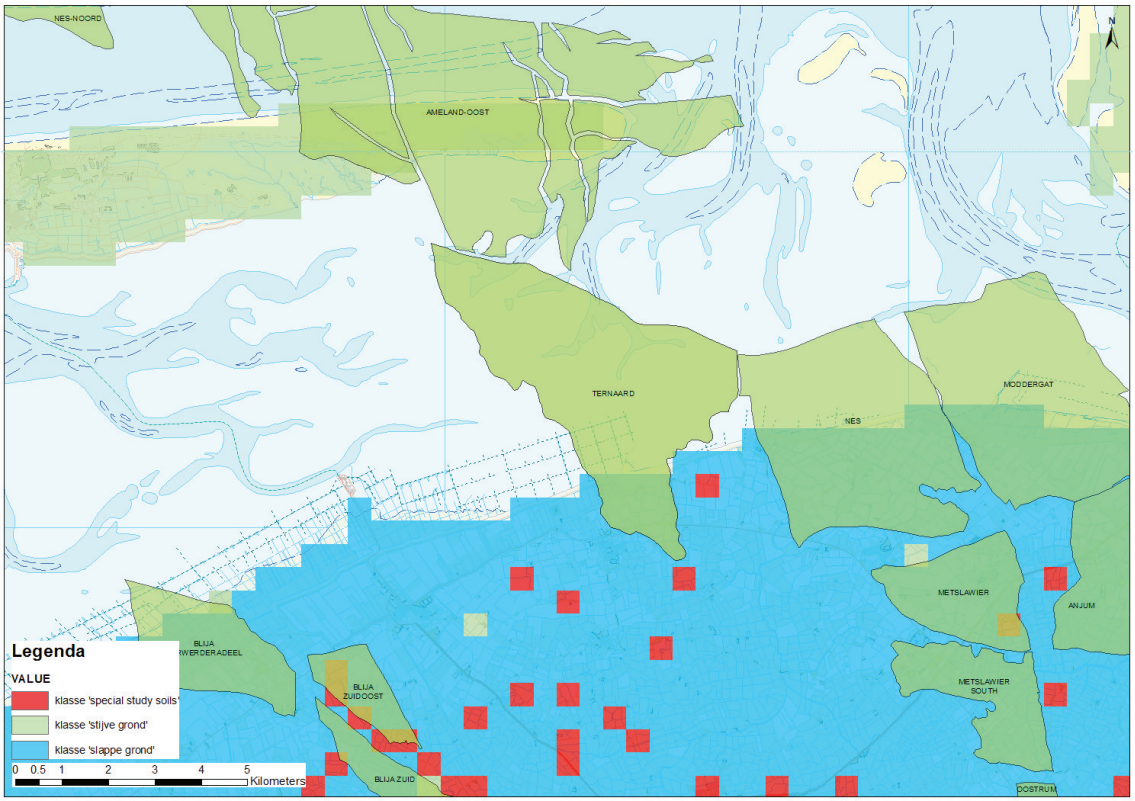
Figuur 12-1: Overzicht van de bevolkingsdichtheid boven het Ternaard veld.



Figuur 12-2: Overzicht van de industriële inrichtingen (rode punt), ziekenhuizen (groene plus) onderwijsinstellingen (groene driehoek), tehuizen (groene x) en publieksgebouwen (groene ruit) boven het Ternaard veld. De rode cirkel geeft de 5 km straal rond het Ternaard veld aan die relevant is voor de SRA.



Figuur 12-3: Overzicht van de dijken (bruin: primaire dijken, groen: secundaire dijken). De rode cirkel geeft de 5 km straal rond het Ternaard veld aan die relevant is voor de SRA.



Figuur 12-4: Overzicht van de grondsoorten in de ondiepe ondergrond om de mate van opslingering te bepalen

Uit de analyse op basis van bovenstaande figuren volgen de scores voor de verschillende factoren. Tabel 12-3 geeft de evaluatie en bijbehorende scores voor Ternaard.

Tabel 12-3 Kwantitatieve evaluaties (A) en daaruit voortkomende scores (B) voor de invloedfactoren onder- en bovengrond

A

Voorkomen	Dhais	Mmax	Analoge velden	Opslingering[21]	Bevolkingsdichtheid (aantal inwoners per km2)	Industriële inrichting	Speciale gebouwen en vitale infrastructuur	Dijken
Ternaard	P=19%	1 methode 3,6 - 4,0	Boven de lijn Amsterdam - Arnhem	30 - 60% slappe grond	< 250	1 boven het veld en/of meerdere binnen 5 km rond het veld.	1 school, tehuis en/of publieksgebouw boven het veld of meerdere binnen 5 km rond het veld.	Primaire dijken boven het veld

B

	score invloedfactoren ondergrond					score invloedfactoren bovengrond					
Voorkomen	Kans op beven of waargenomen bevingen	Magnitude	Ligging voorkomen	Opslingering	Genormaliseerde totaalscore ondergrond	Bevolkings dichtheid	Industriele inrichtingen	Speciale gebouwen en vitale infrastructuur	Dijken	Genormaliseerde totaalscore bovengrond	Categorie
Ternaard	1	2	2	2	0,5	0	3	2	4	0,56	I

[21] Aangenomen is dat de bodem onder de Waddenzee vooral uit zand is opgebouwd, waarmee deze bodem onder de klasse “stijve grond” valt.

1 FEBRUARI 2016

METHODIEK VOOR RISICOANALYSE OMTRENT GEÏNDUCEERDE BEVINGEN DOOR GASWINNING

TIJDELIJKE LEIDRAAD VOOR ADRESSERING MBB. 24.1.P, VERSIE 1.2

STAATSTOEZICHT OP DE MIJNEN
Postbus 24037, 2490 AA, Den Haag

INHOUDSOPGAVE

Inhoud

Inleiding 1

Achtergrond 1

Uitgangspunten 1

Afbakening 1

Process 1

Seismisch risico analyse 3

Stap 1: Screening potentieel 3

Stap 2: Risico matrix 4

Stap 3: kwantitatieve risicoanalyse 6

Implicaties 7

Referenties 8

Bijlage 1 9

Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland [4] 9

Bijlage 2 10

Bepaling sterkte realistisch sterkste beving 10

Bijlage 3 12

Risico Matrix Analyse 12

Inleiding

ACHTERGROND

Op grond van de Mijnbouwwet moet sinds 1 januari 2003 een seismische risico analyse omtrent bodemtrillingen als gevolg van de winning in het winningsplan worden opgenomen. In de memorie van toelichting op dit artikel wordt opgemerkt dat het verkenningsonderzoek naar risico's plaatsvindt op het niveau van afzonderlijke velden, maar ook op een brede basis waarbij de maatschappijen en onderzoeksinstellingen gezamenlijk onderzoek verrichten. Mede in dit verband zijn door TNO en KNMI verschillende studies verricht naar de seismische hazard door geïnduceerde aardbevingen. De resultaten van deze studies zijn samengevat en geïntegreerd in het TNO/KNMI integratie-rapport '*Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Integratie van deelstudies*' [1].

In reactie op het OVV-rapport 'Aardbevingsrisico's in Groningen' [2] heeft het kabinet aangegeven dat in de winningsplannen "mijnbouwondernemingen veiligheidsrisico's expliciet in kaart moeten brengen". Hiermee wil de minister borgen dat veiligheid een volwaardige plaats krijgt in de belangenafweging bij de besluitvorming.

Aangezien het in kaart brengen van veiligheidsrisico's verder gaat dan alleen de seismische hazard waarop tot nu toe de focus heeft gelegen, heeft de Minister van Economische Zaken het Staatstoezicht op de Mijnen gevraagd om, in afwachting van een door de maatschappijen en onderzoeksinstellingen te ontwikkelen definitieve leidraad voor het adresseren van het seismisch risico, met een gedragen tijdelijke leidraad voor het analyseren van de risico's ten gevolge van door gaswinning geïnduceerde aardbevingen te komen. Dit document geeft invulling aan dit verzoek.

UITGANGSPUNTEN

In deze tijdelijke leidraad is uitgegaan van bestaande onderzoeksresultaten. Voor de invulling van de methodologie in de leidraad is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van kwantificeerbare grootheden uit bestaande analyses en informatiebronnen. Deze leidraad kan in de toekomst op basis van nieuwe inzichten en onderzoeken worden aangepast of vervangen.

AFBAKENING

Deze leidraad geeft alleen invulling aan het in kaart brengen van het seismisch risico (=kans x effect) zoals vereist in het winningsplan (Mijnbouwbesluit artikel 24.1p). **Het is niet de brede risicobeoordeling die is voorzien in het wetsvoorstel tot wijzing van de Mijnbouwwet (versterking veiligheidsbelang en regie). Ook de duiding van de risico's (wat betekend de uitkomst van de in deze leidraad opgenomen methodologie bv. in termen van o.a. te verwachten schade; Mbb. 24.1.q) is géén onderdeel van deze leidraad en dient door de mijnbouwmaatschappij in het winningsplan te worden opgenomen.** Ten aanzien van de maatregelen om bodembeweging (Mbb 24.1r) dan wel schade ten gevolge van bodembeweging (Mbb 24.1s) te voorkomen of te beperken worden in de leidraad **slechts randvoorwaarden voor de monitoring en risicobeheersing** aangegeven.

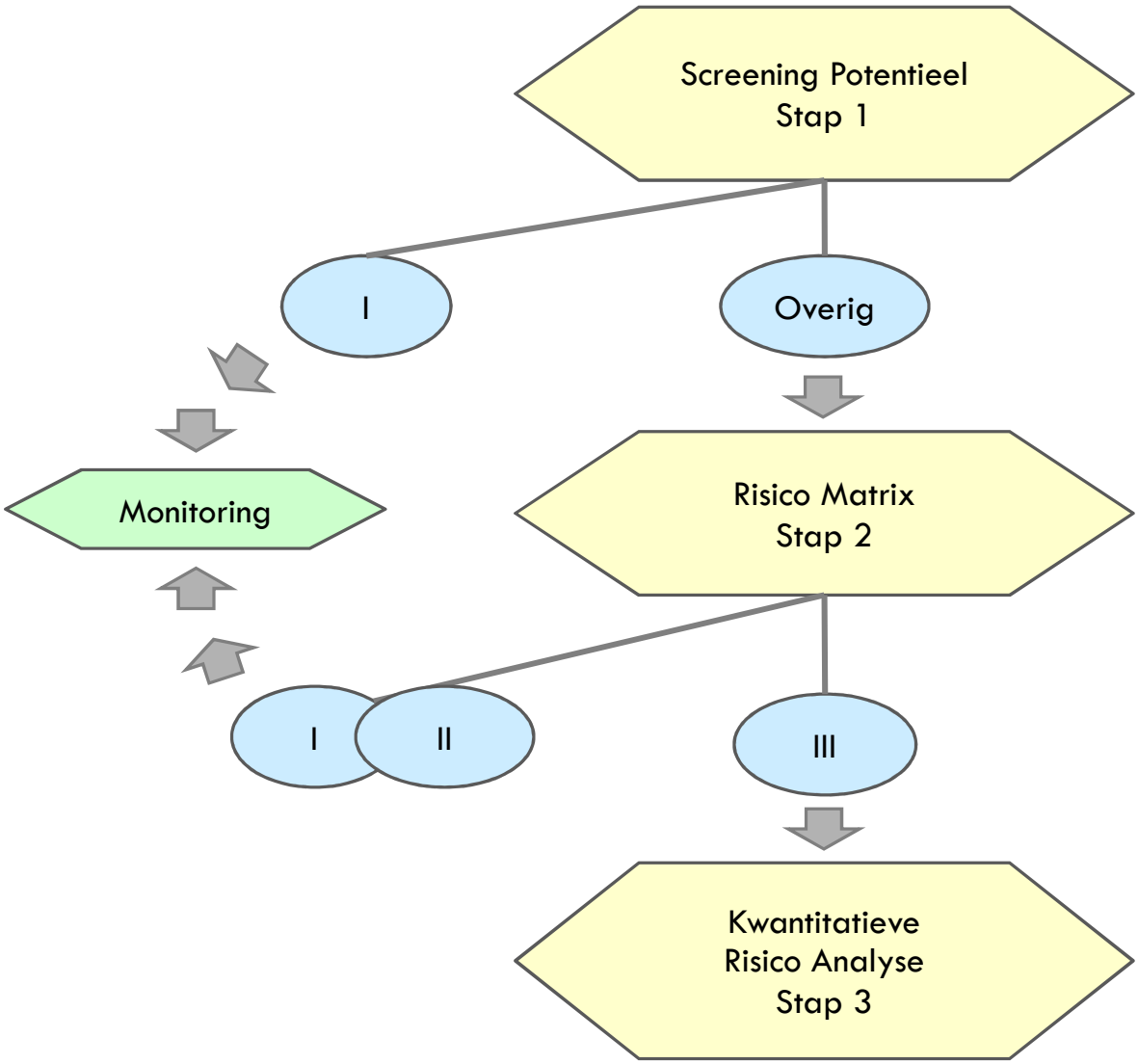
PROCESS

Staatstoezicht op de Mijnen heeft mede op basis van internationale literatuur en gebruiken een concept voor deze leidraad ontwikkeld [3] en nader uitgewerkt. Deze uitwerking is afgestemd met de Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (als grootste landoperator) en kennisinstituut TNO. Vervolgens is de methodologie besproken

binnen het Technisch Platform Aardbevingen (TPA), waarin zowel de mijnbouwondernemingen als kennisinstellingen vertegenwoordigd zijn.

Seismisch risico analyse

De methodologie in deze leidraad is erop gericht om in drie stappen onderscheid te maken tussen velden met een verschillend seismisch risicoprofiel. Hiervoor is een getrapte strategie geadopteerd bestaande uit drie stappen. Deze strategie wordt weergegeven in Figuur 1. Op basis van de uitkomsten van de verschillende stappen worden vervolgstappen genomen.



Figuur 1: Weergave van de verschillende stappen in de seismisch risico analyse.

STAP 1: SCREENING POTENTIEEL

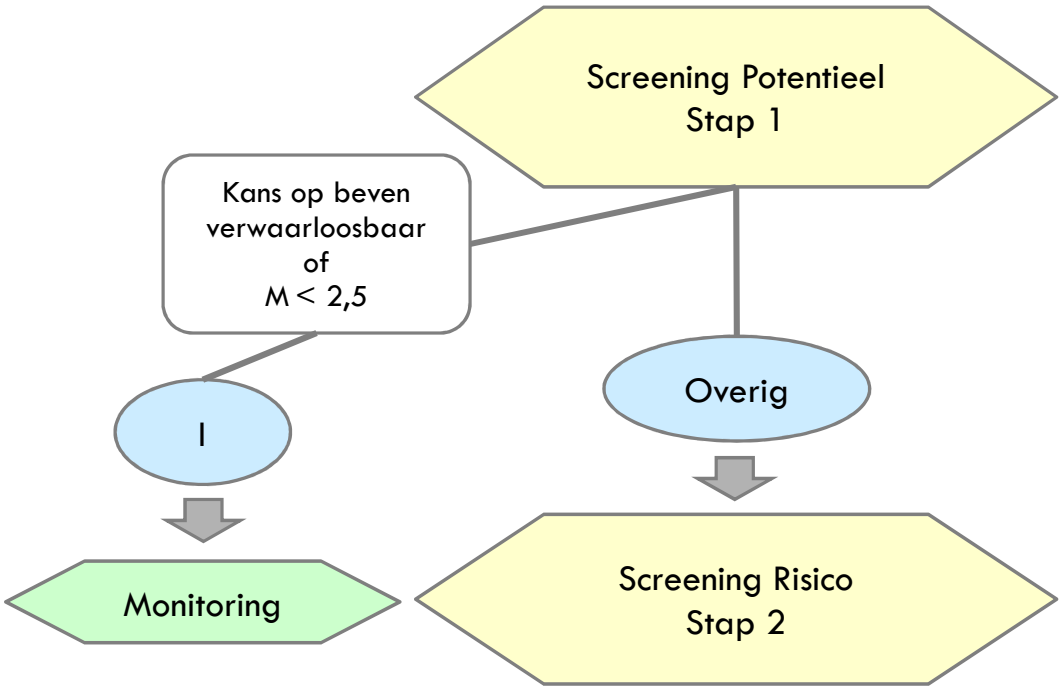
Allereerst wordt het potentiële vermogen van het gasveld om aardbevingen te genereren bepaald. In de studie 'Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland' [4,5] zijn, op basis van historische waarnemingen, statistische correlaties bepaald tussen parameters voor veld- en productiekenmerken

en het optreden van geïnduceerde bevingen. Op basis van deze correlaties kan de waarschijnlijkheid dat bevingen geïnduceerd worden door gasproductie, worden bepaald (Bijlage 1).

Daarnaast wordt op basis van de in het veld aanwezige breuken en op basis van de compactie een inschatting gemaakt van de sterkste beving waar realistisch gezien rekening mee moet worden gehouden. De methodologie voor deze berekeningen staan in Bijlage 2.

Voor velden die op basis van deze berekeningen een verwaarloosbare kans hebben om geïnduceerde bevingen te genereren of waar geen bevingen sterker dan M_l=2,5 op de schaal van Richter zijn te verwachten, zijn geen aanvullende onderzoekstappen noodzakelijk en volstaat monitoring d.m.v. het bestaande KNMI netwerk. Voor de overige velden wordt overgegaan tot de tweede stap in de analyse.

Figuur 2 geeft een overzicht van de beslisstructuur in stap 1.



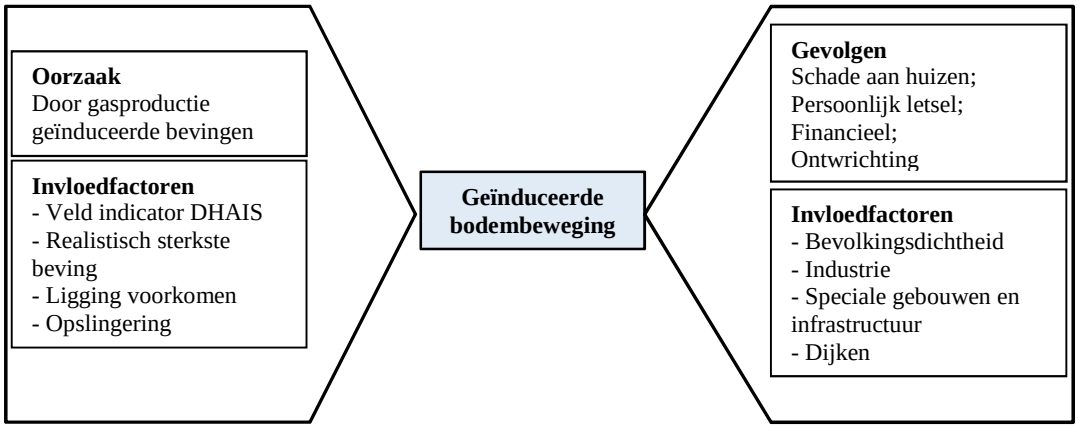
Figuur 2. Weergave van de beslisstructuur in stap1.

STAP 2: RISICO MATRIX

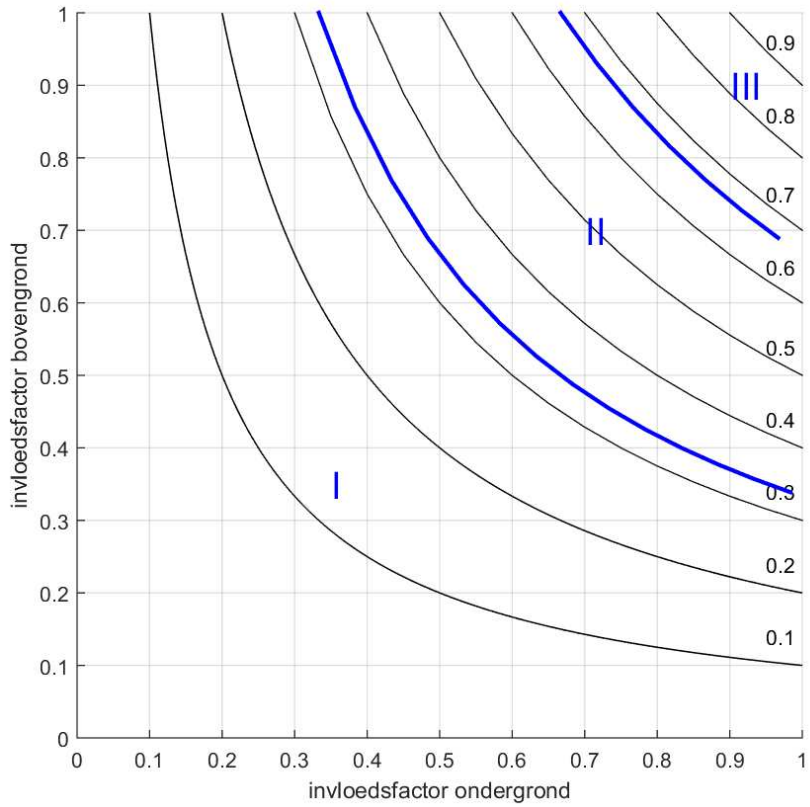
In stap 2 wordt op basis van een risico matrix benadering het risico van geïnduceerde aardbevingen verder gekwalificeerd. Figuur 3 geeft een schematische weergave van de verschillende factoren die bepalen of een geïnduceerde beving kan resulteren in een sterke grondbeweging (de invloedfactoren ondergrond) en de verschillende factoren die invloed hebben op de grootte van de mogelijke gevolgen (de invloedfactoren bovengrond).

In de risico matrix analyse worden de verschillende factoren zoveel mogelijk kwantitatief geanalyseerd en op basis van de uitkomst per factor gerankt (Bijlage 3). Over de scores van de individuele factoren wordt gesommeerd, zodat een totaalscore voor zowel de invloedfactoren ondergrond als de invloedfactoren bovengrond wordt bepaald. Deze worden genormaliseerd met het maximaal te behalen aantal punten voor

ondergrond cq. bovengrond en in de risico matrix tegen elkaar uitgezet waarmee kwalitatief een risicocategorie wordt bepaald (Figuur 4).



Figuur 3. Schematische weergave van de bedreigingen en gevolgen van geïnduceerde bevingen en de verschillende invloedfactoren die daarbij een rol spelen.



Figuur 4. De risico matrix. De zwarte lijnen zijn lijnen van gelijk genormaliseerd risico. De verdeling in categorieën is simpelweg gedaan op basis van 1/3 en 2/3 van het genormaliseerde risico.

De locatie in de risicomatrix is afhankelijk van de combinatie van de scores voor de invloedfactoren ondergrond en de invloedfactoren bovengrond. De duiding van het risico o.a. in termen van de mogelijke

schade is sterk afhankelijk van deze combinatie en de specifieke factoren waarvoor een hoge/lage score is bepaald. Er is geen algemene duiding per risicocategorie. De duiding kan alleen per voorkomen op basis van de uitkomsten van de analyse gegeven worden[1].

Voor velden waarvan op basis van de risico matrix analyses het seismisch risico door gasdepletie in de categorieën I en II vallen, zijn v.w.b. de screening geen verdere vervolgstappen nodig. Velden in categorie III vervolgen met stap 3.

STAP 3: KWANTITATIEVE RISICOANALYSE

De methodologie voor een kwantitatieve seismisch risicoanalyse in termen van individueel en maatschappelijk risico is ten dele uitgewerkt voor het Groningen gasveld [6, 7, 8, 9]. Indien andere velden in categorie III terecht komen zal het seismisch risico op een vergelijkbare wijze moeten worden gekwantificeerd..

[1] En vormt derhalve geen onderdeel van deze leidraad.

IMPLICATIES

Implicaties

Aan de inschatting van het risiconiveau voor mogelijke geïnduceerde bevingen bij gaswinning worden de volgende monitoringsverplichtingen, beheersmaatregelen en onderzoeksverplichtingen verbonden:

Categorie I:

- Monitoring met het huidige geofoon en accelerometer netwerk van het KNMI.

Categorie II:

- Duiding van de uitkomst van de risicomatrix analyse (Mbw 34.g en Mbb. 24.1.q)
- Monitoring met een minimale cataloguscompleetheid in de omgeving van het veld van magnitude 1,5,
- Monitoring in de omgeving van het veld aanvullen met accelerometers op de geofoonlocaties,
- Implementeren generiek seismisch-risicobeheersplan[2].

Categorie III:

- Monitoring met een minimale cataloguscompleetheid vanaf magnitude 0,5,
- Monitoring aanvullen met accelerometers op de geofoonlocaties,
- Monitoring van trillingen in huizen,
- Onderzoeksprogramma[3],
- Specifiek risicobeheersplan op basis van een Meet- en Regelprotocol.[4]

[2] Een plan waarin de operator de maatregelen beschrijft welke genomen worden bij het optreden van bevingen met een bepaalde sterkte cq. grondversnelling.
[3] Krijgt nadere invulling op basis van de oorzaak van het hoge risico.
[4] Met het Meet- en Regelprotocol wordt (half)jaarlijks getoetst en gerapporteerd of het risico nog binnen vastgestelde acceptabele grenzen blijft en bij (dreigende) overschrijding welke maatregelen getroffen worden om deze (dreigende) overschrijding te mitigeren..

REFERENTIES

Referenties

[1] TNO, 2012, *Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen; Integratie van deelstudies*, TNO-rapport 2012 R11139 (www.nlog.nl).

[2] OVV, 2015, Aardbevingsrisico's in Groningen; Onderzoek naar de rol van veiligheid van burgers in de besluitvorming over de gaswinning (1959-2014).

[3] Muntendam-Bos, A.G., J.P.A. Roest en J.A. de Waal, 2015, *A guideline for assessing seismic risk induced by gas extraction in the Netherlands*, The Leading Edge, 34(6), 672-677, doi: 10.1190/tle34060672.1.

[4] TNO, 2004, *Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit*, TNO-rapport NITG 04-171-C

[5] TNO, 2012, *Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland*, TNO-rapport 2012 R10198 (www.nlog.nl).

[6] Hazard and Risk Assessment for Induced Seismicity in Groningen – Interim Update November 2015, NAM, 7 November 2015.

[7] Een voorstel voor een toetsingsmethodiek voor mens-geïnduceerde aardbevingen in Groningen, Prof. Pieter van Gelder, TU Delft, Faculteit TBM, 16 november 2015.

[8] Seismisch risico Groningenveld; beoordeling en advies, SodM, December 2015.

[9] Handelingsperspectief voor Groningen, Eindadvies van de adviescommissie 'Omgaan met risico's van geïnduceerde aardbevingen', december 2015.

Bijlage 1

DETERMINISTISCHE HAZARD ANALYSE VOOR GEÏNDUCEERDE SEISMICITEIT IN NEDERLAND [4]

Deze studie gebruikt gegevens over seismiciteit (bron: www.knmi.nl), drukdata en eigenschappen van de voorkomens. Aan de hand van de volgende parameters van een olie- of gasvoorkomen wordt de kans bepaald dat zich, op enig moment gedurende de productie van een voorkomen, een beving voordoet:

- DP/Pini: De ratio van drukval (DP) en initiële druk (Pini) in het reservoir;
- E: de verhouding tussen de Young's moduli (stijfheidsmoduli) van de 'overburden' -en het reservoirgesteente;
- B: een maat voor de breukdichtheid van het reservoir, gedefinieerd als:

$$B = \frac{breukoppervlakte^{3/2}}{brutogesteentevolume} = \frac{l_b{}^{3/2}\, h^{3/2}}{A\, h} = \frac{l_b{}^{3/2}\, h^{1/2}}{A}$$

met h de maximale dikte van de gaskolom van het voorkomen is, l_b de totale breuklengte van de intra-reservoir breuken en de randbreuken van het voorkomen en A het oppervlakte (gemeten binnen de GWC dieptecontour) van het voorkomen [m^2].

De kans-klassen worden hieronder weergegeven (met P_h de kans op beven van het olie-gasvoorkomen):

Reeds bevende voorkomens	
$DP/P_{ini} \geq 28\%$	B > 0,86 en E ≥ 1,34: P_h = 0.42 ± 0.08
	B > 0,86 en 1,01 ≤ E ≤ 1,33: P_l = 0.19 ± 0.05
	B < 0,86 en/of E < 1,01: verwaarloosbare kans
$DP/P_{ini} < 28\%$	Verwaarloosbare kans

De analyse geeft geen informatie over de vraag hoe groot de frequentie en magnitude van een eventuele beving zou kunnen zijn.

Bijlage 2

Bepaling sterkte realistisch sterkste beving

Er worden twee methoden gebruikt om de sterkte van de realistisch sterkste beving te bepalen: op basis van breukgeometrie en op basis van energiebalans. Beide methoden kennen grote aannamen en onzekerheden. In deze Seismisch Risico Analyse leidraad worden daarom beide methoden gebruikt.

Methode 1: breukgeometrie

De hoeveelheid energie die vrijkomt bij een beving en daarmee de sterkte van een beving schaalt met het breukoppervlak dat beweegt. De grootte van een breuk is daarmee limiterend voor de sterkste beving die op die breuk kan plaatsvinden. Deze relatie wordt gegeven door (Kanamori, 2001; Stein en Wysession, 2006):

$$M_0 = GAu = \frac{3\pi}{8}\Delta\sigma(w^2 L)$$

Waarbij M_0 het seismisch moment (maat voor de hoeveelheid energie) is dat bij een beving vrijkomt, G de schuifmodulus, A het breukoppervlak waarover beweging plaatsvind, u de gemiddelde slip (verplaatsing) op de breuk, $\Delta\sigma$ stress drop, oftewel de spanning die tijdens een beving is gerelaxeerd, w de hoogte en L de lengte van de breuk. De relatie tussen het seismisch moment (M_0) en de magnitude (M) van een beving wordt gegeven door (Hanks and Kanamori, 1979):

$$log_{10}\, M_0 = 9.1 + 1.5M$$

Voor tektonische bevingen varieert de stress drop tussen de 1MPa (10 bar) en 10 MPa (100 bar) (Abercrombie, 1995). Voor de meeste geïnduceerde bevingen komt de stress drop niet boven de 5MPa (50 bar) uit. Voor de bepaling van de sterkste realistisch mogelijke beving kan hiervan worden uitgegaan. Een stress drop van 1MPa geeft een 0,5 magnitude punt lagere magnitude, een stress drop van 10MPa een verhoging met 0,2 magnitude punt.

De grootte van de breukoppervlakken waarover slip kan plaatsvinden is voor geïnduceerde bevingen moeilijk vast te stellen. Op basis van geomechanische modellen (Roest & Kuilman, 1994; Mulders, 2003; Muntendam-Bos et al, 2008) is bekend dat de spanningstoename door depletie vooral op het breukoppervlak in het reservoir optreedt, met een lichte spanningstoename op de breuk net buiten het reservoir. Voor de bepaling van een realistische sterkste beving wordt voor het breukoppervlak uitgegaan van het breukoppervlak dat aan het reservoir grenst. Het is echter niet uitgesloten dat ook grotere bewegingen op het oppervlak buiten het reservoir kunnen optreden.

De schuifmodulus (G) kan worden bepaald op basis van de Young's modulus (E) en de Poisson Ratio (υ):

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)}$$

Methode 2: Energiebalans

Voor geïnduceerde aardbevingen geldt dat slechts een deel van de energie die er door de activiteit – in dit geval onttrekking van olie of gas – opgebouwd wordt tijdens een beving vrij kan komen. Deze relatie is empirisch bepaald. Op basis van Kostrov (1974) hebben Bourne et al. (2014) voor Groningen afgeleid:

BIJLAGE 2

$$M_{0,T}(t) \cong \frac{4\mu}{3}\alpha|\Delta V(t)|$$

Waarbij $M_{0,T}(t)$ het seismisch moment is dat maximaal vrij kan komen, μ de schuifmodulus en $\Delta V(t)$ de volume verandering in het reservoir ten gevolge van de compactie door gasonttrekkking. De fractie van de door compactie opgebouwde energie die seismisch vrij kan komen wordt gegeven door de zogenaamde partitie-coëfficiënt α. De relatie tussen het seismisch moment (M_0) en de magnitude (M) van een beving wordt gegeven door (Hanks and Kanamori, 1979):

$$log_{10}\, M_0 = 9.1 + 1.5M$$

Door de logaritmische relatie tussen seismisch moment en magnitude gaat de sterkste beving gepaard met de helft van het totale seismische moment. De sterkte van deze beving wordt dan gegeven door:

$$M = \frac{2}{3}(log_{10}\left(\frac{2\mu}{3}\alpha|\Delta V(t)|\right) - 9.1)$$

De partitie coëfficiënt α is empirisch bepaald. Voor de bepaling van de sterkste realistisch te verwachten beving wordt een partitie coëfficiënt van 0,01 aangenomen, oftewel 1% van de energie die wordt opgebouwd kan vrijkomen in de sterkste beving. Dit komt overeen met de grootste waarde die geobserveerd is voor enkele velden in Noord-Nederland[5]. Ter vergelijking: voor het Groningen gasveld wordt tot nu toe een waarde voor de partitie coëfficiënt van 0,0005 geobserveerd (Bourne er al, 2014). De gevoeligheid voor de partitie coëfficiënt in de analyse is aanzienlijk: een factor 10 hogere of lagere partitie coëfficiënt geeft een verhoging cq. verlaging van de sterkste magnitude met 0,7 magnitude punt.

Referenties:

Abercrombie, R.E. (1995), *Earthquake source scaling relationships from -1 to 5 Ml using seismograms recorded at 2.5 km depth*, J. Geophys. Res. 100.

Bourne, S.J., S.J. Oates, J. van Elk, and D. Doornhof (2014), *A seismological model for earthquakes induced by fluid extraction from a subsurface reservoir*, J. Geophys. Res. 119(2), 8991-9015, doi:10.1002/2014JB011663.

Hanks, T., and H. Kanamori (1979), *Moment magnitude scale*, J. Geophys. Res. 84, 2348-2350.

Kanamori, H. (2001), *Energy budget of earthquakes and seismic efficiency*, in Earthquake Thermodynamics and Phase Transformations in the Earth's Interior, edited by R. Teisseyre, pp.293-305, Academic, Wlatham, Mass.

Kostrov, V.V. (1974), *Seismic moment and energie of earthquakes and seismic flow of rocks*, Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth, Eng. Transl., 1, 23-44.

Mulders, F.M.M. (2003), Modelling of stress development and fault slip in and around a producing gas reservoir, Phd. Thesis Technical University Delft, IOS Press.

Muntendam-Bos, A.G. et al. (2008), *Bergermeer Seismicity Study*, TNO Report 2008-UR1071/B, 6 November 2008.

Roest, J.P.A., and W. Kuilman (1994), *Geomechanical analysis of small earthquakes at Eleveld gas reservoir*, Eurock '94, 573 – 580.

[5] De 1% wordt voor 1 veld in de analyse gerealiseerd indien de energie uit alle opgetreden bevingen samen genomen wordt.

Bijlage 3

RISICO MATRIX ANALYSE

In de risico matrix analyse worden de belangrijkste invloedfactoren ondergrond en bovengrond beschouwd en geclassificeerd. Op basis van de classificatie wordt een puntenwaarde toegekend. De toegekende puntenwaarden voor de invloedfactoren worden vervolgens gesommeerd en genormaliseerd om de puntenwaarde voor de ondergrond en bovengrond te bepalen.

In de risicomatrix wordt de combinatie van de puntenwaarden voor boven- en ondergrond met een stip aangegeven. Uit de locatie van het punt in de matrix volgt de risicoclassificatie.

Hieronder worden de verschillende invloedfactoren besproken.

Invloedfactoren ondergrond

De invloedfactoren en de classificatie voor deze factoren worden gegeven in Tabel 1. De manier waarop de classificatie bepaald moet worden, is hieronder beschreven.

1. Kans op het induceren van bevingen:
   De kans dat bevingen geïnduceerd worden wordt bepaald op basis van de DHAIS analyse. Deze analyse is in niveau 1 al uitgevoerd. Het resultaat kan direct worden gebruikt in de classificatie.
2. De sterkste beving waar realistisch rekening mee moet worden gehouden:
   De magnitude van de sterkste beving waar realistisch rekening mee moet worden gehouden wordt berekend in niveau 1 volgens de methodieken beschreven in Bijlage 2. Het resultaat kan direct worden gebruikt in de classificatie.
3. Ligging voorkomen:
   In het noorden van Nederland (inclusief Noord-Holland) ligt een dikke laag Zechstein zout wat vaak de afsluitende laag is van de aanwezige gas voorkomens. Zout op een diepte van ~3km gedraagt zich vloeibaar en zal stromen om de spanningen in het zout te relaxeren. Hierdoor wordt extra spanning opgebouwd net boven en onder een dikke laag zout. Sinds de start van de gaswinning is het nooit voorgekomen dat er geïnduceerde bevingen optraden in velden ten zuiden van de lijn Amsterdam-Arnhem, waar de Zechstein zoutafzettingen ontbreken.
4. Lokale opslingering:
   In [1] zijn de ondiepe grondsoorten en de daaraan verbonden opslingering in kaart gebracht. Het te analyseren gasveld dient op de kaart te worden geprojecteerd en het percentage van het veld boven de verschillende grondsoorten te worden geanalyseerd. Op basis van de bepaalde percentages kan de factor opslingering worden geclassificeerd.

Om de bedreiging te bepalen worden de puntenwaarden behorende bij de classificatie van de vier factoren gesommeerd en genormaliseerd met het maximaal te behalen aantal punten (=14).

Invloedfactoren bovengrond

De gevolgfactoren en de classificatie voor deze factoren worden gegeven in Tabel 2. De manier waarop de classificatie bepaald moet worden, is hieronder beschreven. Algemene opmerking hierbij is dat een 5 km bufferzone genomen wordt vanaf de rand van het veld. De reden hiervoor is dat bevingen op de randbreuken van een veld binnen deze afstand nog significante grondbewegingen kunnen veroorzaken.

1. Bevolkingsdichtheid & bebouwing:
   De bevolkingsdichtheid, oftewel het aantal inwoners per km^2, kan worden bepaald door het oppervlakte

van het veld binnen de verschillende gemeenten waaronder het veld gelegen is in kaart te brengen. Op de bevolkingsdichtheidkaart (CBS Statline)) kan per gemeente de gemiddelde bevolkingsdichtheid worden afgelezen. Op basis van het oppervlakte binnen de verschillende gemeenten kan vervolgens een gewogen gemiddelde voor de bevolkingsdichtheid boven het gasveld worden bepaald, welke geclassificeerd kan worden. Voor hele keine velden kan eventueel ook de ´bevolkingsdichtheid per buurt' worden gebruikt (CBS Statline). Daarnaast wordt in deze categorie ook rekening gehouden met de aanwezige bebouwing. Het type bebouwing speelt een belangrijke rol, maar is moeilijk te specificeren. Het is wel vast te stellen of er wijken met flats/appartementencomplexen aanwezig zijn. Dit is in deze categorie verwerkt.

2. Industriële inrichtingen:
   Op http://www.risicokaart.nl kan de aanwezigheid van industriële inrichtingen boven en rond het veld worden geïnventariseerd en kan deze factor worden geclassificeerd.
3. Speciale gebouwen en vitale infrastructuur:
   Op http://www.risicokaart.nl kan de aanwezigheid van scholen, ziekenhuizen, tehuizen en publieke gebouwen waar veel mensen samenkomen in kaart worden gebracht en kan deze factor worden geclassificeerd.
4. Dijken:
   De aanwezigheid van primaire en/of secundaire dijken kan op http://www.risicokaart.nl in kaart worden gebracht.

Om de gevolgen te bepalen worden de puntenwaarden behorende bij de classificatie van de vijf factoren gesommeerd en genormaliseerd met het maximaal te behalen aantal punten (=16).

BIJLAGE 3

Tabel 1. Classificering van de invloedfactoren ondergrond.

	DHAIS	M	Ligging voorkomen	Opslingering
5		Alle methodes >4,5		
4	Bevend veld > 5 bevingen per jaar van M≥ 1,5	1 methode > 4,5 én/of Alle methodes 4,1 – 4,5		
3	Bevend veld < 5 bevingen per jaar van M≥ 1,5	1 methode 4,1 – 4,5 én/of Alle methodes 3,6 – 4,0		>60% slappe grond ($V_{s,30}$ =< 200m/s) en/of >30% grondsoort die extra gevoelig zijn voor amplificatie, zoals veenlagen dikker dan 3m en slappe veenlagen met een dikte van 1m-3m gelegen op een stijve ondergrond.
2	P=42% Of Bevend veld M < 1,5	1 methode 3,6 – 4,0 én/of Alle methodes 3,1 – 3,5	Boven de lijn Amsterdam-Arnhem	30-60% slappe grond ($V_{s,30}$ =< 200m/s) en/of 15-30% grondsoort die extra gevoelig zijn voor amplificatie, zoals veenlagen dikker dan 3m en slappe veenlagen met een dikte van 1m-3m gelegen op een stijve ondergrond.
1	P=19%	1 methode 3,1 – 3,5 én/of Alle methodes 2,6 – 3,0		10-30% slappe grond ($V_{s,30}$ =< 200m/s) en/of 5-15% grondsoort die extra gevoelig zijn voor amplificatie, zoals veenlagen dikker dan 3m en slappe veenlagen met een dikte van 1m-3m gelegen op een stijve ondergrond.
0		1 methode 2,6 – 3,0 én/of Alle methodes ≤ 2,5	Onder de lijn Amsterdam-Arnhem	<10 % slappe grond ($V_{s,30}$ =< 200m/s) en/of < 5% grondsoort die extra gevoelig zijn voor amplificatie, zoals veenlagen dikker dan 3m en slappe veenlagen met een dikte van 1m-3m gelegen op een stijve ondergrond.

BIJLAGE 3

Tabel 2. Classificering van de invloedfactoren bovengrond

	Bevolkings-dichtheid (aantal inwoners per km^2)	**Industriële inrichtingen**	**Speciale gebouwen En vitale infrastructuur**	**Dijken**
4	> 2500	Meerdere direct boven het veld	Meerder ziekenhuizen en/of energievoorzieningen direct boven het veld	Primaire dijken boven het veld
3	1000-2500 en/of 500-1000 met wijken bestaande uit flats/appartementencomplexen binnen 5 km rond het veld	1 boven het veld en/of meerdere binnen 5 km rond het veld.	1 ziekenhuis en/of energievoorziening direct boven het veld of meerdere binnen 5 km rond het veld. Meerdere scholen, tehuizen en/of publieksgebouwen direct boven het veld	Primaire dijken binnen 5 km rond het veld en/of secundaire dijken boven het veld
2	500-1000 en/of 250-500 met wijken bestaande uit flats/appartementencomplexen binnen 5 km rond het veld	1 binnen 5 km rond het veld.	1 school, tehuis en/of publieksgebouw boven het veld of meerdere binnen 5 km rond het veld.	Secundaire dijken binnen 5 km rond het veld
1	250-500 en/of <250 met wijken bestaande uit flats/appartementencomplexen binnen 5 km rond het veld		1 school, tehuis en/of publieksgebouw binnen 5 km rond het veld.	
0	< 250	Geen binnen 5 km rond het veld	Geen boven en/of binnen 5 km rond het veld	Geen dijken binnen 5 km rond het veld

Inschatting van het risico op schade aan de Waddendijk door mogelijke seismische activiteit van het Ternaard gasveld

NAM, april 2019.

Als onderdeel van de Milieu Effect Rapportage voor het Ternaard gasveld is het risico op schade, door mogelijke seismische activiteit aan de waddendijk nabij Ternaard, bepaald. Deze dijkenstudie is in maart 2019 afgerond met als resultaat het onderliggende engels-talige rapport;

"*Estimate of seismic activity of the Ternaard gasfield and deformation risk assessment for the adjacent primary levee, The Netherlands*"

Om de mogelijke effecten van aardbevingen op de waddendijk in Friesland beter te begrijpen heeft de NAM de firma GR8Geo een analyse laten doen naar de mogelijke effecten van bevingen op de waddendijk nabij Ternaard. De methodes van onderzoek in een eerder gedane studie naar de dijk Eemshave-Delfzijl zijn ook gebruikt voor de Friese studie. Deze studie methodes, zijn goed bevonden door een panel van internationale experts en is geaccepteerd door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (zie notitie van Deltares[1] en ook de brief van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu[2]).

In het eerste gedeelte van het GR8Geo rapport over de Friese waddendijk is, als basis en uit conservatisme, een aardbeving gebruikt met een magnitude die groter is dan de maximale magnitude zoals gedocumenteerd in het winningsplan. Meerdere Ground Motion Prediction Equiations (GMPE) zijn gebruikt om de relatie tussen de beving en versnellingen van de grond, in het dijklichaam te berekenen en waarbij de uitkomsten vergeleken zijn met de uitkomsten voor de Eemshaven-Delfzijldijk. Belangrijk in deze berekening zijn de gedetailleerde geotechnische data van het dijklichaam bij Ternaard, die verstrekt zijn door het Wetterskip Fryslân. De analyse wijst uit dat de effecten van een beving met een magnitude van M=3,9 en zelfs van een beving met de hoogste potentiele magnitude ooit bepaald voor een klein gasveld in Nederland, zeer klein zijn.

In het laatste deel is onderzocht wat de impact zou kunnen zijn van de beweging op het vloeigedrag van de grond en stabiliteit in en van de dijk. Hiervoor is een grote hoeveelheid data van sonderingen in combinatie met gedetailleerde geomterische beschrijvingen van de dijk gebruikt in een gedetailleerd model voor de dijk. Een belangrijke parameter hierbij is de Liquifaction Potential Index (LPI) voor de verschillende grondsoorten. Deze LPI-waarden blijken zeer laag te zijn (LPI ligt tussen 0 en 0,73). Liquifactie kan alleen ontstaan bij een veel hogere waarde (LPI=5). De verdere analyse naar de mogelijke deformatie van zachte kleiformaties bracht ook geen reden voor vervolg studies.

Samenvattend kan er gesteld worden dat het onwaarschijnlijk is dat een beving, zelfs met zeer conservatieve waarden voor de maximale magnitude van de beving, zal leiden tot schade aan de Waddendijk boven het Ternaard gasveld.

[1] Deltares, Memo : Eemshaven Delfzijl – Uitgangspunten voor een aardbevingsbestendig ontwerp, Juni 2017

[2] Ministerie van Infrastructuur en Milieu , Brief aan Waterschap Noorderzijlvest, juli 2017.

ESTIMATE OF SEISMIC ACTIVITY OF THE TERNAARD GAS FIELD AND DEFORMATION RISK ASSESSMENT FOR THE ADJACENT PRIMARY LEVEE, THE NETHERLANDS

Prepared for:
Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

February 2019
Project No. P2019.0002

GR8 GEO Private Company | Dimitrakopoulou 79 | 11741 Athens, Greece | +30 210 922 2186 | www.gr8-geo.com

DOCUMENT CONTROL SHEET

PROJECT	:	Estimate of Seismic Activity of the Ternaard Gas Field and Deformation Risk Assessment for the Adjacent Primary Levee, the Netherlands
PREPARED BY	:	GR8 GEO Dimitrakopoulou 79, 11741 Athens, Greece
PREPARED FOR	:	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
PROJECT NO	:	P2019.0002
DATE	:	06/03/2019
Issue	:	01

Issue No	Date	Prepared By	Checked By	Approved By
01	06/03/2019	PG	AG	JC

GR GEO

Dimitrakopoulou 79
11741 Athens, Greece
T: +30 210 922 2186

March 06, 2019
Project No. 2019.0002

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
Postbus 28000
9400 HH ASSEN
The Netherlands

Attention: Mr. Ruud van Boom

Subject: Estimate of Seismic Activity of the Ternaard Gas Field and Deformation Risk Assessment for the Adjacent Primary Levee

Dear Mr. van Boom:

The Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., referred to here as NAM, has retained the services of GR8 GEO to develop estimates of seismic activity due to the gas production in Ternaard gas field and assess the risks for major infrastructure such as the primary levee.

As part of the above study, GR8 GEO conducted Deterministic Seismic Hazard Analyses and evaluated the levee deformation potential also considering the findings of recent studies on the dynamic performance assessment of the Eemshaven-Delfzijl levee in the nearby Groningen field.

It has been a pleasure working with you on this project. We look forward to the opportunity to provide continued support to your team as the project progresses.

Sincerely,

GR8 GEO

Jacob Chacko
Principal Engineer

CONTENTS

Page

1.0 INTRODUCTION 1
1.1 Background 1
1.2 Key Personnel 1
1.3 Report Organization 2
2.0 DETERMINISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSES 3
2.1 Maximum Magnitude Estimates 3
2.2 Site Geology 3
2.3 Selection of Empirical Attenuation Relationships 7
2.4 Deterministic Seismic Hazard Approach 8
2.4.1 Overview 8
2.4.2 Estimating "Reasonably Conservative" Number of Standard Deviations (Sigmas) for Use in DSHA 11
2.4.3 Comparative GMPE Scaling 11
2.5 Results 14
3.0 EVALUATION OF PRIMARY LEVEE DEFORMATION POTENTIAL 16
3.1 Available Data 16
3.2 geotechnical site conditions 16
3.3 Primary Levee Geometry 17
3.4 Evaluation of liquefaction triggering potential of Coarse-Grained Deposits 17
3.4.1 Basis of Evaluation 18
3.4.2 Cyclic Demand 18
3.4.3 Cyclic Resistance 18
3.4.4 Evaluation of Liquefaction Potential Index 18
3.4.5 Results 19
3.5 Evaluation of cyclic softening potential of fine-Grained Deposits 22
4.0 SUMMARY AND CONCLUSIONS 24
5.0 REFERENCES 26

TABLES

Page

Table 1. Key Project Personnel 1
Table 2. Maximum Magnitude Estimates 3
Table 3. Characteristics of the GMPEs considered in this study 8
Table 4. Empirical Correlations for Shear Wave Velocity 9

FIGURES

Page

Figure 1. Friesland Gas Field 1
Figure 2. Deep Cross Section extending from Ternaard to west of Eemshaven along the primary levees, DGMdeep v4.0 model, Dinoloket 4
Figure 3. Deep Cross Section near Ternaard primary levee, DGMdeep v4.0 model, Dinoloket..... 4
Figure 4. Cross Sections from DGM v2.2 model: along the primary levees from Ternaard to west of Eemshaven (upper illustration), along the primary levees near Ternaard (middle illustration), along the primary levees between Eemshaven and Delfzijl (lower illustration)..... 6
Figure 5. Overview of segments in the Flood Protection Act (in Dutch: Waterwet). 8
Figure 6. Shear Wave Velocity from Interpreted CPT data within Pleistocene deposists underlying the primary levee north of Ternaard. 10
Figure 7. Comparison of deterministic spectra for a M=5 at R=10 km scenario using v5 GMM with probabilistic spectra using v2 GMM corresponding to a return period of 1100-years at the base of the numerical model used for the dynamic stability evaluations at Eemshaven levee. 11
Figure 8. Trellis plot for acceleration response spectra of the selected GMPEs (median estimates and V_{S30}=1400m/s). 12
Figure 9. Trellis plot for acceleration response spectra of the selected GMPEs (median plus one sigma estimates and V_{S30}=1400m/s). 13
Figure 10. Trellis plot for acceleration response spectra of the selected GMPEs (median plus two sigma estimates and V_{S30}=1400m/s). 13
Figure 11. Comparison of deterministic spectra for a M=3.9 at R=3 km scenario using the weighted average of selected GMPEs for different values of standard deviations with probabilistic spectra using v2 GMM corresponding to a return period of 1100-years at the base of the numerical model used for the dynamic stability evaluations at Eemshaven levee. 14
Figure 12. Comparison of deterministic spectra for a M=4.1 at R=3 km scenario using the weighted average of selected GMPEs with probabilistic spectra using v2 GMM corresponding to a return period of 1100-years at the base of the numerical model used for the dynamic stability evaluations at Eemshaven levee. 15
Figure 13. Available explorations along the primary levee north of Ternaard. 16
Figure 14. Comparison of primary levee geometries near Ternaard and near Eemshaaven with the same allowable probability of flooding of 1/1000 years. 17
Figure 15. Example of levee crest settlement versus LPI estimated from dynamic numerical evaluations for the Eemshaven primary levee (Kolk et al 2017). 19
Figure 16. Estimated LPI values along Friesland levee. 20
Figure 17. Example CPT liquefaction triggering log for a CPT with LPI=0. 21
Figure 18. Example CPT liquefaction triggering log for a CPT with LPI=0.73. 21
Figure 19. Robertson (1990) Classification Chart. 22
Figure 20. Estimated Su values for all the CPTs along the. Red dots correspond to S_u less than 40 kPa, and black circles correspond to S_u less than 20 kPa. 23
Figure 21. Estimated CSPI values along Friesland (left) and Eemshaven-Delfzijl (right) levee. 23

APPENDICES

APPENDIX A LONGITUDINAL GEOTECHNICAL CROSS SECTIONS

APPENDIX B CPT LIQUEFACTION TRIGGERING LOGS

1.0 INTRODUCTION

1.1 BACKGROUND

As part of the Environmental Impact Assessment Study for the Ternaard gas field development NAM is estimating the risks for major infrastructure such as the primary levee due to potential gas-extraction induced seismic activity. The area of interest is shown on Figure 1. The main focus areas, the Blija-Ferwerderadeel and Ternaard gas fields, are marked with the blue circles.

GR8 GEO was requested to derive an estimate of seismic demand resulting from the Friesland gas field (i.e. in the form of spectral accelerations) and compare it with the seismic demand from the nearby (and much bigger) Groningen field. The relative seismic demands and the performance estimates from the previously studied Eemshaven-Delfzijl levee near Groningen are to be used as indicators of the Friesland primary levee deformation potential.

This report presents the findings of the deterministic seismic hazard analyses performed to develop estimates of the seismic demand resulting from the Friesland gas field and the levee deformation potential evaluations for the primary levee north of Ternaard.

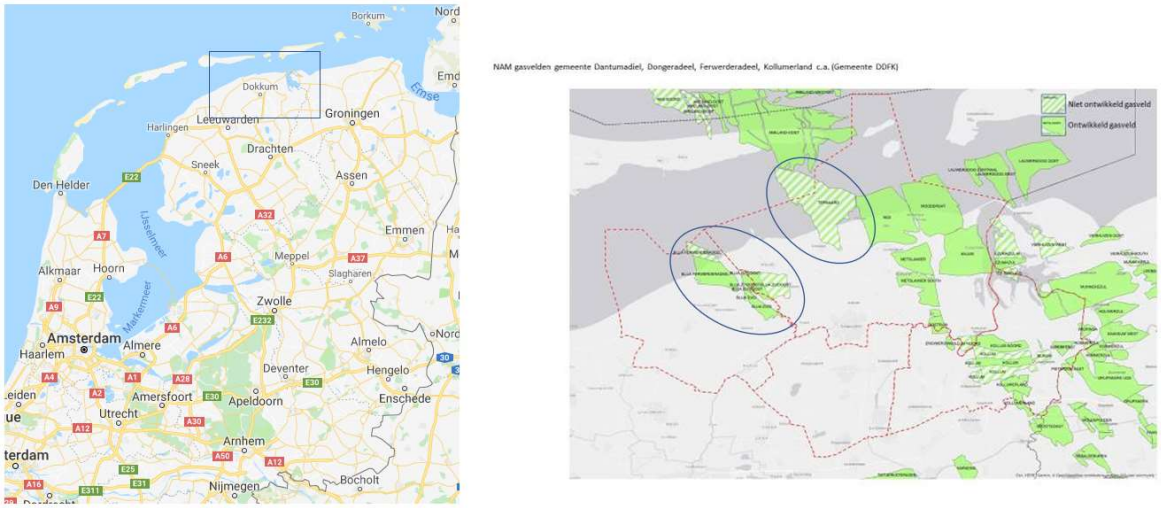


Figure 1. Ternaard Gas Field

1.2 KEY PERSONNEL

Key personnel associated with this study are identified in the following table.

Table 1. Key Project Personnel

CLIENT	NAME
Project Manager, NAM	Ruud van Boom
GR8 GEO	**NAME**
Technical Reviewer	Jacob Chacko
Project Manager	Amalia Giannakou
Deterministic Seismic Hazard Assessment	Amalia Giannakou, Vasileios Drosos
Evaluation of Levee Deformation Potential	Panagiotis Georgarakos

1.3 REPORT ORGANIZATION

The report is organized in four main sections. Following this introductory section:

- Section 2 presents the results of the deterministic seismic hazard analyses
- Section 3 presents the evaluations of the levee deformation potential
- Section 4 summarizes the main conclusions
- Section 5 lists the references

2.0 DETERMINISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSES

2.1 MAXIMUM MAGNITUDE ESTIMATES

Maximum magnitude, M_{max}, estimates were developed by NAM following the guidelines outlined by the State Supervision of Mines (2016). According to these guidelines two methods are used to develop estimates of maximum magnitude based on fault geometry and energy balance.

- The method based on fault geometry assumes that the amount of energy released during an earthquake and thus the earthquake magnitude is a function of the fault area that ruptures. The maximum earthquake magnitude is therefore limited by the size of the rupture. The Kanamori (2001) and Stein and Wysession (2006) relationships were used to estimate the maximum seismic moment that is released during an earthquake, the shear modulus, the rupture area, the average slip (displacement) of the fault, the stress drop, the height and the length of the rupture.
- The method based on energy balance assumes that for induced earthquakes, only part of the energy generated by gas extraction activity can be released during an earthquake. Bourne et al. (2014) based on Kostrov (1974) have developed an empirical relationship between the maximum seismic moment that can be released, the shear modulus and the volume change in the reservoir as a result of the compaction due to gas extraction for Groningen.

The maximum magnitude is then estimated from the maximum seismic moment using the relationship by Hanks and Kanamori (1979).

Since these methods are associated with significant assumptions and uncertainties, both were used in the estimation of maximum magnitude. The results are summarized in Table 2.

Table 2. Maximum Magnitude Estimates

Field	Maximum Fault Length (km)	Poisson's Ratio	Fault Throw (m)	M_{max} Energy Balance Method	M_{max} Fault Geometry Method
Blija-Ferwerderadeel	2.7	0.25	98	3.2	3.4
Blija-Zuid	4.3	0.25	87	2.7	3.5
Blija-Zuidoost	2.5	0.25	115	3.3	3.5
Ternaard	6.5	0.2	112	3.4	3.7

Based on the above deterministic seismic hazard analyses were performed for an earthquake scenario with an M_{max} of 3.9.

2.2 SITE GEOLOGY

Cross sections that show the primary geologic units in Friesland were generated from Dinoloket using the DGMdeep v4.0 model (that extends to more than 6 km depth) and the DGM v2.2 (that focuses on the upper 300 to 600 meters) to obtain an overview of the site conditions at the Friesland gas field and how they compare to the conditions at the Groningen gas field.

Figure 2 shows a deep cross section from DGMdeep v4.0 model that extends from the Friesland gas field (i.e. from the levee north of Ternaard) to the Groningen gas field (i.e. to the levee

west of Eemshaven). As shown on this figure the top of the gas reservoir (denoted with RO in the cross section on Figure 2) is located at about 3.7 km depth at Friesland with an upwards slope towards the northeast where it is encountered at about 3.0 km depth near Eemshaven.

In addition, as shown on Figure 2, it looks like the area near Ternaard is underlain by a salt diapir from the Zechstein Formation (denoted as ZE on Figures 2 and 3, pink colour), the top of which is about 800 meters deep near Ternaard. By contrast, the Zechstein formation is typically about 1.8-2 km deep in the Groningen Field. As a consequence the base of North Sea supergroup (denoted as NL_NM on Figures 2 and 3, orange colour), which represents the reference bedrock in the Groningen v5 GMM (Bommer et al 2018), is encountered at depths varying from 450 to 1200 m, compared to about 800 to 900 m depth which is where it is typically encountered in the Groningen Field.

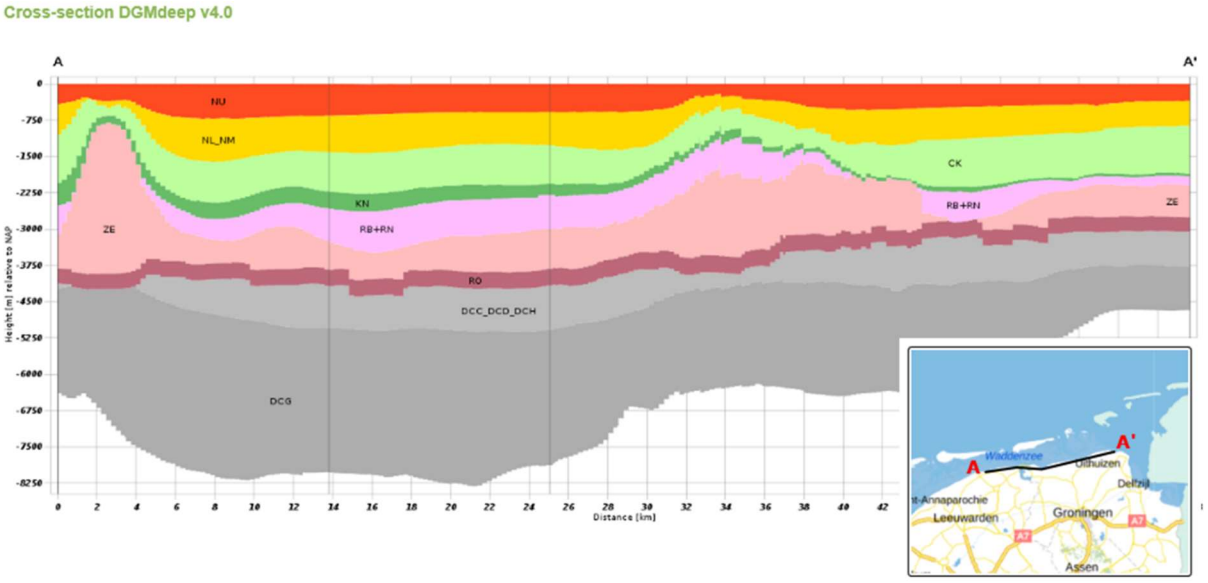


Figure 2. Deep Cross Section extending from Ternaard to west of Eemshaven along the primary levees, DGMdeep v4.0 model, Dinoloket

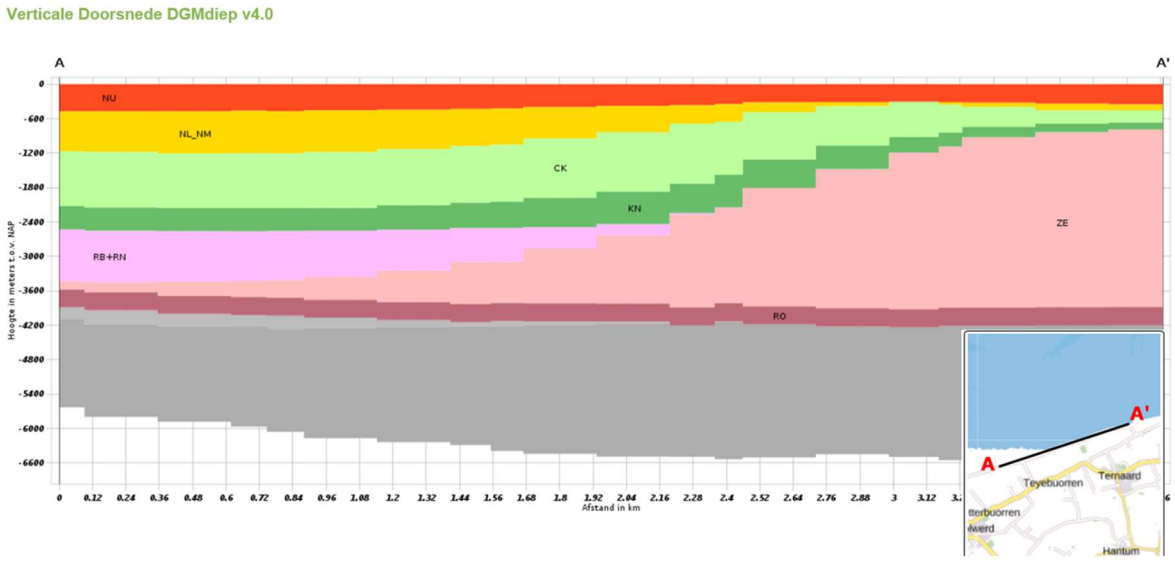


Figure 3. Deep Cross Section near Ternaard primary levee, DGMdeep v4.0 model, Dinoloket

Figure 4 includes a cross section from the DGM v2.2 model focusing on the upper 500 meters that extends from the Friesland gas field (i.e. from the levee north of Ternaard) to the Groningen gas field (i.e. to the levee west of Eemshaven), upper illustration, and cross sections from the same model along the primary levee near Ternaard and along the primary levee between Eemshaven and Delfzijl in the Groningen gas field.

The geologic units included in the DGM v2.2 model are part of the Upper North Sea Group from DGMdeep v4.0 model (NU is Figures 2a and 2b, red colour). As shown on this figure roughly the same sequence of geologic units is encountered in Friesland and in Groningen gas fields although the thicknesses of the individual formations vary between the two fields along the primary levees. The Upper North Sea Group includes the Miocence marine clays of the Brenda Formation (BR on Figure 4), overlain by Pliocene marine delta slope deposits of the Oosterhout Formation (OO on Figure 4). The uppermost deposits within the group of Pleistocene age include the Peize Formation (PZWA on Figure 4), Appelscha Formation (AP on Figure 4) and Urk Formation (UR on Figure 3) fluvial deposits, overlain by Peelo Formation (PE on Figure 4) glacial deposits and Eem Formation (EE on Figure 4) marine deposits (Kruiver et al 2017). The Pleistocene deposits are overlain by a sequence of Holocene soft clays and loose to medium dense sands (HL on Figure 4).

As shown on Figure 4, the Holocene deposits appears to be thinner in Friesland than under the primary levees near the Groningen field, and the top of Pleistocene is also encountered at shallower depths in Friesland than in the Groningen field. Geotechnical cross sections along the levee near Ternaard were provided by the Waterboard and are included in Appendix A. As shown on these sections the levees are underlain by a Holocene sequence of soft clays, peats and medium dense sands that extend down to El. -5 m to -10 m NAP where the top of Pleistocene deposits consisting of stiff clays and denser sands is encountered.

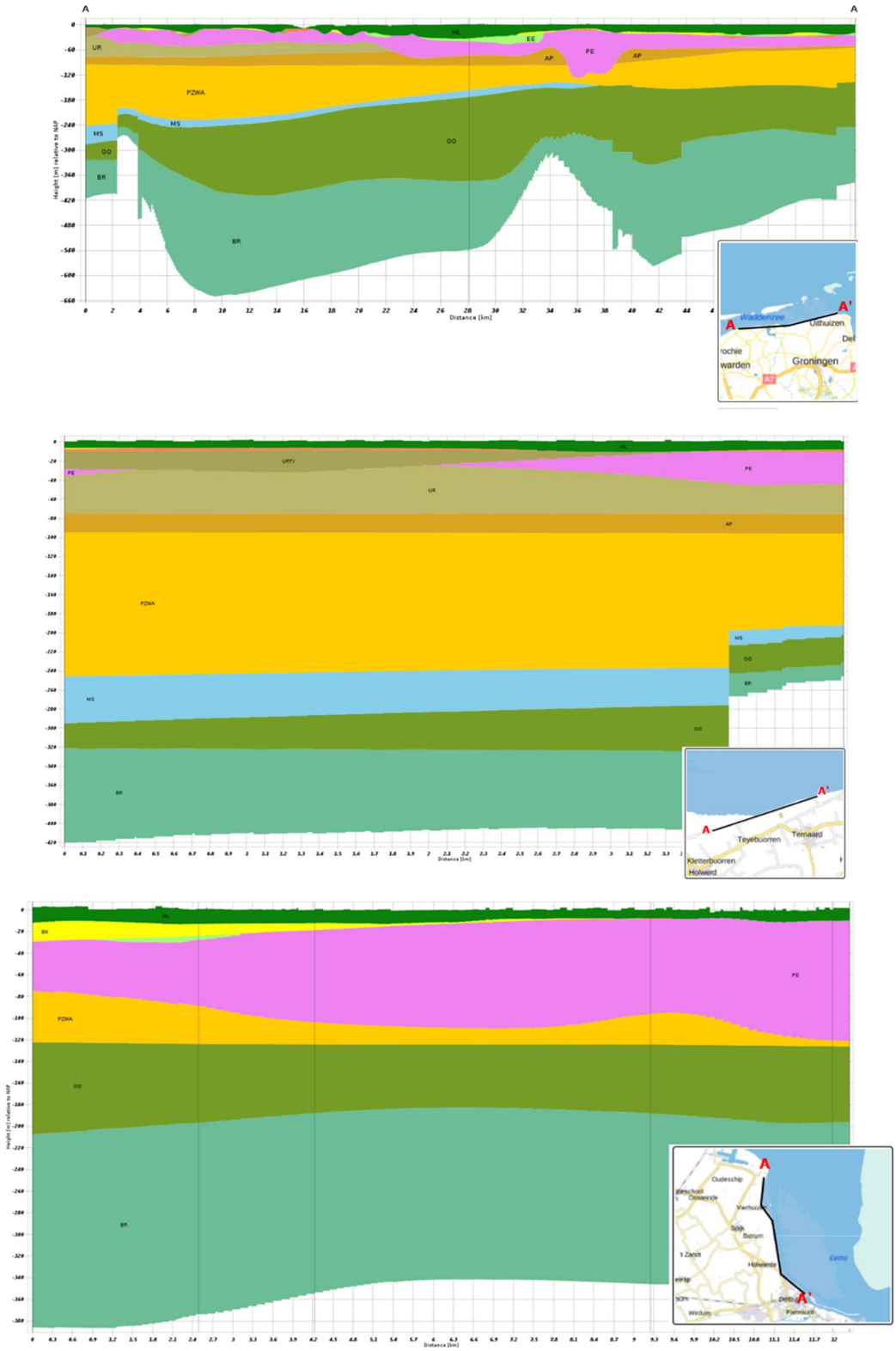


Figure 4. Cross Sections from DGM v2.2 model: along the primary levees from Ternaard to west of Eemshaven (upper illustration), along the primary levees near Ternaard (middle illustration), along the primary levees between Eemshaven and Delfzijl (lower illustration)

2.3 SELECTION OF EMPIRICAL ATTENUATION RELATIONSHIPS

The attenuation of seismic waves from a seismic source to the site is modeled using ground motion prediction equations (GMPEs). These empirical relationships should model the type of seismic source rupture mechanism as well as the regional geology and seismotectonic setting to properly estimate site-specific earthquake ground motion amplitudes.

Most of the GMPEs typically used in seismic hazard assessments generally focus on relatively large events (M>5.0) although the current state-of-the-art tends to consider small events (M>3) when developing GMPEs in order to better calibrate the magnitude scaling (i.e. Next Generation Attenuation West 2 project, Bozorgnia et al., 2014).

Induced earthquakes are likely to be of smaller magnitude and shallower focal depth than the tectonic earthquakes for which most GMPEs are derived, which also results in the wave propagation paths being more strongly influenced by the heterogeneous properties of the uppermost portion of the crust. This results in more accentuated regional differences in ground motion characteristics compared to tectonic earthquakes which is particularly the case for the Groningen gas field (and potentially even more for the Friesland gas field) given the presence of a high velocity salt layer above the reservoir which exerts a pronounced effect on seismic wave propagation (Kraaijpoel and Dost 2013).

A ground motion model for gas-extraction-induced seismicity in the Groningen field has been developed by Bommer et al (2016, 2018). The model was calibrated to local recordings of small-magnitude events (up to M 3.6) and captures the epistemic uncertainty in the extrapolation to larger magnitude considered in the assessment of the resulting hazard and risk for the Groningen field. In order to reflect the conditions in the field, the model first predicts accelerations at the bottom of the North Sea supergroup (NS_B) approximately 800 m below the surface and then convolves these motions with frequency-dependent nonlinear amplification factors assigned to zones across the Groningen field.

Farhadi et al (2018) presented a relatively short list of ground-motion models (GMMs) not established from datasets strictly made of induced events most suitable for induced-seismicity application in Central and Eastern North America (CENA). The models were tested against a dataset of induced earthquakes composed of 2414 time histories from 384 CENA induced events with hypocentral distances below 50 km and moment magnitudes from 3.5 to 5.8. Candidate GMMs were selected from two categories, including purely empirical models developed from the Next Generation Attenuation-West2 (NGAWest2) database and indigenous models of CENA. Some models performed better in certain frequencies than others, and no single model was the best over the entire frequency range. Overall, three models including Abrahamson et al. (2014), Chiou and Youngs (2014), and Atkinson (2015) GMMs outperformed other models.

Douglas et al. (2013) developed GMPEs based on empirical data from ground-motion datasets of induced and natural seismicity from geothermal activities (in Basel, Geysers, Hengill, Roswinkel, Soultz, and Voerendaal), and stochastic simulations.

Table 3 summarizes the main characteristics of the GMPEs considered in this study.

For the Douglas et al. (2013) GMPE the function based on stochastic simulations was selected for a scenario with a path attenuation factor Q=200, a site attenuation factor κ=0.02 sec, and a stress drop parameter of 100 bars, which are the closest parameters to those defined for the Groningen v5 GMM simulations in Bommer et al. (2018) (Q=220, κ=0.01 sec, and a stress parameter of 50 to 100

bars for magnitudes less than 3.4). For the aleatory variability, the between-event standard deviation (τ) was used and was estimated as the average value proposed for the Basel and Soultz geothermal fields. For periods longer than 0.5 s, extrapolation of sigma was done assuming same values as at 0.5s.

Table 3. Characteristics of the GMPEs considered in this study

GMPE	M range	R range (km)	Vs30	Period range
GMPE Groningen V5 GMM Bommer et al. (2018)	M_w 2.6-3.6 extrapolated to M_{max} of about 6.5 using stochastic simulations	0-20	Reference bedrock 1400 m/s Amplification Functions for Vs30 values between 160 to 280 m/s	PGV and SA from 0.01 to 5.0 s
Abrahamson et al. (2014)	M_w 3.0 - 8.5	0-300	200 - 1500 m/s	PGV and SA from 0.01 to 10.0 s
Chiou and Youngs (2014)	M_w 3.0 - 8.5	0-300	200 - 1500 m/s	PGV and SA from 0.01 to 10.0 s
Atkinson (2015)	M_w 3.0-6.0	0-40	760 m/s	PGV and SA from 0.01 to 5.0 s
Douglas et al. (2013)	M_w 1.0-4.0	0-20	1100 m/s	PGV and SA from 0.01 to 10.0 s

2.4 DETERMINISTIC SEISMIC HAZARD APPROACH

2.4.1 Overview

The goal of the deterministic seismic hazard assessment (DSHA) is to develop estimates of seismic demand that can be compared to the levels of seismic demand used in the dynamic levee stability evaluations for the Eemshaven primary levee (Fugro 2017) near Groningen (Segment 6-6, Figure 5), which has the same allowable probability of flooding as the primary levee north of Ternaard (i.e. 1/1000 years).

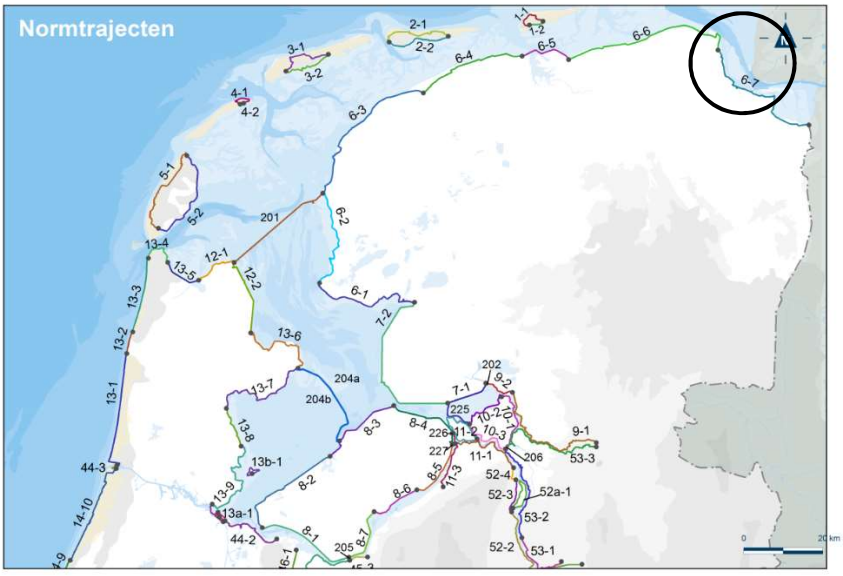


Figure 5. Overview of segments in the Flood Protection Act (in Dutch: Waterwet).

A code calibration study for the primary flood defenses at Eemshaven-Delfzijl was undertaken (Jongejan et al 2017) to derive design parameters for the dynamic stability evaluations of the Eemshaven-Delfzijl primary levee that resulted in a 1100-year design return period for Segment 6-6.

The seismic demand was estimated at a stiff soil horizon level located near the top of Pleistocene deposits and was compared to the acceleration response spectrum used as input at the base of the numerical models in the dynamic stability evaluations for Eemshaven levee. Estimates of shear wave velocity within the Pleistocene deposits along the primary levee near Ternaard were developed using the average of the empirical correlations with CPT data of Rix & Stokoe (1991), Mayne & Rix (1995), Andrus et al. (2007), and Robertson (2009) summarized in Table 4.

Table 4. Empirical Correlations for Shear Wave Velocity

Reference	Soil Type	Correlated Parameters	Correlations
Mayne and Rix (1995)	Clay	• Cone tip resistance, q_c	$V_s = 1.75(q_c)^{0.627}$ where V_s is in m/s and q_c is in kPa
Rix and Stokoe (1991)	Quartz Sands	• Cone tip resistance, q_c • Effective vertical stress, σ'_v	$G_{max} = 1634(q_c)^{0.25}(\sigma'_v)^{0.375}$ where G_{max}, q_c and σ'_v are in kPa; and $V_s = (G_{max}/\rho)^{0.5}$ in m/s
Andrus et al. (2007)	All	• Cone tip resistance corrected for pore pressure effects, q_t • Depth, z • Soil behavior type index, I_c • Age scaling factor (SF)	$V_s = 2.62(q_t)^{0.395}(I_c)^{0.912}(z)^{0.124}SF$ where V_s is in m/s, q_t in kPa, I_c is dimensionless, z is in m, and SF = 1.12 for Pleistocene soils and 0.90 for Holocene soils;
Robertson (2009)	All	• Cone tip resistance corrected for pore pressure effects, q_t • Total stress, σ_v • Soil behavior type index, I_c	$V_s = [10^{(0.55\,Ic + 1.68)}(q_t - \sigma_v)/P_a]^{0.5}$ where V_s is in m/s, q_t and σ_v in kPa, I_c is dimensionless, and P_a is the atmospheric pressure

The interpreted shear wave velocity from CPT data within the Pleistocene deposits is shown on Figure 6. Also shown on this figure is the idealized shear wave velocity profile within the Pleistocene deposits considered in this study. Based on this a Vs30 of about 260 m/s was used in the evaluations of seismic demand applicable near the top of Pleistocene deposits.

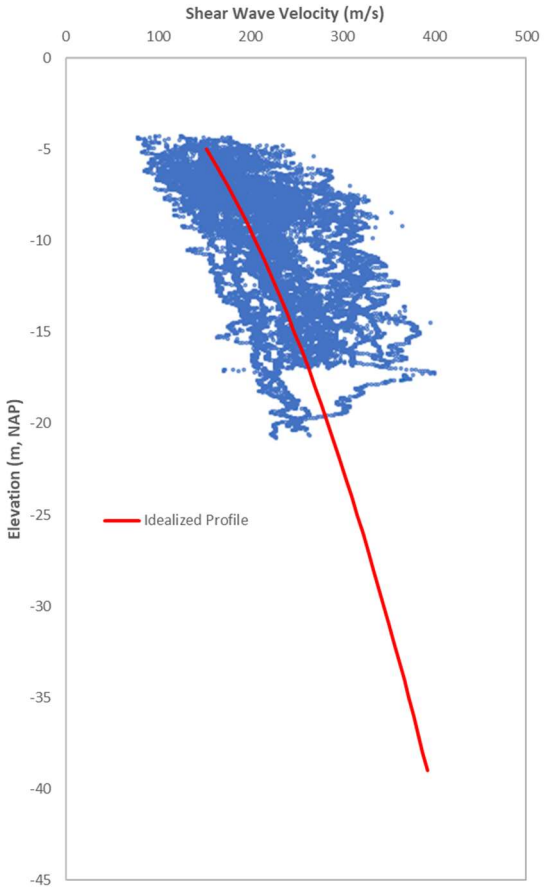


Figure 6. Shear Wave Velocity from Interpreted CPT data within Pleistocene deposists underlying the primary levee north of Ternaard.

The following approach was adopted for the deterministic seismic hazard evaluation for Friesland gas field:

- Estimates of reference bedrock horizontal acceleration response spectra were developed using the selected GMPEs for a deterministic scenario of Mw=3.9, R=3 km.
- Similar to the v5 GMM (Bommer et al. 2018) the bottom of the North Sea supergroup (NS_B) was selected as reference bedrock with an assumed Vs30 of 1400 m/s.
- For the Atkinson (2015) and Douglas (2013) GMPEs that only provide spectral accelerations for Vs30 values of 760 m/s and 1100 m/s, respectively, the linear site amplification function term by Boore et al. (2014) was used to adjust the GMPEs to a common reference V_{s30} of 1400 m/s.
- Due to the largely similar geologic units encountered above 800 meters depth between Groningen and Friesland the v5 GMM nonlinear site amplification function was used to estimate horizontal acceleration response spectra at the top of Pleistocene (Vs30 ~ 260 m/s, Zone 308 from v5 GMM)

2.4.2 Estimating "Reasonably Conservative" Number of Standard Deviations (Sigmas) for Use in DSHA

The input seismic demand in the Eemshaven primary levee stability assessment was derived from probabilistic seismic hazard analyses using the v2 GMM (Bommer 2016) and was associated with an 1100-year return period. In the deterministic approach adopted for the seismic demand at Friesland field, the selected GMPEs are weighted and used to estimate spectral accelerations resulting from a maximum magnitude event as a function of the number of standard deviations from the median prediction. In order to assess what is a reasonably "conservative" value or range of values to be compared with the Eemshaven-Delfzijl levee demands, a deterministic seismic hazard analyses was performed using the v5 GMM (Bommer 2018) and an earthquake scenario with magnitude M_w 5 at a distance of 10 km, which corresponds to the controlling scenario based on PSHA deagreggation results at the Eemshaven levee location with the v2 GMM. Median, median plus one sigma and median plus two sigma acceleration response spectra are estimated at the stiff soil horizon corresponding to the base of the numerical model used in the Eemshaven levee stability evaluations and compared with the probabilistic acceleration response spectra used in the Eemshaven-Delfzijl stability analyses (Fugro 2017). The comparison is presented on Figure 7. Also plotted on this figure with a grey dashed line is the fundamental period of the Eemshaven levee including SSI effects which was estimated to be about 0.7 second (Jongejan et al 2017). Since the v5 GMM is expected to result in lower spectral accelerations compared to the v2 GMM due to reduction in gas production rates and also differences between the two models, the median plus one and median plus two sigma spectra are expected to provide a reasonably "conservative" range of values to be compared with the Eemshaven-Delfzijl levee demands.

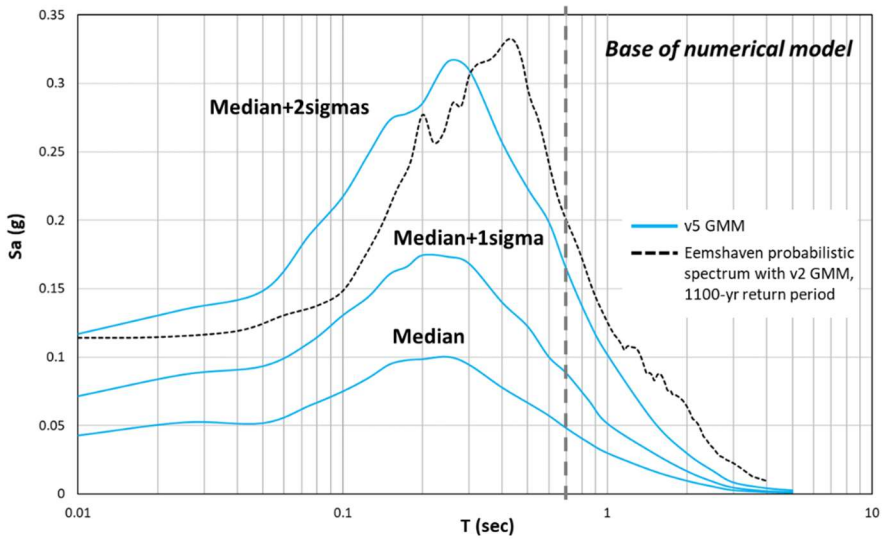


Figure 7. Comparison of deterministic spectra for a M=5 at R=10 km scenario using v5 GMM with probabilistic spectra using v2 GMM corresponding to a return period of 1100-years at the base of the numerical model used for the dynamic stability evaluations at Eemshaven levee.

2.4.3 Comparative GMPE Scaling

The spectral trends of the selected 5 GMPEs summarized in Table 3 are visually inspected from trellis plots for different earthquake scenarios. Trellis plots can help capture unexpected trends and identify the general behavior of ground-motion estimates in multi-dimensional space (magnitude,

source-to-site distance, structural period). In this respect, trellis plots provide an effective insight into the GMPEs while assessing their general trends for site-specific seismic hazard assessment.

The aim of the trellis plots is to help identify outliers with clearly nonphysical behavior but also to help guide the selection of models to capture epistemic uncertainty. The plots were prepared for rock site conditions (Vs30=1400 m/s) and for the median, median plus one sigma and median plus two sigma predictions and shown on Figures 8 (median prediction), 9 (median plus one sigma prediction) and 10 (median plus two sigma prediction). The selected magnitude and distance values are Mw 3.0, 3.9, 5.0 and R = 3km, 5km, 10km. The trellis diagrams are plotted for periods up to T = 5.0s.

A comparison of Figures 8 to 10 indicates that the predictions of Atkinson (2015) and Douglas (2013) GMPEs are considerably higher than the predictions of v5 GMM (2018), Abrahamson et al (2014) and Chiou and Youngs (2014) especially for magnitudes larger than 3 and larger sigmas. It is noted that while Douglas et al (2013) results in considerably higher predictions at structural periods less than 0.1 s for all magnitudes and standard deviations considered, the Atkinson (2015) GMPE predictions become significantly higher when the standard deviation term is included in the model. Perhaps due to the availability of more robust data sets, the standard deviation term in the Groningen-specific v5 GMM and the NGA-West 2 models are likely better constrained than in Atkinson (2015) and Douglas (2013).

One additional observation from Figures 8 to 10 is that the two NGA-West 2 GMPEs result in similar predictions compared with the rest of the models considered so the consideration of both GMPEs instead of only one of the two does not increase the overall uncertainty.

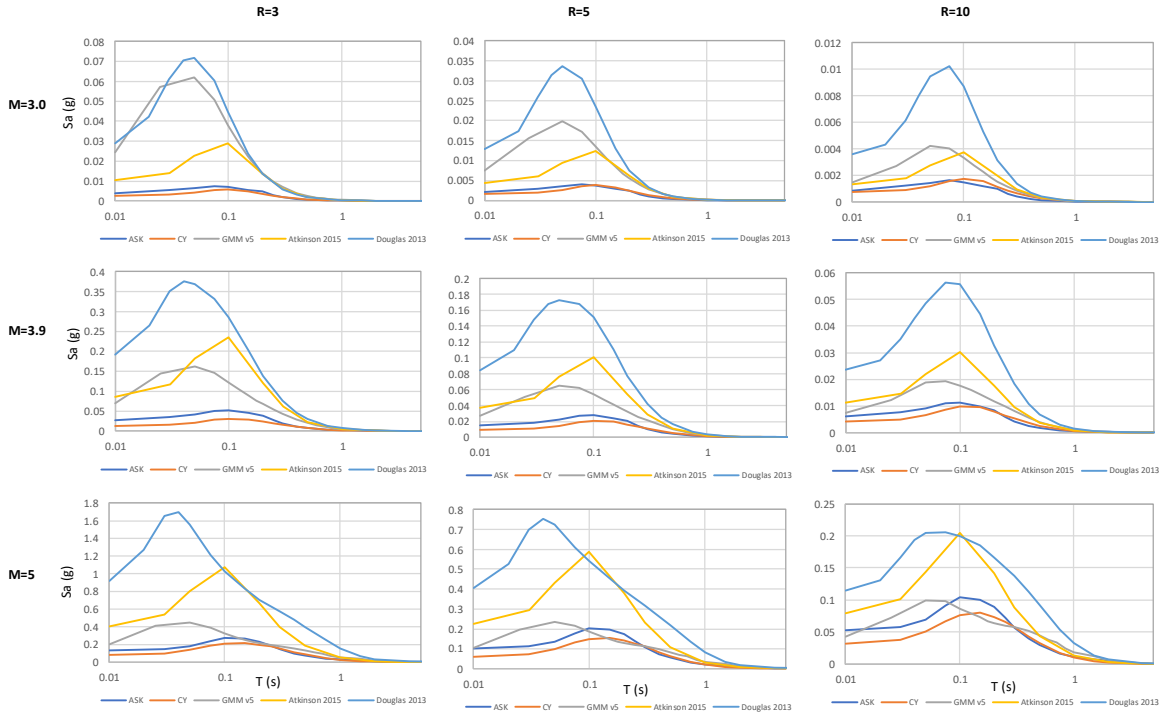


Figure 8. Trellis plot for acceleration response spectra of the selected GMPEs (median estimates and V_{S30}=1400m/s).

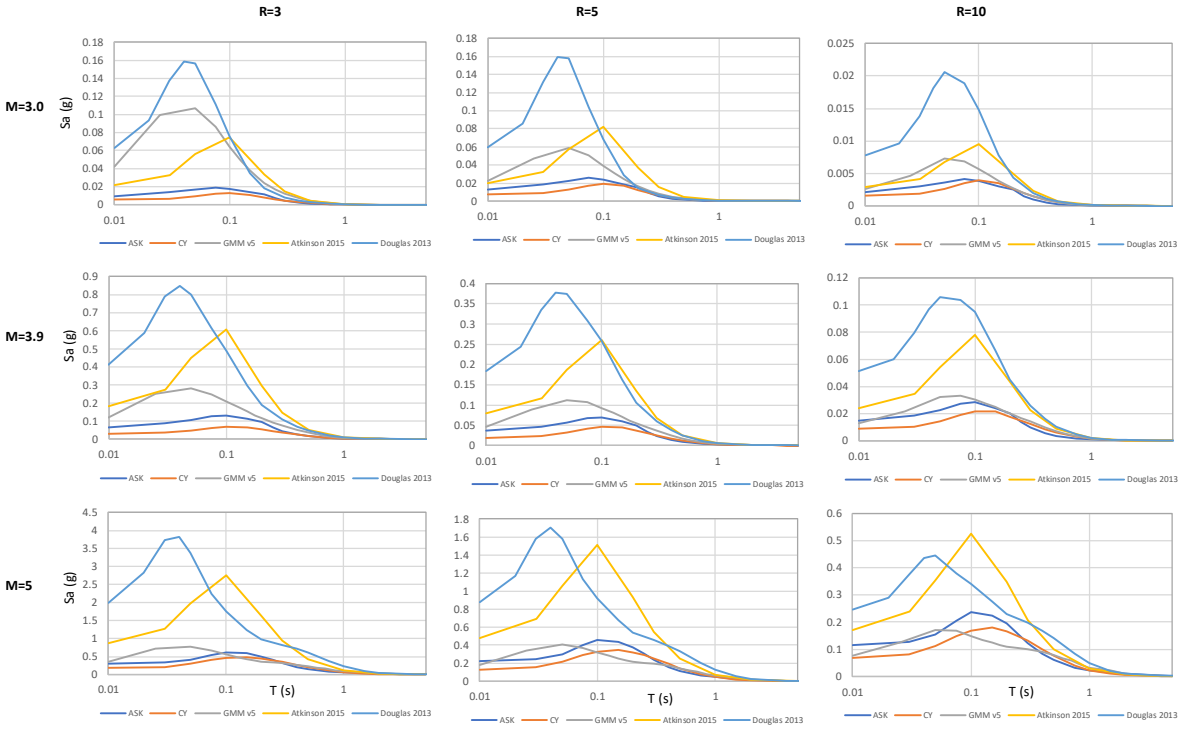


Figure 9. Trellis plot for acceleration response spectra of the selected GMPEs (median plus one sigma estimates and V_{S30}=1400m/s).

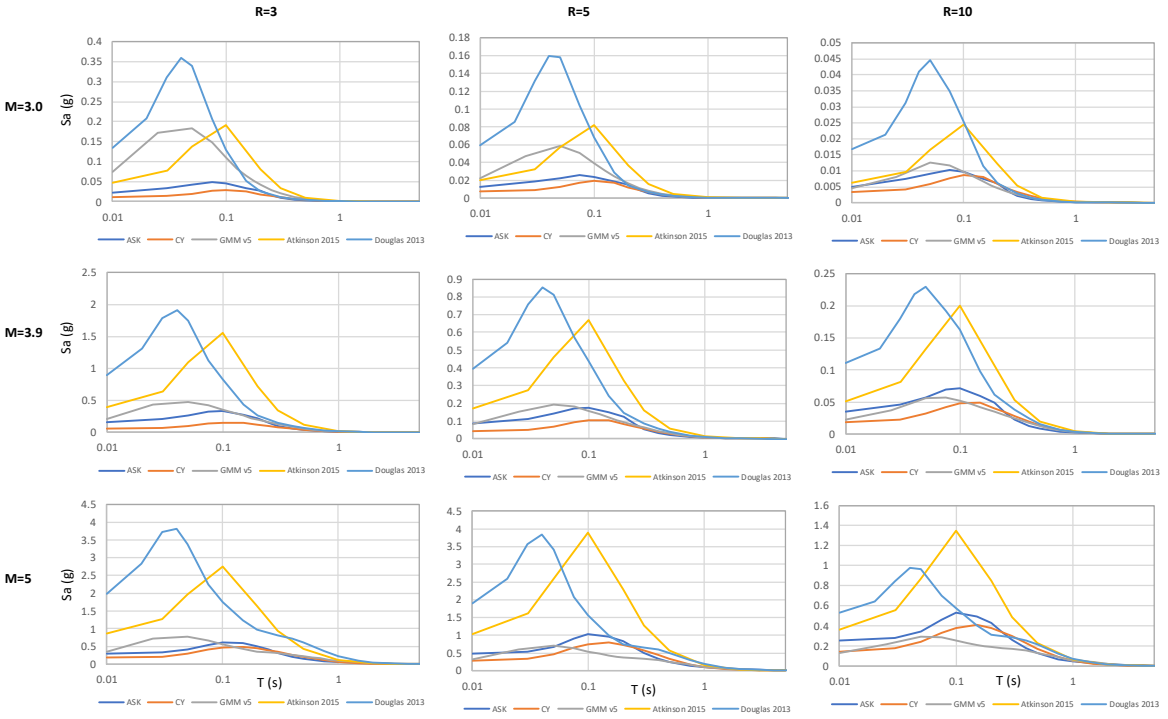


Figure 10. Trellis plot for acceleration response spectra of the selected GMPEs (median plus two sigma estimates and V_{S30}=1400m/s).

Based on the discussions above the following weights were applied on the GMPEs:

- Groningen V5 GMM Bommer et al. (2018): weight 0.6
- Abrahamson et al. (2014): weight 0.2
- Atkinson (2015): 0.1
- Douglas et al. (2013): 0.1

2.5 RESULTS

Results of the DSHA at stiff soil horizon (near the top of Pleistocene) for an earthquake scenario with M=3.9 and R=3km using the weighted average of the GMPEs for the median, median plus 1 sigma and median plus 2 sigma are presented on Figure 11. Also shown on the same figure for comparison is the response spectrum corresponding to 1100-year return period that was used at the base of the numerical model for the Eemshaven levee (black dashed line) as well as the fundamental period of the Eemshaven levee (dashed grey line) including SSI effects which was estimated to be about 0.7 second (Jongejan et al 2017). As shown on this figure the seismic demand at Friesland in the period range of interest (i.e. about 0.7 s) is considerably smaller than the input seismic demand used in the dynamic stability evaluations of the Eemshaven levee for the level of uncertainty considered in this study.

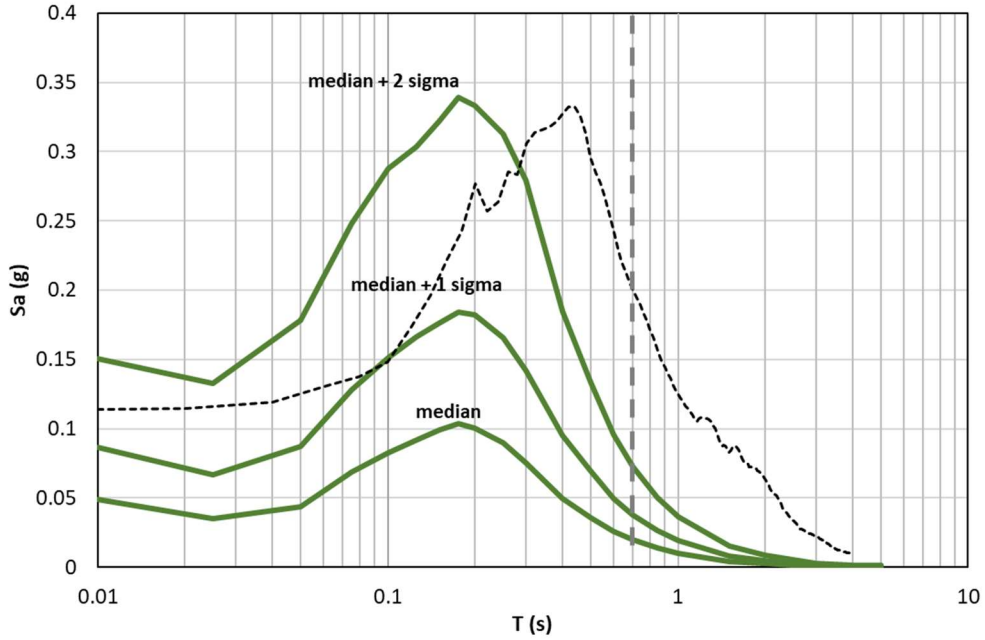


Figure 11. Comparison of deterministic spectra for a M=3.9 at R=3 km scenario using the weighted average of selected GMPEs for different values of standard deviations with probabilistic spectra using v2 GMM corresponding to a return period of 1100-years at the base of the numerical model used for the dynamic stability evaluations at Eemshaven levee.

In addition results for an upper bound M_{max} scenario of 4.1 (representative of the upper bound of maximum magnitude of small size fields in the Netherlands) are also presented in Figure 12. As for the DSHA results of the M=3.9 at R=3 km scenario discussed above, the seismic demand for this scenarios in the period range of interest (i.e. about 0.7 s) is smaller than the input seismic demand used in the dynamic stability evaluations of the Eemshaven levee for the level of uncertainty considered in this study

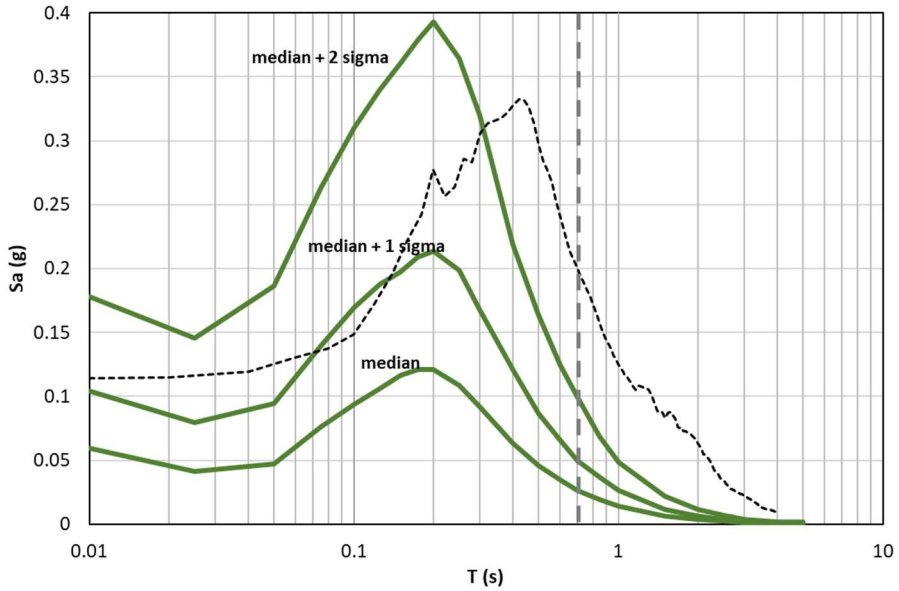


Figure 12. Comparison of deterministic spectra for a M=4.1 at R=3 km scenario using the weighted average of selected GMPEs with probabilistic spectra using v2 GMM corresponding to a return period of 1100-years at the base of the numerical model used for the dynamic stability evaluations at Eemshaven levee.

3.0 EVALUATION OF PRIMARY LEVEE DEFORMATION POTENTIAL

An estimate of seismic demand resulting from the Friesland gas field (i.e. in the form of spectral accelerations) was developed deterministically as described in the previous section and was compared with the seismic demand from the nearby (and much bigger) Groningen field. In this section: a) the available site-specific geotechnical data at the primary levee near Teenaard were used to: perform a screening level assessments of strength loss of the underlying Holocene deposits and b) the performance estimates from the previously studied Eemshaven-Delfzijl levee in Groningen gas field (Fugro 2017) were used as indicators of the Friesland primary levee deformation potential.

3.1 AVAILABLE DATA

The following data were provided for the evaluation of primary levee deformation potential near Ternaard:

- 67 CPTs in digital format by Wiertsema & Partners (2016) shown on Figure 13
- 32 scanned CPT graphs (1973)
- Longitudinal geotechnical cross sections with layer interpretations along the levee from km 41.2 to km 47.8 (included in Appendix A); and
- Drawings illustrating the levee geometry

Figure 13. Available explorations along the primary levee north of Ternaard.

3.2 GEOTECHNICAL SITE CONDITIONS

Geotechnical cross sections along the levee near Ternaard were provided by the Waterboard and are included in Appendix A. As shown on these sections the levees are underlain by a Holocene sequence of soft clays, peats and medium dense sands that extend down to El. -5 m to -10 m NAP where the top of Pleistocene deposits consisting of stiff clays and denser sands is encountered.

The thickness of the Holocene deposits appears to be relatively smaller in Friesland than under the Eemshaven-Delfzijl primary levee in the Groningen field, where the top of Pleistocene was encountered at about El. -13 m NAP.

In addition, both the lateral extent and thickness of medium dense Holocene sand deposits encountered beneath the Friesland primary levee are limited compared to the coarse-grained deposits encountered under the Eemshaven-Delfzijl primary levee within the Holocene sequence.

3.3 PRIMARY LEVEE GEOMETRY

Figure 14 shows a comparison of the levee geometries between the primary levee at km 45+400 near Ternaard and the primary levee at km 38+000 near Eemshaven (both having the same allowable probability of flooding of 1/1000 years). As shown on this figure the levee height and overall geometry is similar between the two sections.

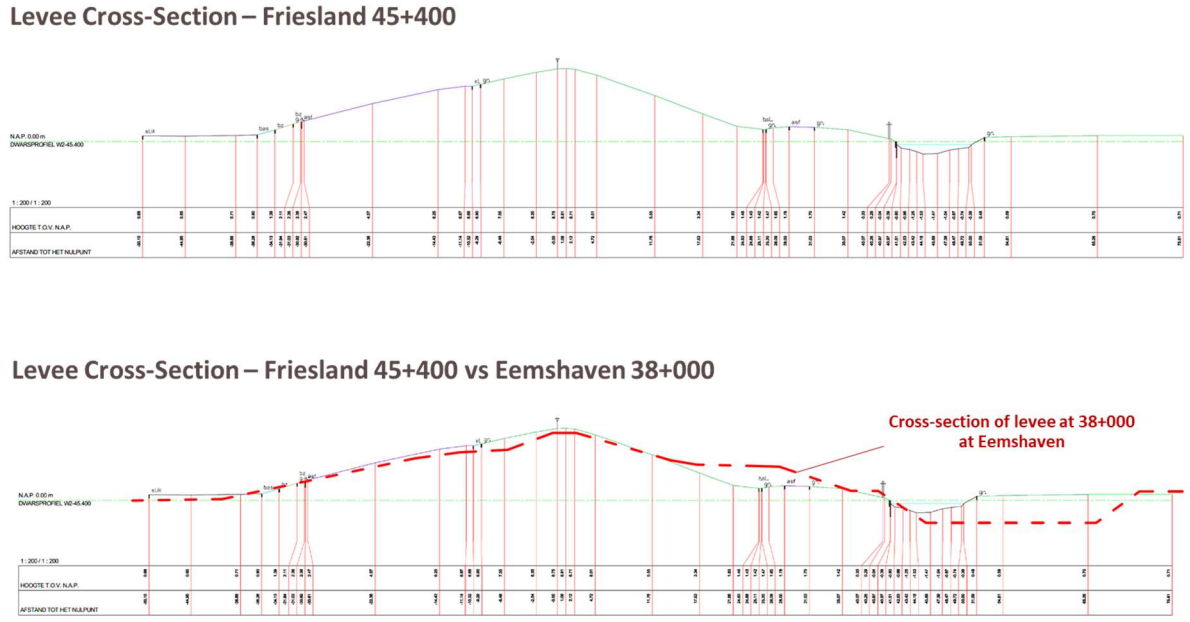


Figure 14. Comparison of primary levee geometries near Ternaard and near Eemshaaven with the same allowable probability of flooding of 1/1000 years.

3.4 EVALUATION OF LIQUEFACTION TRIGGERING POTENTIAL OF COARSE-GRAINED DEPOSITS

Evaluations of liquefaction triggering potential of coarse-grained deposits underlying the Friesland primary levee were performed using: a) the same screening methodology developed and applied in the Eemshaven-Delfzijl levee (Expert Panel, 2016), b) the deterministic ground motion estimate described in Section 2.0 for the median plus 2 standard deviations and c) the Groningen-specific Green et al (2018) simplified triggering procedure that has also been adopted in the current NPR9998 guidelines.

Using these criteria, we performed liquefaction triggering hazard assessments along approximately 6.6 km of the primary levee north of Ternaard using available geotechnical data (67 CPTs) provided to us in an electronic format.

For the Eemshaven-Delfzijl levee, the Expert Panel (2016) report recommended a two-phase approach for seismic stability evaluations. In Phase 1, simplified procedures based on available CPT data are used to estimate the potential liquefaction severity at each point where CPT data are available. In addition to evaluations of factors of safety at each CPT location, it was recommended that liquefaction severity be characterized using the Liquefaction Potential Index (LPI). If the Phase 1 analyses show a significant risk of liquefaction-related damage (typically associated with LPI values

larger than 5 as was also demonstrated for the Eemshaven-Delfzijl levee by Kolk et al 2017), it was recommended that a secondary phase (Phase 2) involving detailed, nonlinear, effective stress analysis of levee sections that do not pass the preliminary screening are initiated.

3.4.1 Basis of Evaluation

The liquefaction analyses presented herein are based on:

- Cyclic stress ratios (CSR) estimated from Peak Ground Acceleration (PGA) using the Green et al (2018) empirical procedure;
- Cyclic resistance of the coarse-grained deposits evaluated from Cone Penetration Test (CPT) data using the Green et al (2018) empirical procedure.

3.4.2 Cyclic Demand

The evaluation of the seismically induced demand or cyclic stress ratio (CSR) was estimated using a PGA estimate from the deterministic hazard analyses described in Section 2.0. According to Jongejan et al (2017) code calibration study, the design earthquake return period for the Eemshaven primary levee which has the same probability of flooding as the Friesland levee is 1100 years. Since the estimates of seismic demand for the Friesland levee were developed deterministically, the median + 2 standard deviation estimate of PGA was conservatively used in the evaluations resulting in a PGA value of 0.15g (see further discussion in Section 2.0). The estimated maximum earthquake magnitude of 3.9 was used for the triggering evaluations.

3.4.3 Cyclic Resistance

The CPT data were used to evaluate the liquefaction resistance or cyclic resistance ratio (CRR) of the liquefiable layers. The factor of safety (FoS) against liquefaction was then calculated as the ratio of the CRR to the CSR (FoS = CRR/CSR). Liquefaction potential evaluations were conducted using the Green et al (2018) procedure.

We note that the Green et al (2018) Groningen specific method is largely based on the Boulanger and Idriss (2014) method with the exception of:

(i) the r_d factor, which is defined from regression analyses of site response analyses results from Groningen-specific soil profiles and

(ii) the MSF factor which is derived based on an energy approach

Thin Layer Correction. In some cases, a thin layer correction factor is applied to the raw cone tip resistance using methods described in Youd et al. (2001). This correction was applied if a thin sand layer existed immediately above a softer clay or silt layer.

Fines Correction. The measured tip resistances were corrected for fines content and normalized to an overburden pressure of 1 atmosphere (~0.1 MPa). The fines content and associated corrections were estimated from CPT data using the procedure suggested by Boulanger and Idriss (2014) using C_{FC}=0.

The Ground water table (GWT) was assumed at +0.50m NAP.

3.4.4 Evaluation of Liquefaction Potential Index

The estimated Factor of Safety against liquefaction shows the liquefaction potential of a soil layer at a particular depth; however, it may not reflect the degree of liquefaction severity over the

entire depth of a soil column. Iwasaki et al. (1978) introduced a liquefaction potential index (LPI) to estimate the potential for liquefaction to cause foundation and structural damage.

LPI at a site is calculated by integration of FoS along the soil column up to 20m depth. A weighting function is added to give more weight to the layers closer to the ground surface.

The LPI is expressed as follows:

$$\int_0^{20m} F.w(z)dz$$

Where;

$F \quad = 1 - FoS, \text{ for } FoS \leq 1$

$F \quad = 0 \text{ for, } FoS > 1$

$W(z) \quad = 10 - 0.5z, \text{ where z is depth in meters}$

LPI is intended to demonstrate liquefaction severity during seismic events, and LPI ≥ 5 is generally considered as a threshold for the surface manifestation of liquefaction. In addition, numerical analyses performed for the Eemshaven-Delfzijl levee for various scenarios associated with different LPI values showed that the deformation potential of the levee for LPI values less than 5 was low (Kolk et al 2017). An example of levee crest settlement versus LPI estimated from dynamic numerical evaluations for the Eemshaven primary levee is shown on Figure 15.

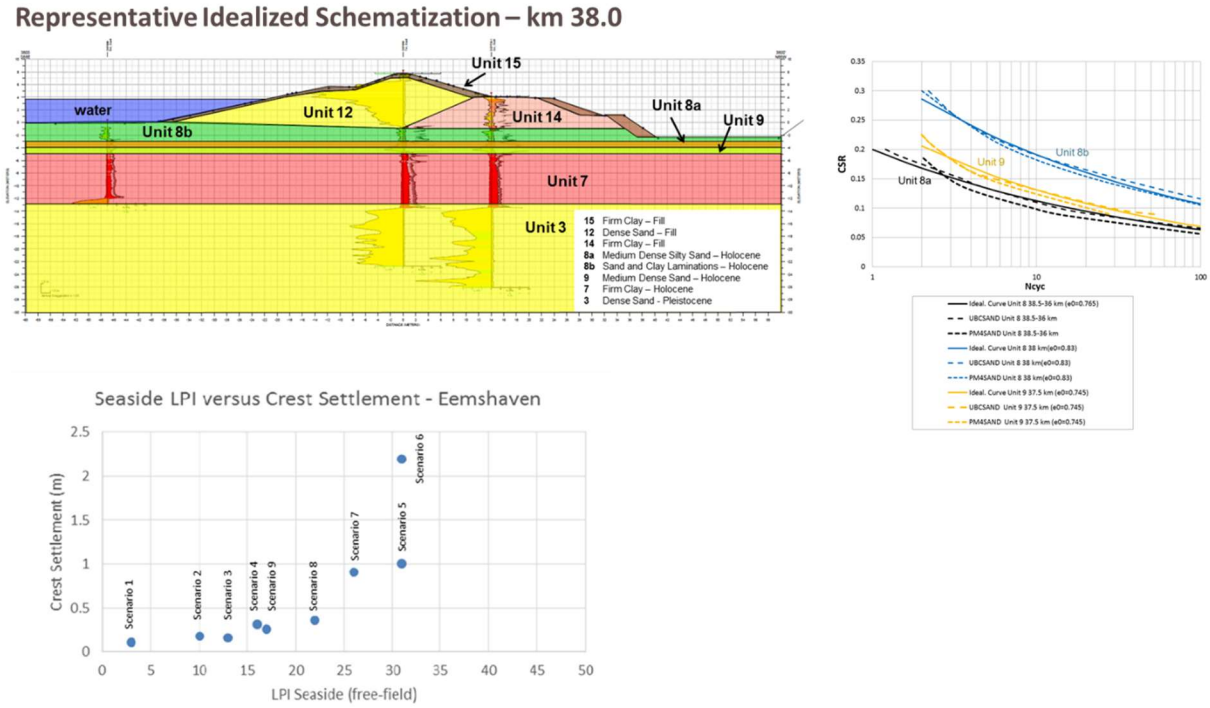


Figure 15. Example of levee crest settlement versus LPI estimated from dynamic numerical evaluations for the Eemshaven primary levee (Kolk et al 2017).

3.4.5 Results

CPTs along the Friesland primary levee were analyzed using the procedures described above. Figure 16 shows the estimated LPI values along the levee. The analyses showed that LPI values are

either equal to zero or have very close to it for the vast majority of the CPTs analyzed with couple of exceptions where the LPI values are about 0.7, which is still a very low value.

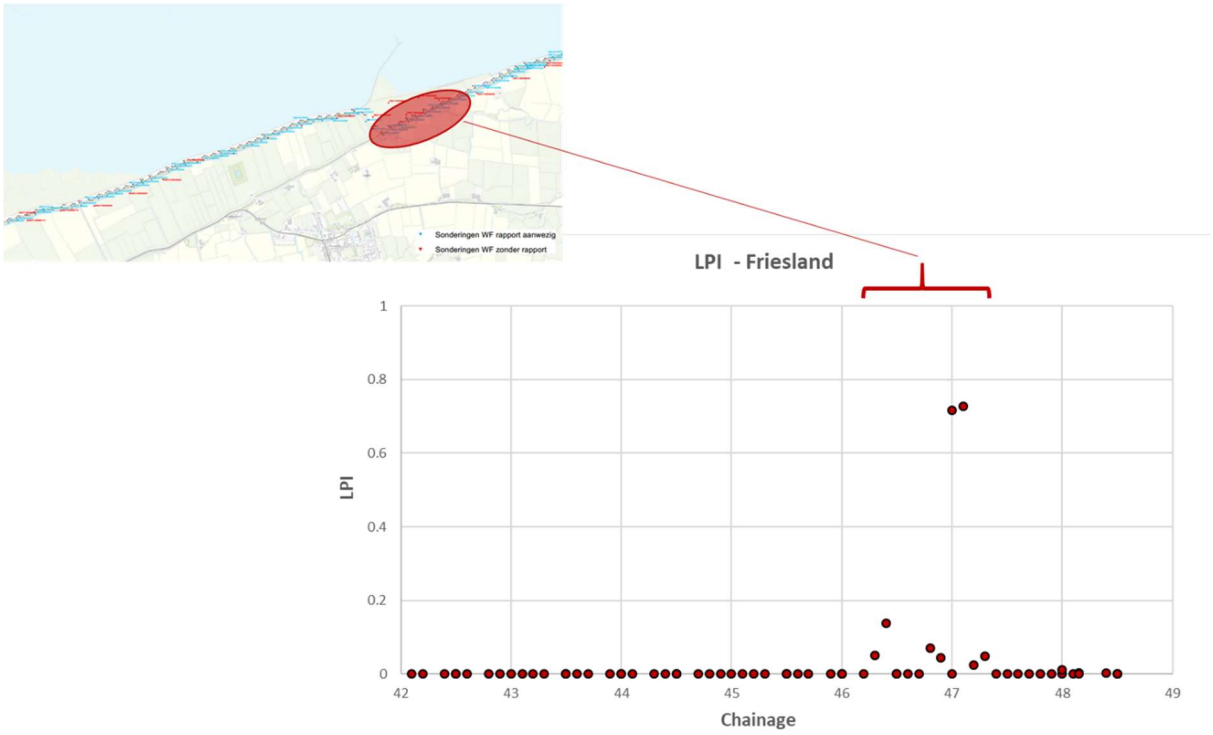


Figure 16. Estimated LPI values along Friesland levee.

Figures 17 and 18 present typical results for a CPT with LPI=0 and a CPT with the maximum estimated LPI value of 0.73. On these figures the tip resistance is shown as a black line on the first graph. The area between the CPT measured tip resistance and the CPT axis is colored according to the zones of Robertson (1990) classification chart shown on Figures 19. Also shown on each plot is the estimated tip resistance that would be required (based on the Green et al 2018 procedure) to achieve a factor of safety of 1.0 for the assumed earthquake scenario. In general, layers and zones where the tip resistance required to preclude the occurrence of liquefaction (i.e. resulting in FS of 1) is larger than the measured tip resistance are considered liquefiable. Where the resistance required to prevent liquefaction is larger than the measured resistance, the zone that represents the deficiency is shaded blue. In the second graph the friction ratio is presented. The third graph presents soil behavior index (I_c) with a black line and the zones of Robertson (1990) classification chart. In the fourth graph the calculated CSR and CRR values are plotted and the fifth graph shows the factor of safety at each depth with black dots. At depths where the estimated FoS is greater than 4, we assign the value 4, so that it plots within the limits of this graph.

Results from liquefaction evaluation analyses of all CPT data are presented in Appendix B.

The liquefaction triggering evaluation results indicate that the liquefaction triggering potential of the sandy materials underlying the Friesland primary levee is low.

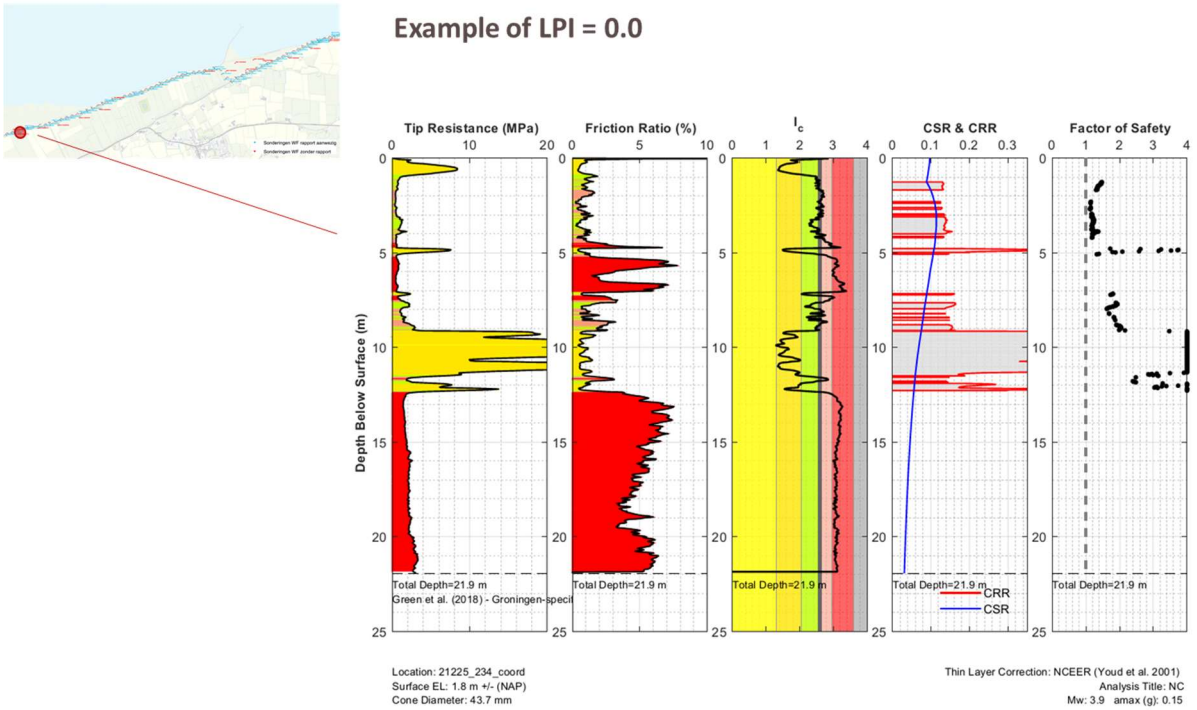


Figure 17. Example CPT liquefaction triggering log for a CPT with LPI=0.

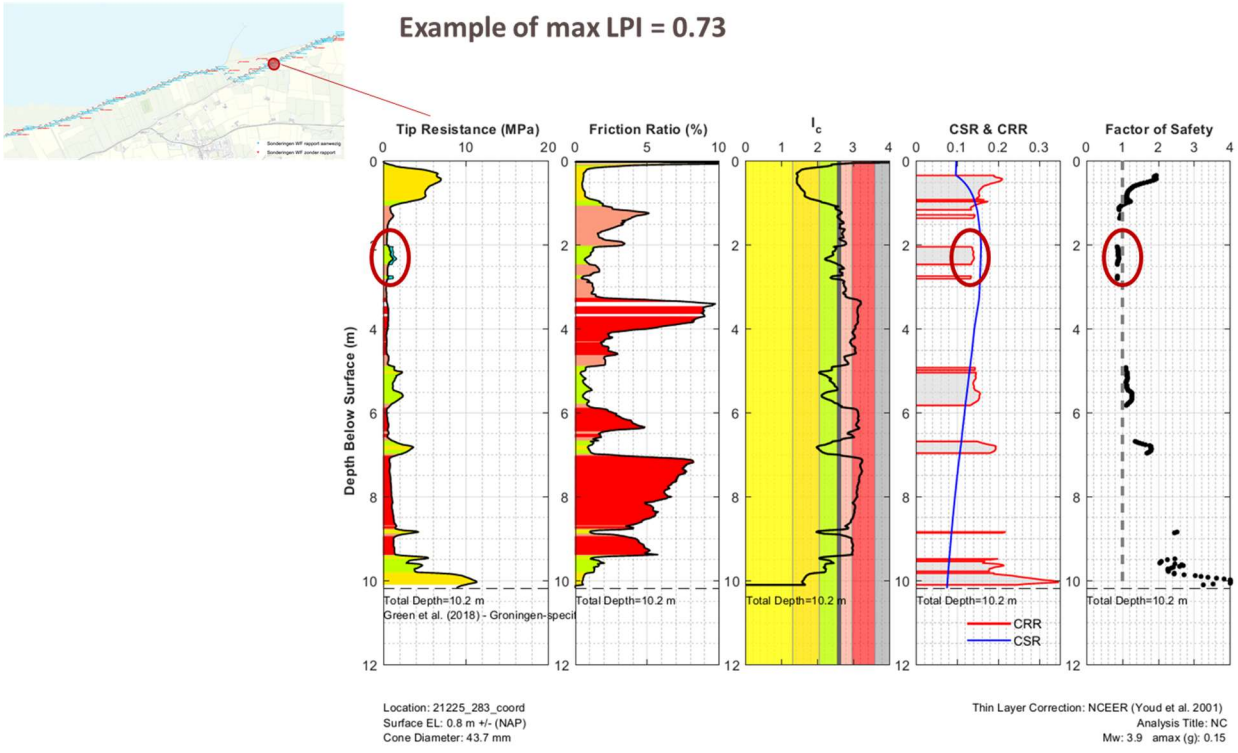
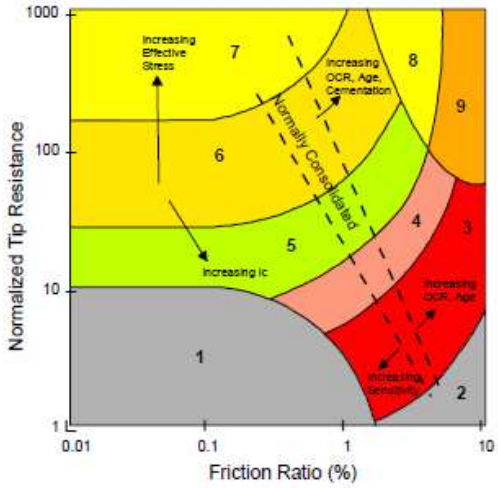


Figure 18. Example CPT liquefaction triggering log for a CPT with LPI=0.73.



Zone	Soil Behavior Type
1	Sensitive Fine-grained
2	Peats
3	Silty Clay to Clay
4	Clayey Silt to Silty Clay
5	Silty Sand to Sandy Silt
6	Clean Sand to Silty Sand
7	Gravelly Sand to Dense Sand
8	Very Stiff Sand to Clayey Sand*
9	Very Stiff Fine-Grained*

*heavily overconsolidated or cemented

Figure 19. Robertson (1990) Classification Chart.

3.5 EVALUATION OF CYCLIC SOFTENING POTENTIAL OF FINE-GRAINED DEPOSITS

To evaluate the potential presence of soft clay layers along the levee, we estimate the undrained shear strength (Su) of the fine-grained layers from all the CPTs available using an N_k factor of 15. Figure 20 presents the Su values that are estimated to be below 40 kPa (red dots) and 20 kPa (black circles). As shown on this figure relatively soft clay layers with Su<20kPa are present under the levee.

For the evaluation of cyclic softening potential of fine-grained deposits a similar approach as the one adopted for the Eemskanaal levee was adopted (Georgarakos et al 2017). According to this approach the Factor of Safety against cyclic softening proposed by Idriss and Boulanger (2008) is first calculated for the Holocene soft clay layers according to the following expression:

$$\mathrm{FS} = \frac{CRR_M}{CSR_M}$$

where $CSR_M = \mathbf{0.65}\ \frac{\tau_{peak}}{\sigma_{vc}^{'}}$ is the cyclic shear stress ratio, and

$CRR_M = \mathbf{0.80}\ \frac{s_u}{\sigma_{vc}^{'}}\ \boldsymbol{MSF\ K_a}$ is the cyclic resistance ratio of the soil.

MSF is the magnitude scaling factor and K_a is a static shear stress correction factor (Idriss and Boulanger 2008). Then, the FS values within the Holocene fine-grained deposits are integrated to take into account both the thickness and the degree of potential softening of the soft soil, resulting in a scalar measure that is referred to as Cyclic Softening Potential Index (CSPI). This index is intended to be an approximate soft clay analogue of Liquefaction Potential Index (LPI).

$$CSPI = \int_0^{H_{holocene}} (1 - FS)\, dz$$

The estimated CSPI values along the Friesland levee are shown on Figure 21 (left plot). As shown on this figure the CSPI values are 0 for the majority of the CPTs (indicating lack of softening potential under the design event) with the exception of 1 CPT with a CSPI value of 0.5 which is still

low. For comparison the estimated CSPI values along Eemshaven-Delfzijl levees are plotted on the right plot of Figure 21 which show higher values of up to 3 (which are still associated with low levee deformations).

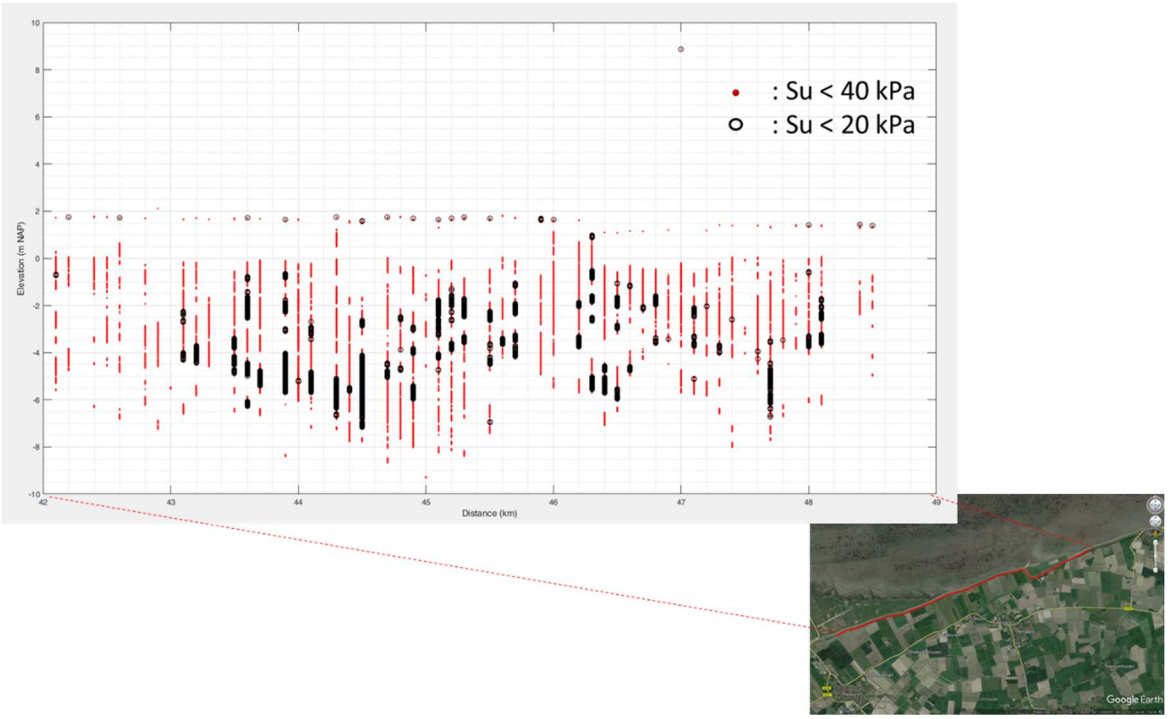


Figure 20. Estimated Su values for all the CPTs along the. Red dots correspond to S_u less than 40 kPa, and black circles correspond to S_u less than 20 kPa.

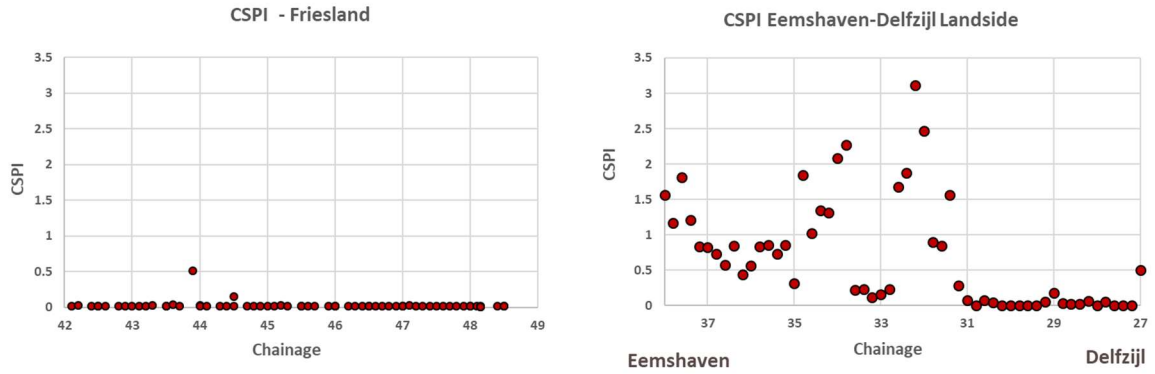


Figure 21. Estimated CSPI values along Friesland (left) and Eemshaven-Delfzijl (right) levee.

4.0 SUMMARY AND CONCLUSIONS

As part of the Environmental Impact Assessment Study for the Ternaard gas field development NAM is estimating the risks for major infrastructure such as the primary levee due to potential gas-extraction induced seismic activity.

Deterministic seismic hazard assessment (DSHA) were performed to develop estimates of seismic demand at the Friesland gas field that were then compared to the levels of seismic demand used in the dynamic levee stability evaluations for the Segment 6-6 primary levee in Groningen gas field near Eemshaven, which has the same allowable annual probability of flooding as the primary levee north of Ternaard (i.e. 1/1000). The relative seismic demands and the performance estimates from the previously studied Eemshaven-Delfzijl levee near Groningen were used as indicators of the Friesland primary levee deformation potential.

4.1 DETERMINISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSES

The seismic demand was estimated at a stiff soil horizon level located near the top of Pleistocene deposits (about El. -10 m NAP) and was compared to the acceleration response spectrum used as input at the base of the numerical models in the dynamic stability evaluations for Eemshaven levee (about El. -30 NAP).

A review of regional geologic models from Dinoloket showed that roughly the same sequence of geologic units is encountered in Friesland and in Groningen gas fields although the thicknesses of the individual formations vary between the two fields along the primary levees. Estimates of reference bedrock horizontal acceleration response spectra were developed using four GMPEs (Groningen v5 GMM by Bommer et al. 2018 with a weight of 0.6; Abrahamson et al. 2014 NGA West-2 with a weight of 0.2; Atkinson 2015 with a weight of 0.1; and Douglas et al. 2013 with a weight of 0.1) for a deterministic scenario of Mw=3.9, R=3 km. Maximum magnitude, M_{max}, estimates were developed by NAM following the guidelines outlined by the State Supervision of Mines (2016).

Similar to the v5 GMM (Bommer et al. 2018) the bottom of the North Sea supergroup (NS_B) was selected as reference bedrock with an assumed Vs30 of 1400 m/s. For the Atkinson (2015) and Douglas (2013) GMPEs that only provide spectral accelerations for Vs30 values of 760 m/s and 1100 m/s, respectively, the linear site amplification function term by Boore et al. (2014) was used to adjust the GMPEs to a common reference V_{s30} of 1400 m/s. Due to the largely similar geologic units encountered above 800 meters depth between Groningen and Friesland the v5 GMM nonlinear site amplification function was used to estimate horizontal acceleration response spectra at the top of Pleistocene (Vs30 ~ 260 m/s, Zone 308 from v5 GMM)

The input seismic demand in the Eemshaven primary levee stability assessment was derived from probabilistic seismic hazard analyses using the v2 GMM (Bommer 2016) and was associated with an 1100-year return period. In the deterministic approach adopted for the seismic demand at the Friesland field, estimates of spectral accelerations resulting from a maximum magnitude event are derived as a function of the number of standard deviations from the median prediction. In order to assess what is a reasonably “conservative” value or range of values to be compared with the Eemshaven-Delfzijl levee demands, a deterministic seismic hazard analyses was performed using the v5 GMM (Bommer 2018) and an earthquake scenario with magnitude M_w 5 at a distance of 10 km, which corresponds to the controlling scenario based on PSHA deagreggation results at the Eemshaven levee location with the v2 GMM. Based on this the median plus one and median plus two sigma

spectral acceleration values were found to provide a reasonably “conservative” range of values to be compared with the Eemshaven-Delfzijl levee demands.

Analyses results indicated that the estimated seismic demand at Friesland for predictions of up to 2 standard deviations above the median is considerably smaller than the input seismic demand used in the dynamic stability evaluations of the Eemshaven levee in the period range of interest (i.e. about 0.7 s).

4.2 EVALUATION OF PRIMARY LEVEE DEFORMATION POTENTIAL

Available site-specific geotechnical data at the primary levee near Teenaard were used to perform screening level assessments of strength loss of the underlying Holocene deposits and the performance estimates from the previously studied Eemshaven-Delfzijl levee in Groningen gas field (Fugro 2017) were used as indicators of the Friesland primary levee deformation potential.

Liquefaction triggering evaluations of coarse-grained deposits underlying the Friesland primary levee were performed using the same screening methodology developed and applied in the Eemshaven-Delfzijl levee (Expert Panel, 2016), the deterministic seismic hazard estimate for the median plus 2 standard deviations prediction and also considering the Groningen-specific Green et al (2018) simplified triggering procedure that has also been adopted in the current NPR9998 guidelines. Results indicate very low liquefaction triggering potential of the sandy materials present at the area. This is also indicated by the very low LPI values estimated (0 for most cases and less than 0.8 for all the CPTs analyzed).

As part of the analyses performed for the Eemshaven-Delfzijl levee to establish a relationship between LPI and levee deformations, it was found that for LPI values less than ~5 crest settlements are expected to be small and no further analyses was warranted (Expert Panel 2016; Kolk et al 2017).

In addition, for the evaluation of cyclic softening potential of fine-grained deposits underlying the levee a similar approach as the one adopted for the Eemskanaal levee was used (Georgarakos et al 2017) through the estimation of the Cyclic Softening Potential Index (CSPI). The estimated CSPI values along Friesland levee are 0 or close to 0 indicating low potential for cyclic softening of fine-grained deposits.

Based on the above it appears that the deformation potential of the Friesland primary levee for a scenario earthquake of M_w 3.9 is low and no further analyses are warranted.

5.0 REFERENCES

Abrahamson N.A., Silva W.J., Kamai R. 2014, “Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions”, Earthquake Spectra, Vol 30, No 3, pp 1025-1055

Andrus, R.D., Mohanan, N.P., Piratheepan, P., Ellis, B.S., and Holzer, T.L. (2007) “Predicting shear-wave velocity from cone penetration resistance”, Proc., 4th Inter. Conf. on Earthq. Geotech. Eng., Thessaloniki, Greece

Atkinson (2015), “Ground-Motion Prediction Equation for Small-to-Moderate Events at Short Hypocentral Distances, with Application to Induced-Seismicity Hazards”, Bull. Seism. Soc. Am. 105(2A), pp. 981-992.

Bommer, J.J., Edwards B., Kruiver P.P., Rodriguez-Marek A., Stafford P.J., Dost B., Ntinalexis M., Ruigrok E. B., and Spetzler J (2018) “V5 Ground-Motion Model (GMM) for the Groningen Field”, March.

Bommer, J.J., Dost, B., Edwards, B., Stafford, P.J., van Elk, J., Doornhof, D. & Ntinalexis, M., (2016). Developing an application-specific ground motion model for induced seismicity. Bulletin of the Seismological Society of America 106: 158–173.

Bommer, J.J., P.J. Stafford, B. Edwards, B. Dost, E. van Dedem, A. Rodriguez-Marek, P. Kruiver, J. van Elk, D. Doornhof & M. Ntinalexis (2017). Framework for a ground-motion model for induced seismic hazard and risk analysis in the Groningen gas field, The Netherlands. Earthquake Spectra 33(2), 481-498.

Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. (2014) CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures, Report no. UCD/CGM-14/01, University of California, Davis, CA, 138 pp.

Bourne, SJ, SJ Oates, J. van Elk, and D. Doornhof (2014), A seismological model for earthquakes induced by fluid extraction from a subsurface reservoir , J. Geophys. Res. 119 (2), 8991-9015, doi: 10.1002 / 2014JB011663. Hanks, T., and H. Kanamori (1979), Moment magnitude scale , J. Geophys. Res. 84, 2348-2350.

Boore, D.M., Stewart J.P., Seyhan E. and Atkinson G.M. (2014), “NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes”, Earthquake Spectra 30(3), pp. 1057-1085.

Bozorgnia Y., Abrahamson N.A., Al Atik L., Ancheta T.D., Atkinson G.M., Baker J.W., Baltay A., Boore D.M., Campbell K.W., Chiou B.S.J., Darragh R., Day S., Donahue J., Graves R.W., Gregor N., Hanks T., Idriss I.M., Kamai R., Kishida T., Kottke A., Mahin S.A., Rezaeian S., Rowshandel B., Seyhan E., Shahi S., Shantz T., Silva W., Spudich P., Stewart J.P., Watson-Lamprey J., Wooddell K., Youngs R., 2014, “NGA-West2 Research Project”, Earthquake Spectra, Volume 30, No. 3, pages 973-987.

Chiou B.S.J., and Youngs R.R., 2014, “Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra”, Earthquake Spectra, Vol. 30, No 3, pp 1117-1153.

Douglas, J., Edwards B., Convertito V., Sharma N., Tramelli A., Kraaijpoel D., Mena Cabrera B., Maercklin N. and Troise C. (2013), “Predicting ground motion from induced earthquakes in geothermal areas”, Bull. Seismol. Soc. Am. 103(3), pp. 1875–1897.

Expert Panel, 2016. Expert Panel Report, 2 December 2016. Letter addressed to E. van Dijk by Chacko, J. Green, R.A. Kramer, S.L. Towhata, I

Farhadi, A., Pezeshk S., and Khoshnevis N. (2018). Assessing the applicability of ground-motion models for induced seismicity application in central and eastern North America, Bull. Seismol. Soc. Am. 108, no. 4, 2265–2277.

Fugro (2017) Evaluation of Dynamic Stability Using Code Calibrated Design Parameters Eemshaven-Delfzijl Levee The Netherlands, March

Georgarakos P., Drosos V., Tsiaousi D., Dean C., Giannakou A. and Chacko J. (2017) Proposed Screening Methodology for the Identification of Critical Cross-sections along the Eemskanaal Levee, project memorandum prepared for NAM, dated July 31st 2017

Green R.A., Bommer J.J., Stafford P.J., Maurer B.W.,Edwards B.,Kruiver P.P.,Rodriguez-Marek A., de Lange G., Oates S.J., Storck T., Omidi P., Bourne S.J., and van Elk J. 2018. Liquefaction Hazard Pi-lot Study for the Groningen Region of the Netherlands due to Induced Seismicity, prepared for NAM

Jongejan R., Chacko J., Giannakou A., Drosos V., Tasiopoulou P. (2017) Code calibration for coupled, effective stress FEM-assessments of the primary flood defenses at Eemshaven-Delfzijl, Final Report, 28 February

Idriss, I. M., and Boulanger, R. W., (2008), “Soil liquefaction during earthquakes”, Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuko, F., and Yasuda, S.(1978) “A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan, Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation, San Francisco, p.885–896.

Kanamori, H. (2001), Energy budget of earthquakes and seismic efficiency , in Earthquake Thermodynamics and Phase Transformations in the Earth's Interior, edited by R. Teisseyre, pp. 293-305, Academic, Wlatham, Mass.

Kolk B., Coelho B., Venmans A., and Giannakou A. (2017) LPI screening for the Eemshaven-Delfzijl levee, prepared for NAM, March

Kraaijpoel, D., and Dost, B., 2013. Implications of salt-related propagation and mode conversion effects on the analysis of induced seismicity, Journal of Seismology 17(1), 95-107.

Kruiver, P. P., E. van Dedem, E. Romijn, G. de Lange, M. Korff, J. Stafleu, J.L. Gunnink., A. Rodriguez-Marek, J.J. Bommer, J. van Elk & D. Doornhof (2017). An integrated shear-wave velocity model for the Groningen gas field, The Netherlands. Bulletin of Earthquake Engineering 15(9), 3555-3580.

Kostrov, VV (1974), Seismic moment and energy or earthquakes and seismic flow of rocks , Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth, Eng. Transl., 1, 23-44.

Mayne, P.W., and Rix, G.J. (1993), "Gmax-qc Relationships for Clays," Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 16, No. 1, pp. 54-60.

Mayne, PW, and Rix, G.J. (1995) “Correlations between shear wave velocity and cone tip resistance in natural clays”, Soils and Foundations, 35(2), pp. 107–110

Rix, G.J., and Stokoe, K.H. (1991) “Correlations of initial Tangent Modulus and Cone Penetration Resistance”, Proc. International Symposium on Calibration Chamber Testing, Huang A.B., Ed., Elsevier Publishing, New York, pp. 351-362

Robertson, P.K. (2009) “Interpretation of cone penetration tests – a unified approach”, Canadian Geotech. J., 46(11), pp. 1337–1355

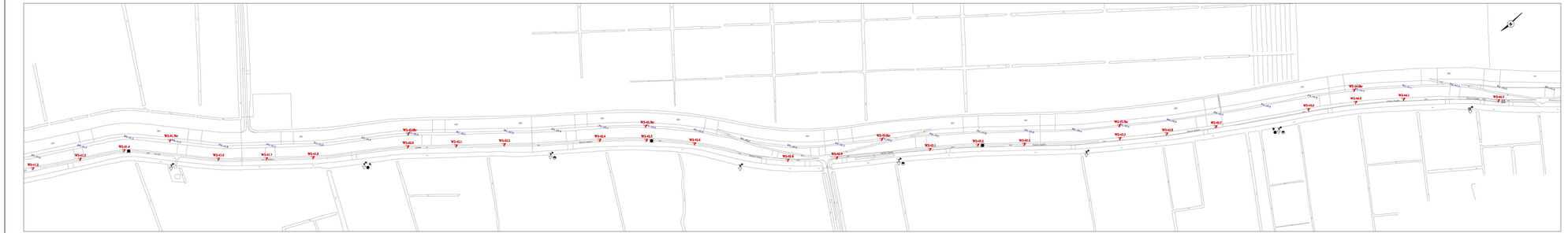
Robertson, P.K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical J. 27(1), 151–58.

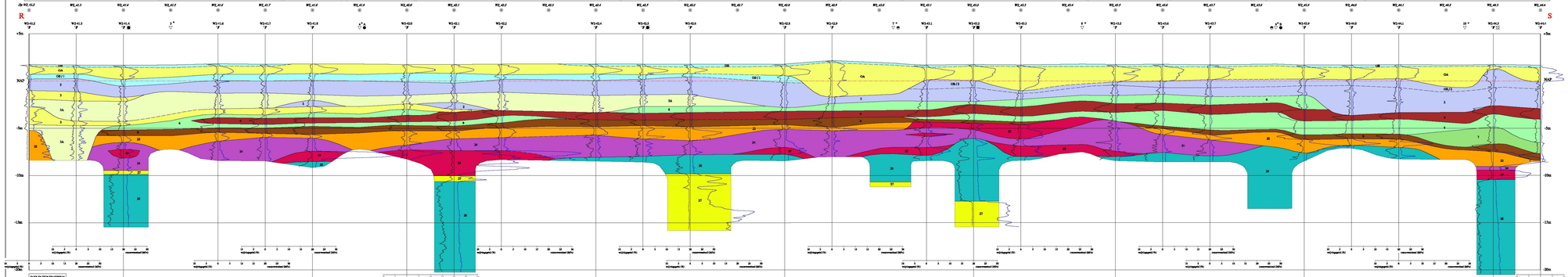
State Supervision of Mines (2016) Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning, tijdelijke leidraad voor adressering MBB. 24.1.P, versie 1.2, February 1st (in Dutch)

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe, K. H. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE 127(10), 817–33.

APPENDIX A

LONGITUDINAL GEOTECHNICAL CROSS SECTIONS





LITHOSTRATIGRAFISCHE LEGENDA

3A	bouwlaag3A zand	Antropogeen pleistoc	HOLOCEEN
3B	bouwlaag3A klei		
3C	bouwlaag3A klei-vij zand		
1	klei, plastisch(), zandig, vaak humeus	Afzettingen van Duinzande	HOLOCEEN
2	klei, zilvig tot zwak zilvig, veelal met dunne zandlagen		
1-2	klei, zandig tot zand, kleiig		
4A	zand met kleilagen		
4B	zand, zilvig tot kleiig, vaak met veel kleilagen		
5	zand, plastisch(), met schelen kleilagen		
	veen	Hollandveen	
6	klei, zilvig, vaak humeus	Afzettingen van Calais	
7	klei, zilvig, vaak met veel zandlagen		
6-8	klei, zandig tot zand, kleiig		
8A	zand, fijn met silt, en kleilagen		
8	zand, plastisch(), schelrijk kleilagen		
	veen	Basisveen	
21	klei, zilvig en zandig, vaak humeus (veen)	FORMATIE VAN TWENTE	PLEISTOCEEN
22	veen		
23A	zand, fijn, matig tot leem, zandig		
23	zand, plastisch() humeus		
24	klei, zandig en grindig (kalkrijk)	FORMATIE VAN DRENTHE	
25A	zand, fijn, matig, kalkrijk		
25	zand, schelrijk, plastisch() grindig		
26	klei, zilvig, (schelrijk)	FORMATIE VAN BOXTEL	
27	zand, fijn		

ALGEMENE LEGENDA

- Middelmaats sondering
- Zware sondering
- Ingemeetboring 20mm
- Ingemeetboring 60mm
- Peilstoring
- Handboring
- Spitsmuisboring
- CO 0003

Schaal profiel: horizontaal 1:2000
verticaal 1:100

0 50 100 150 200 250 500m

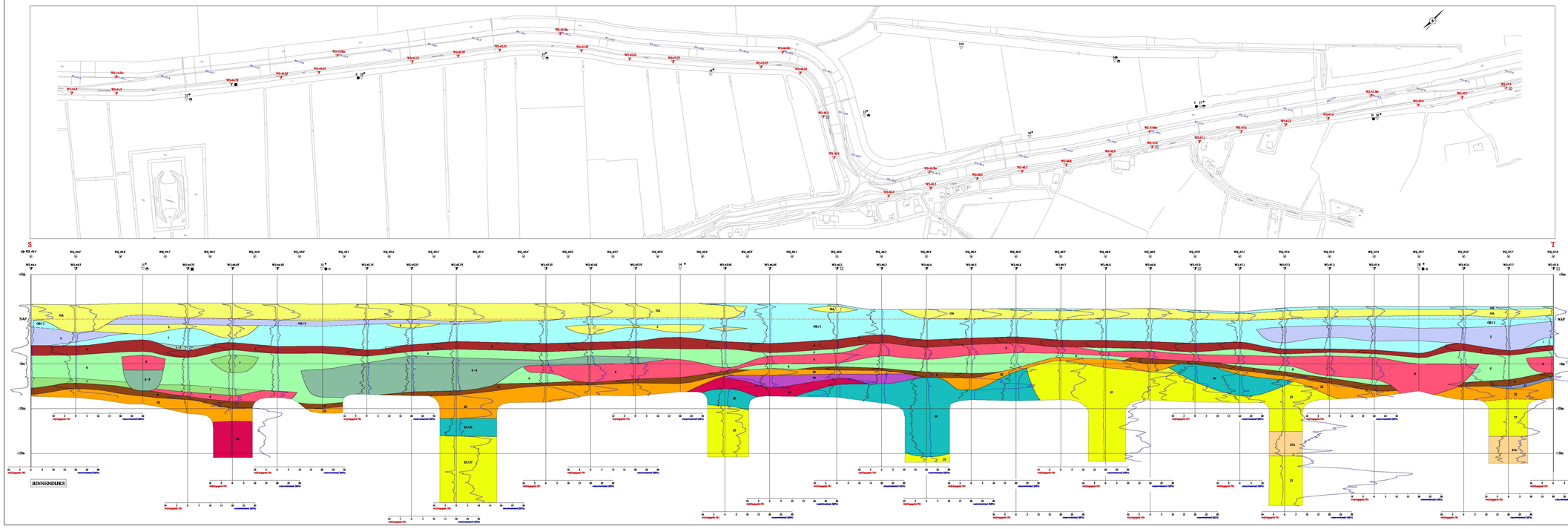
Ossus meetpunt

KAARTBLAD 44 W 178 © Topografische Dienst Emmen SCHAAL 1:25000

Adviseur WL|Delft
Opdrachtgever Gemeente Wijdemeren

Datum	2000-08-01	pl	1
Tekening nr.	CO-376710	blz	1/1
Bijl.	G18	Schaal	

VELDLEGERDORPLING WIJDEMEREN
DIJKVAK 30 VEER OP AMELAND – 'T SCHOOR
GEOTECHNISCH PROFIEL R-S Dp WZ-41.2 tot Dp WZ-44.4



LITHOSTRATIGRAFISCHE LEGENDA

Hk	hoofdzandlik zand	Antropogeen grondlik		HOLOCEEN
HB	hoofdzandlik klei			
HC	hoofdzandlik klei en veen			
1	klei, plaatselijk zandig, vaak humeus	Afzettingen van Duinzande	JONGSTE AFZETTINGEN	
1-2	klei, zandig tot sterk zandig, vaak met dunne veenlagjes			
2	klei, zandig tot zwak zandig			
2A	zand met kleilagjes			
2B	zand, zandig tot kleilig, vaak met veel kleilagjes			
3	zand, plaatselijk met schelp kleilagjes			
	veen	Holocene veen		
4	klei, uiterst, vaak humeus	Afzettingen van Calais		
5	klei, uiterst, vaak met veel veenlagjes			
5-6	klei, zandig tot zwak kleilig			
6A	zand, fijn met silt- en kleilagjes			
7	zand, plaatselijk enkele kleilagjes			
	veen	Basisveen		
8	klei, uiterst zandig, vaak humeus (loss)	FORMATIE VAN TWENTE		PLEISTOCEEN
8A	veen			
9A	zand, fijn, matig kleilig tot leem, zandig			
9B	zand, plaatselijk humeus			
21	klei, zandig en grindig (keileem)	FORMATIE VAN ZELHEM		
21A	zand, fijn, matig leemig			
22	zand, redelijk, plaatselijk grindig			
23	klei, siltig (antiek)	FORMATIE VAN PEELO		
27	zand, fijn			
27A	zand, siltig tot kleilig			

ALGEMENE LEGENDA

- Middelbrowse sondering
- Zware sondering
- Begroutsondering 20mm
- Begroutsondering 60mm
- Peilbuis
- Peilbuisfilter
- Peilbuisafsluiting
- CO-B609

Schaal profiel: horizontaal 1:5000
verticaal 1:100

Cross section number

GeoDelft	Postbus 69, 2600 AB Delft Stieltjesweg 2, 2628 CK Delft	Telefoon 015-269 36 00 Telefax 015-262 38 20	Verslagnr. extr. geodata

datum: 2000-05-01 | kpl: 1 | blz: 1

VERLEGGING/VERSTERKING WAGENINGSEWEG
DIJKVAK 20 EN 21 VOOR DP AMELAND – WIERUM

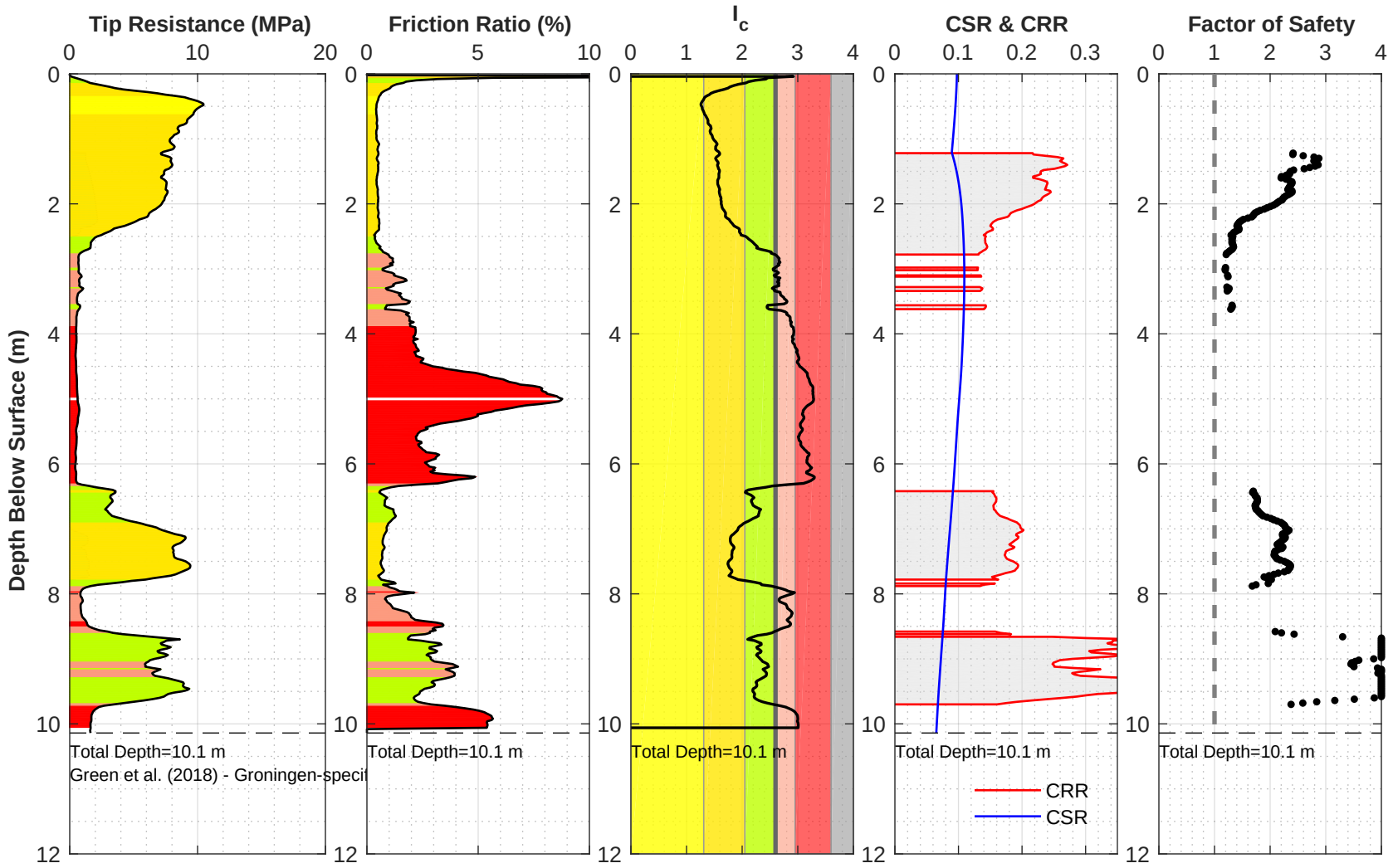
CO-378710 | blz: 1

GEOTECHNISCH PROFIEL S-T Dp W2-44.4 tot Dp W2-47.8

BIJL. G19 | kpl: 1 of 1

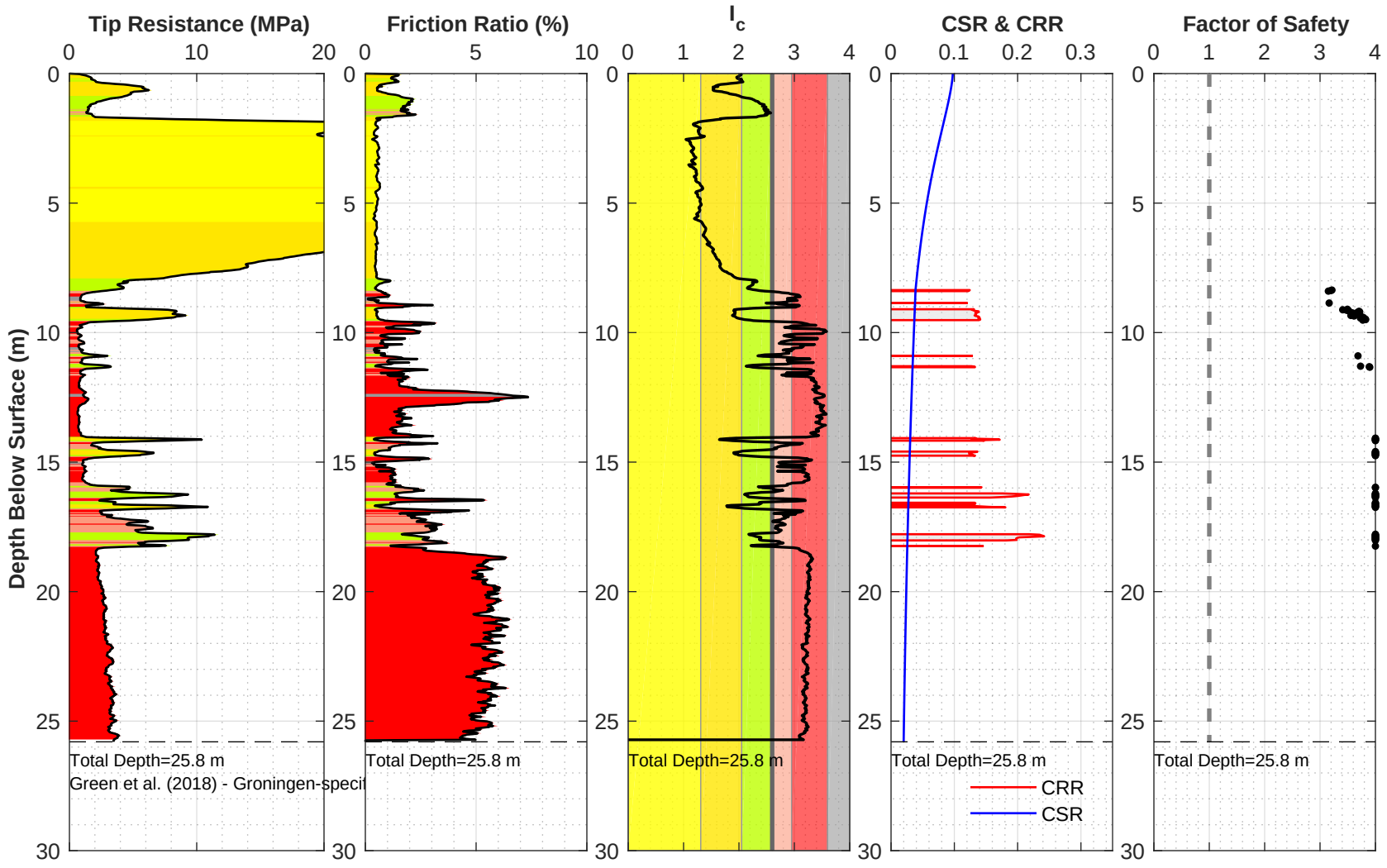
APPENDIX B

LIQUEFACTION TRIGGERING CPT LOGS



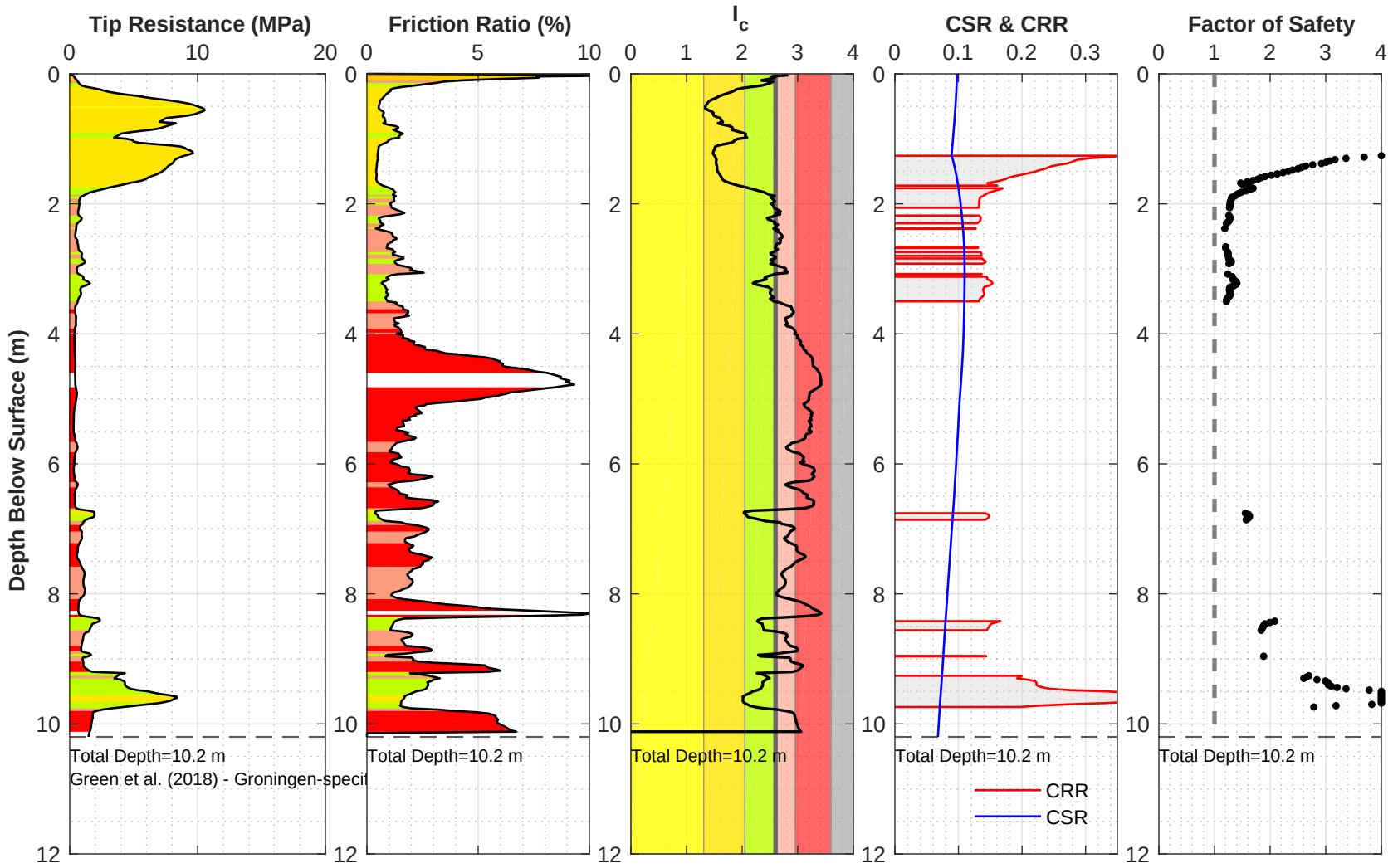
Location: 21225_245_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



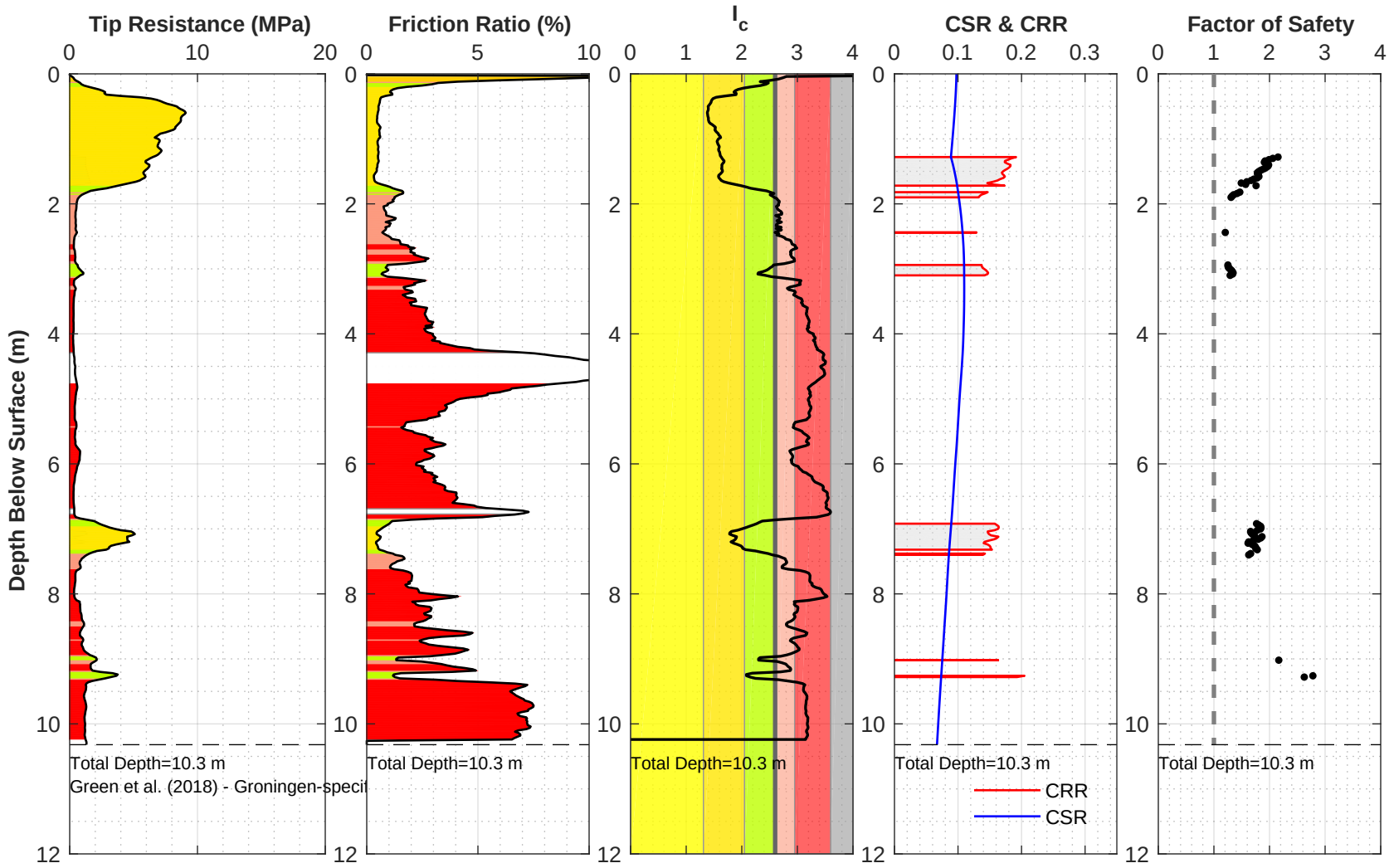
Location: 21225_246_coord
Surface EL: 8.9 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



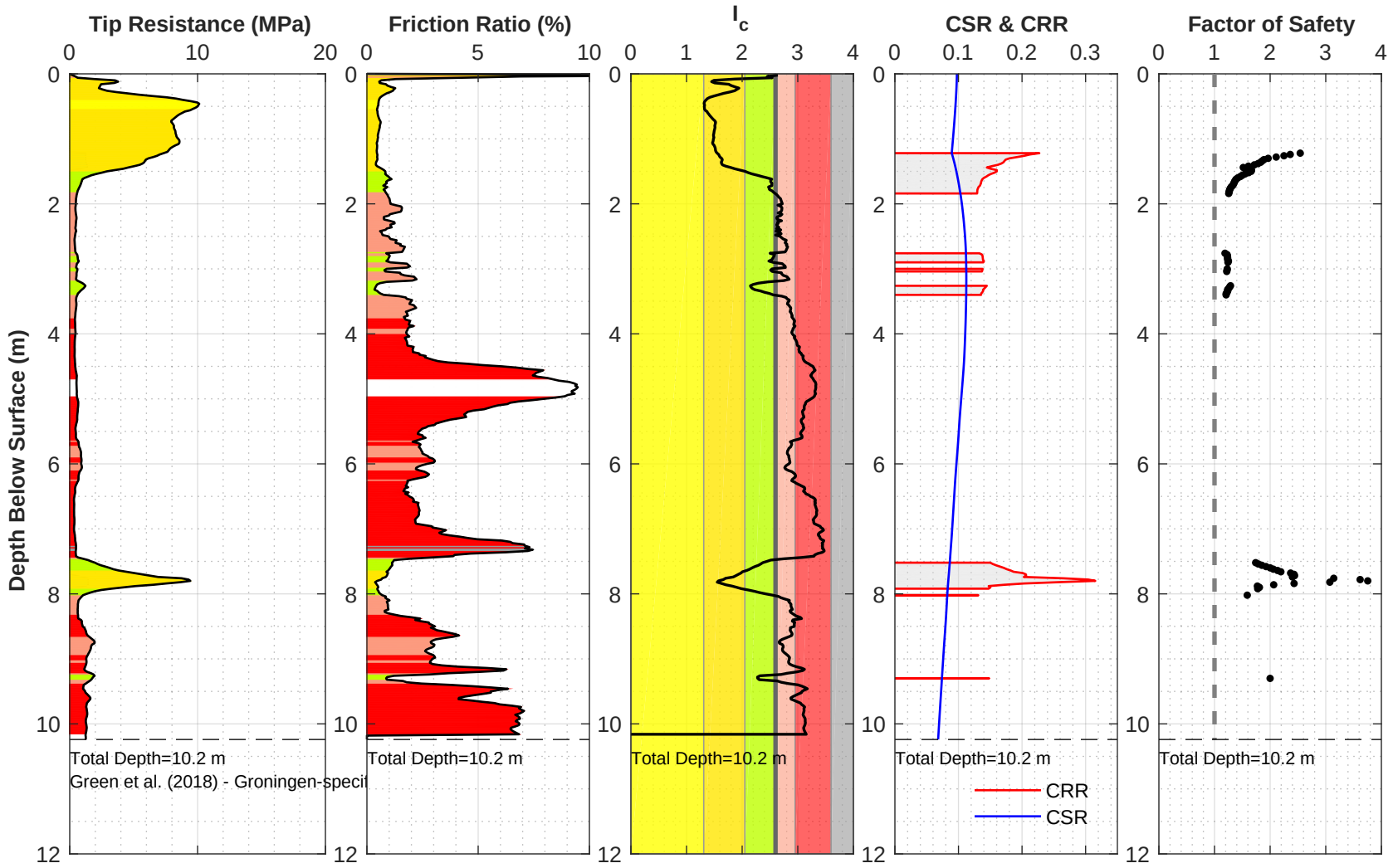
Location: 21225_247_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



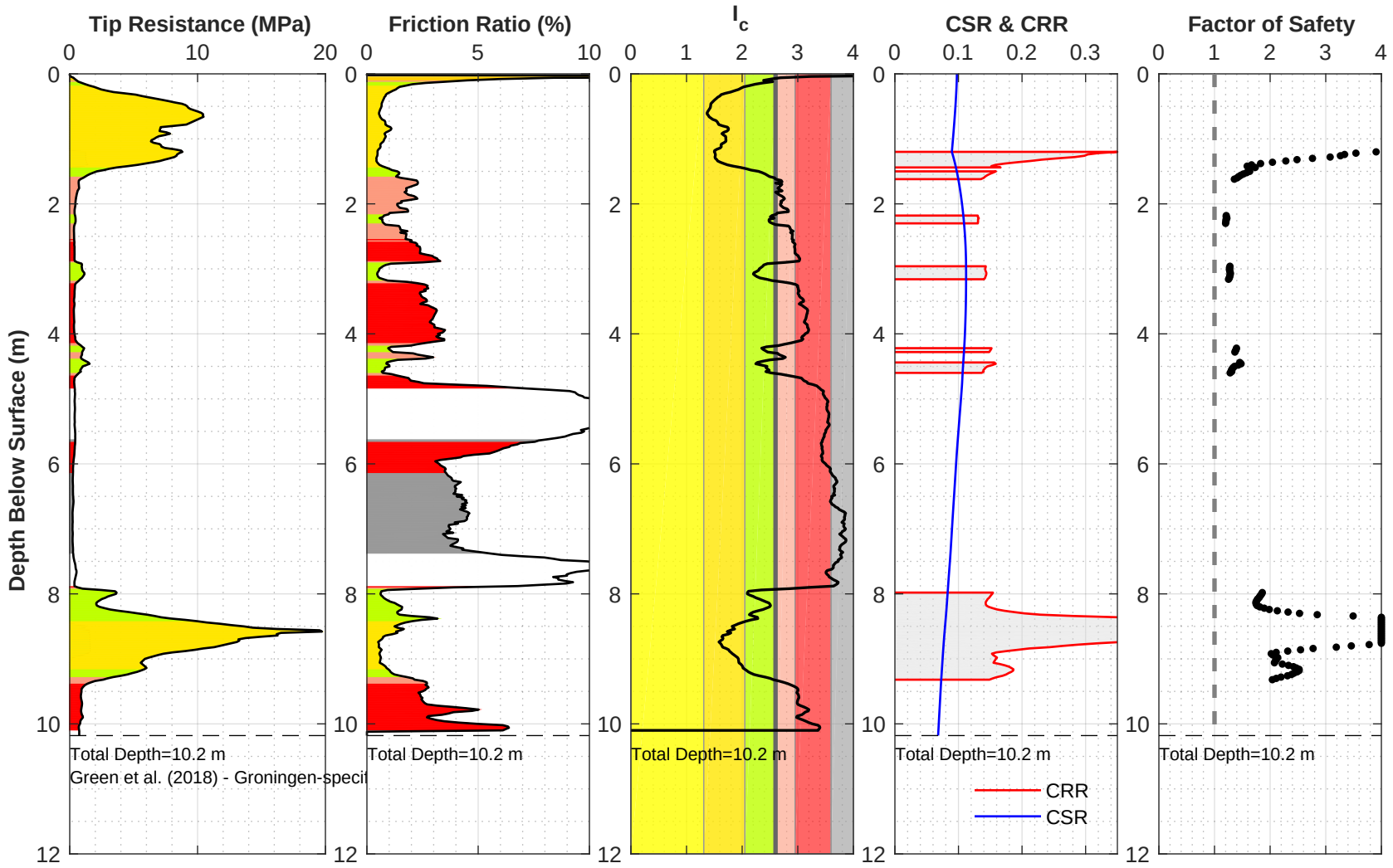
Location: 21225_248_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



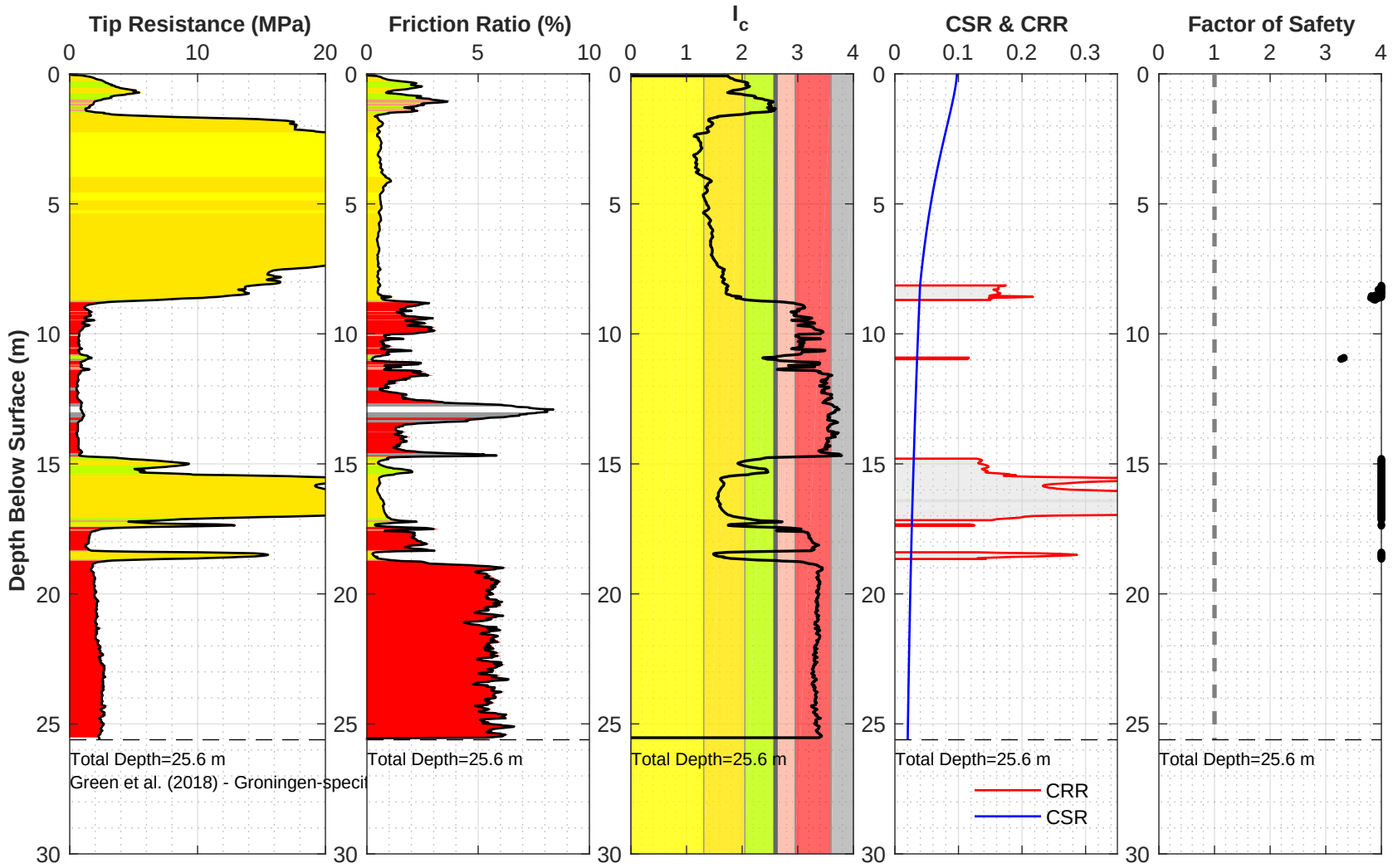
Location: 21225_249_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



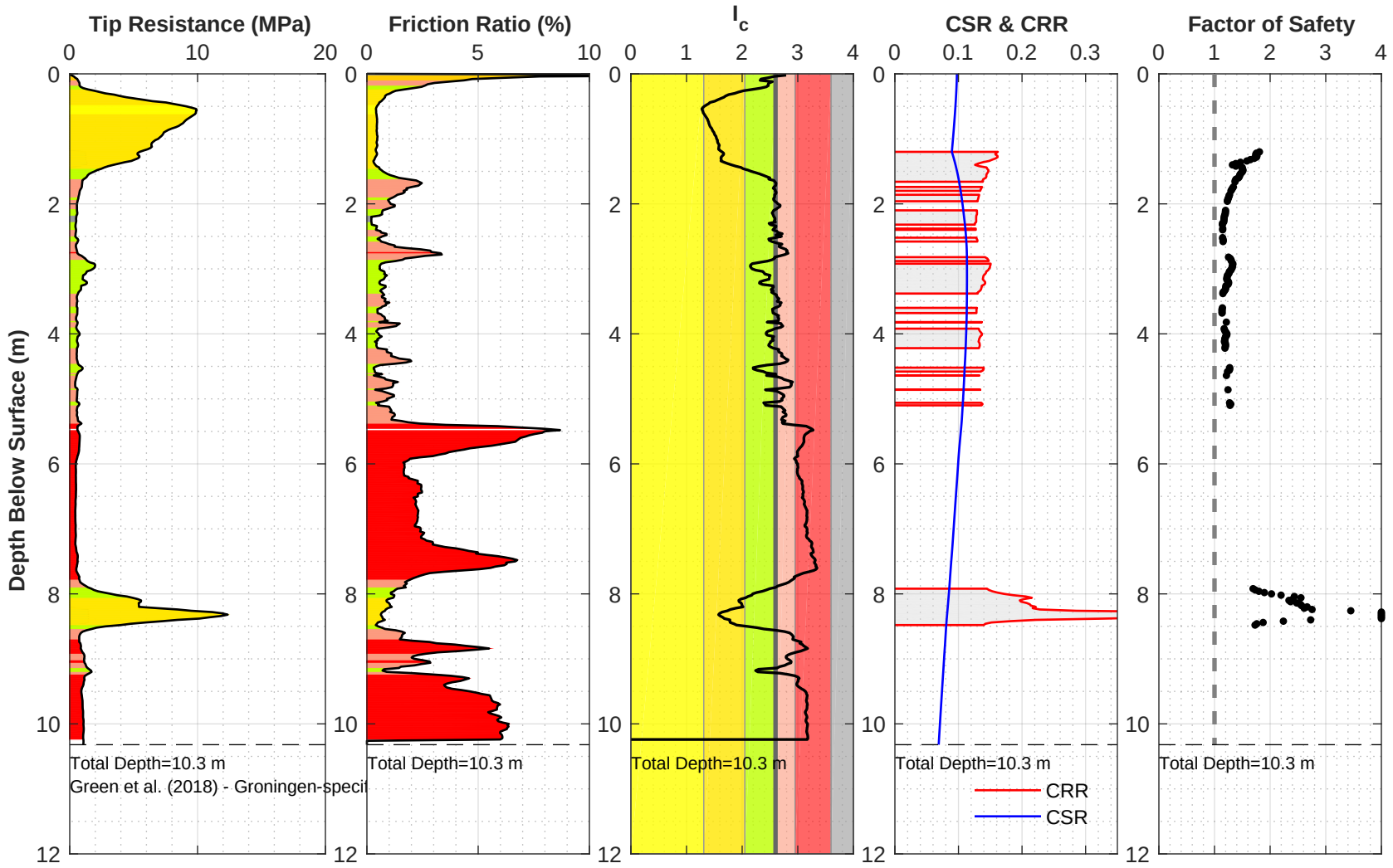
Location: 21225_250_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



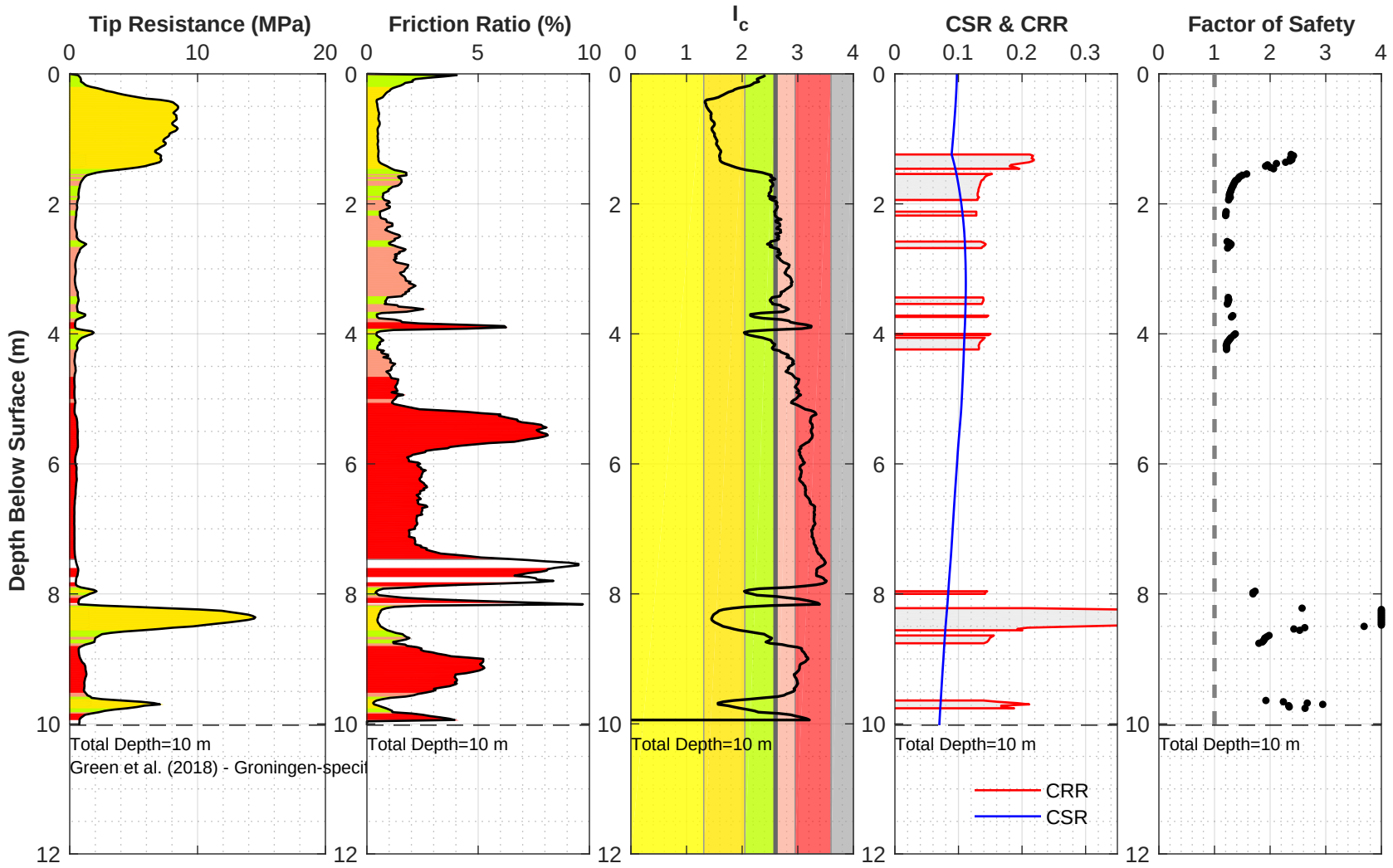
Location: 21225_251_coord
Surface EL: 8.6 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



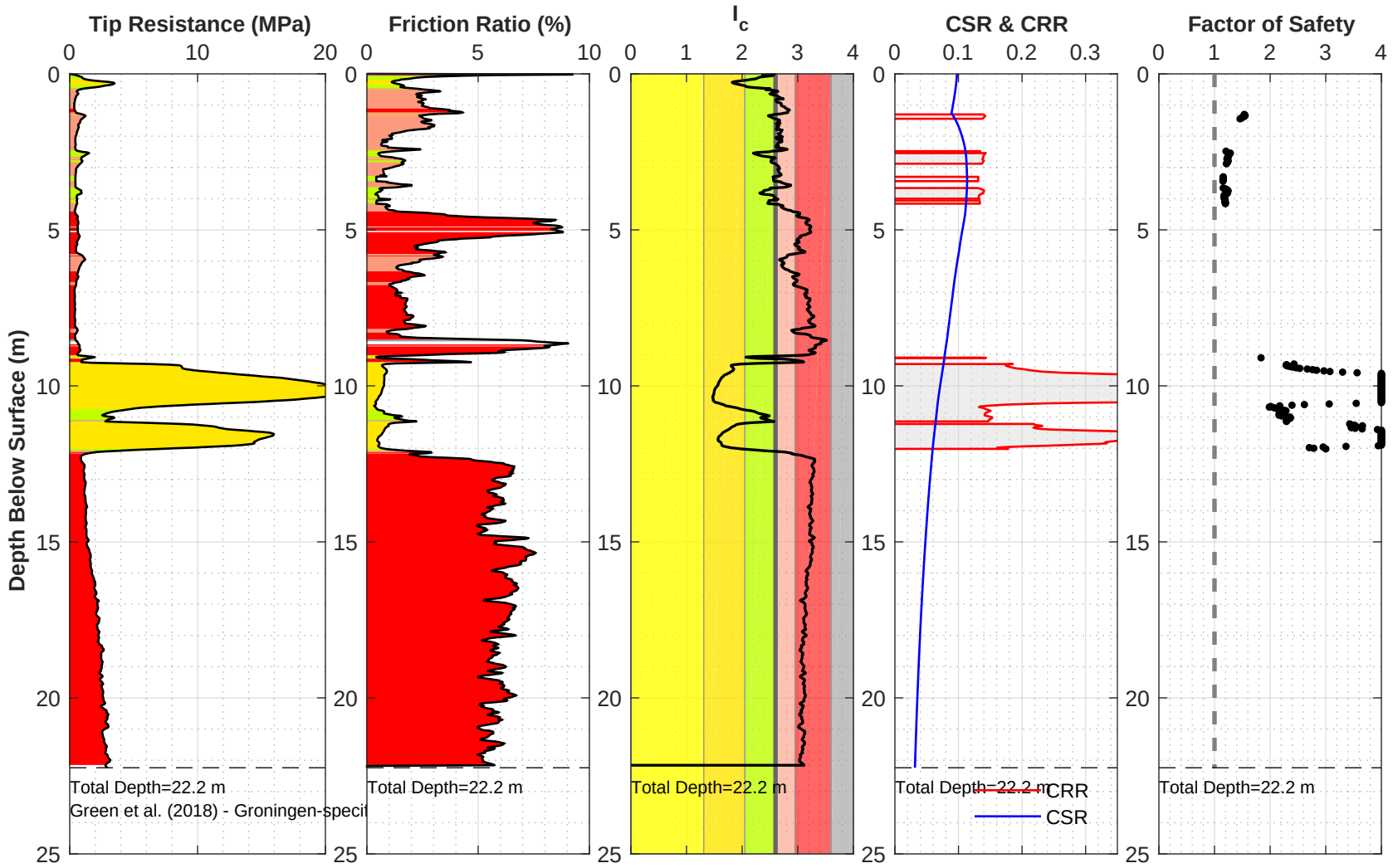
Location: 21225_252_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



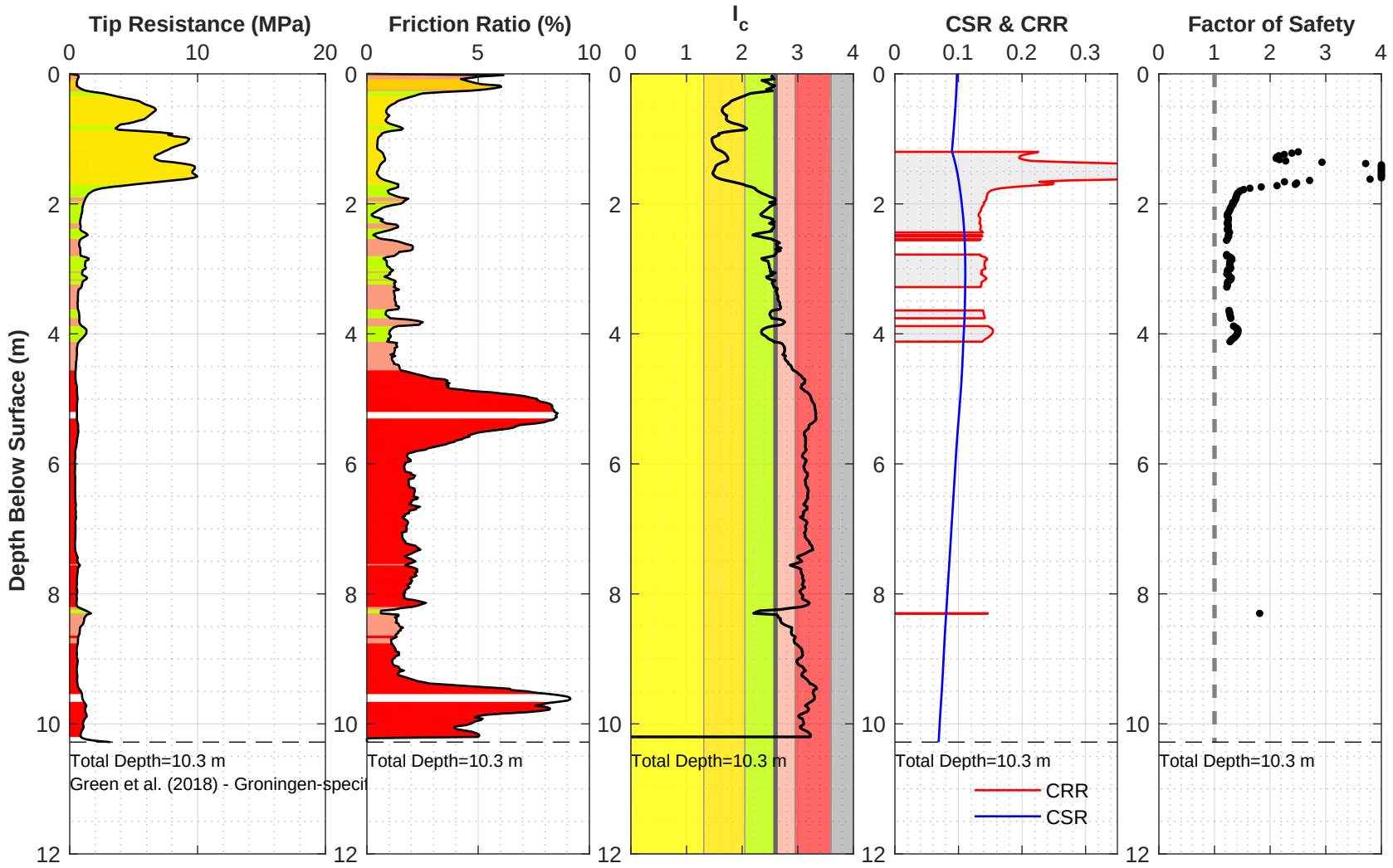
Location: 21225_253_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



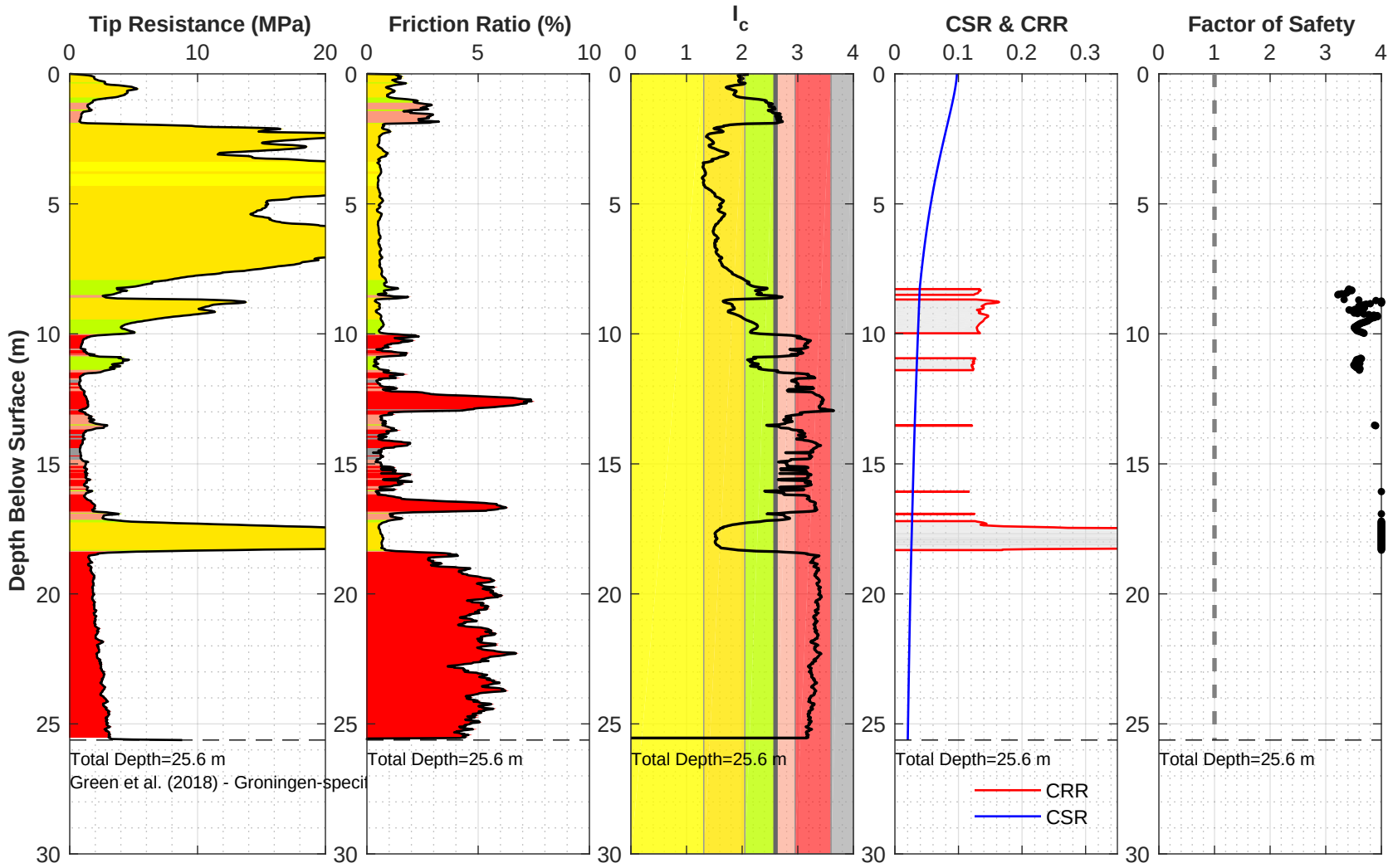
Location: 21225_254_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



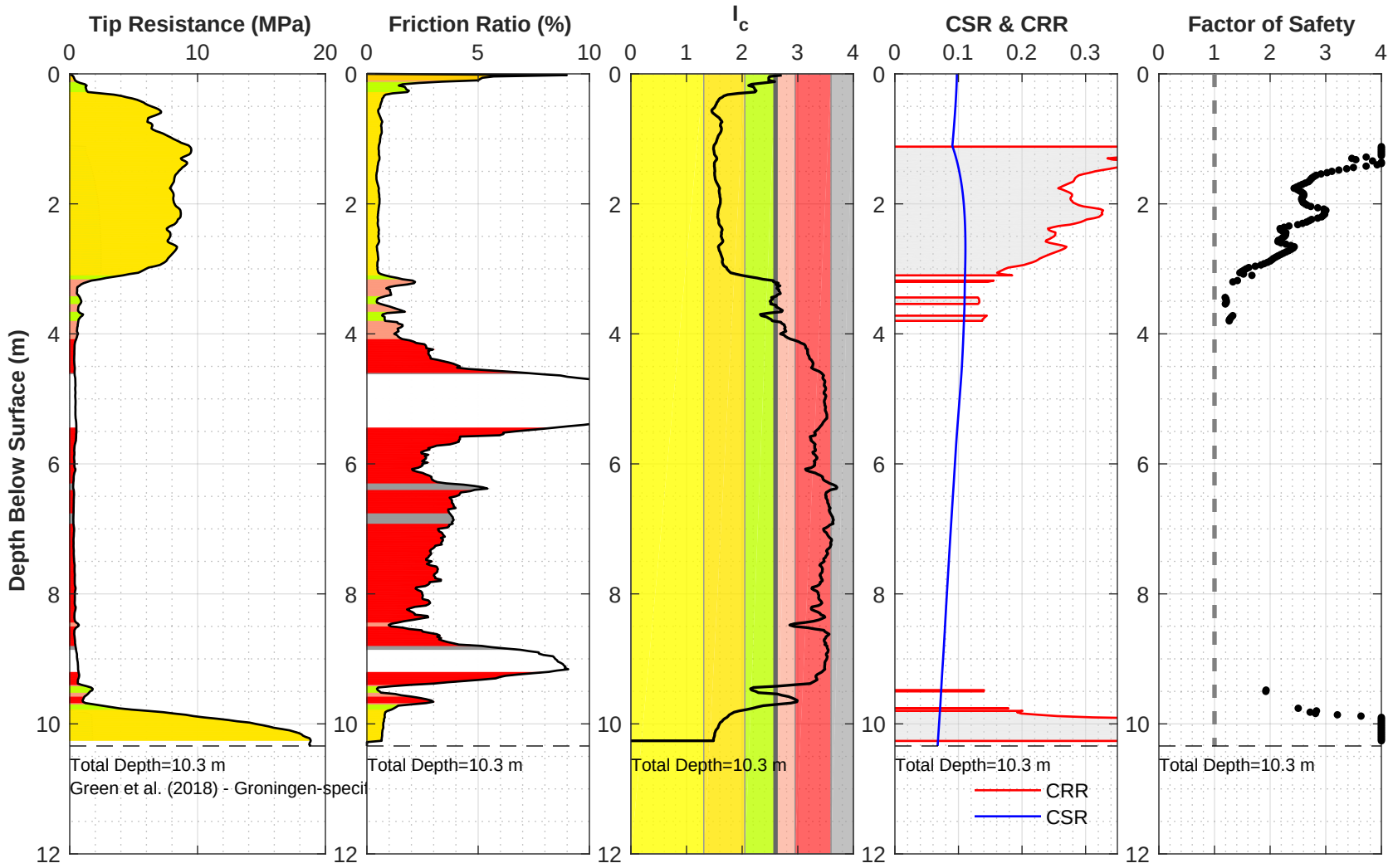
Location: 21225_255_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



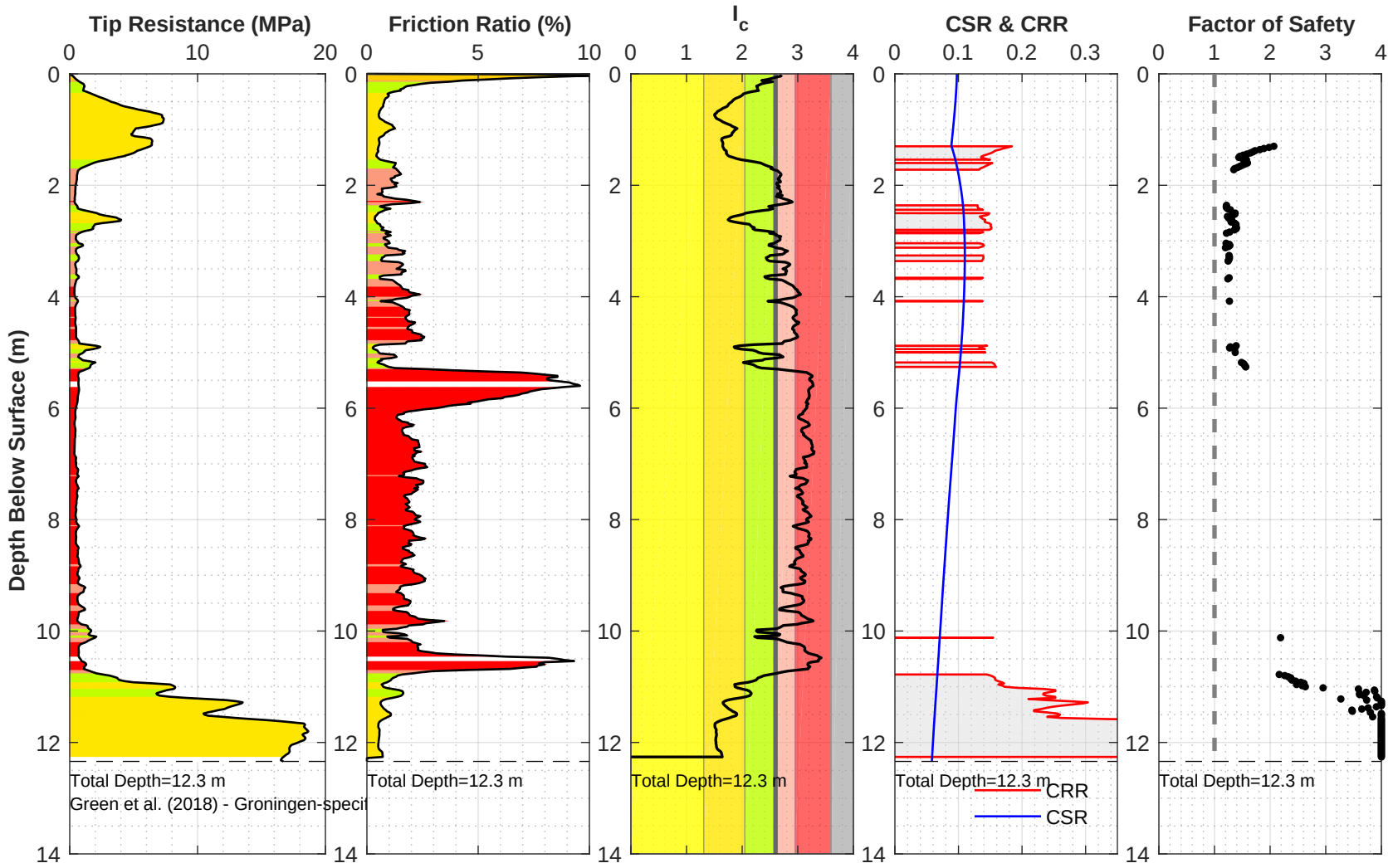
Location: 21225_256_coord
Surface EL: 8.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



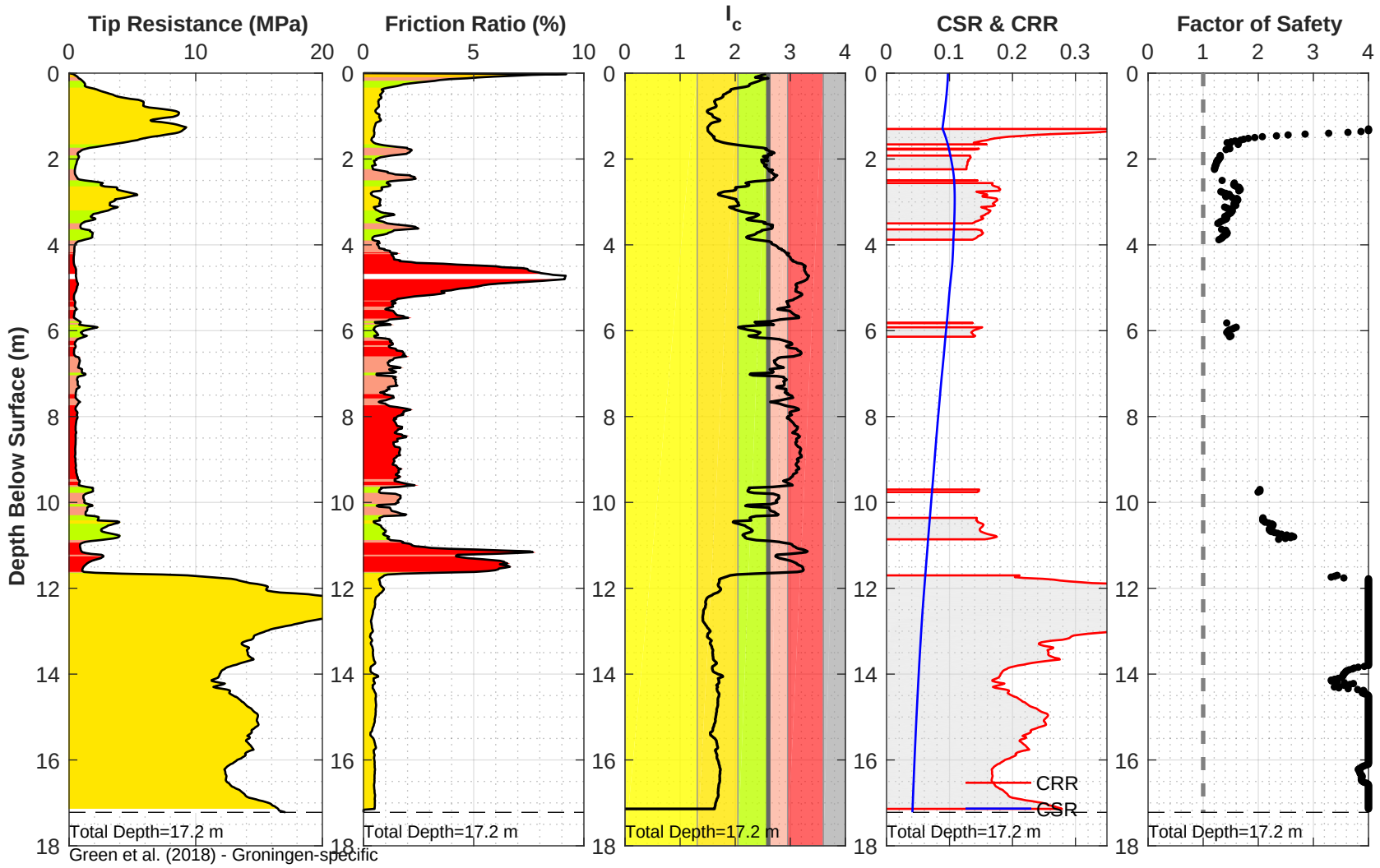
Location: 21225_257_coord
Surface EL: 1.6 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



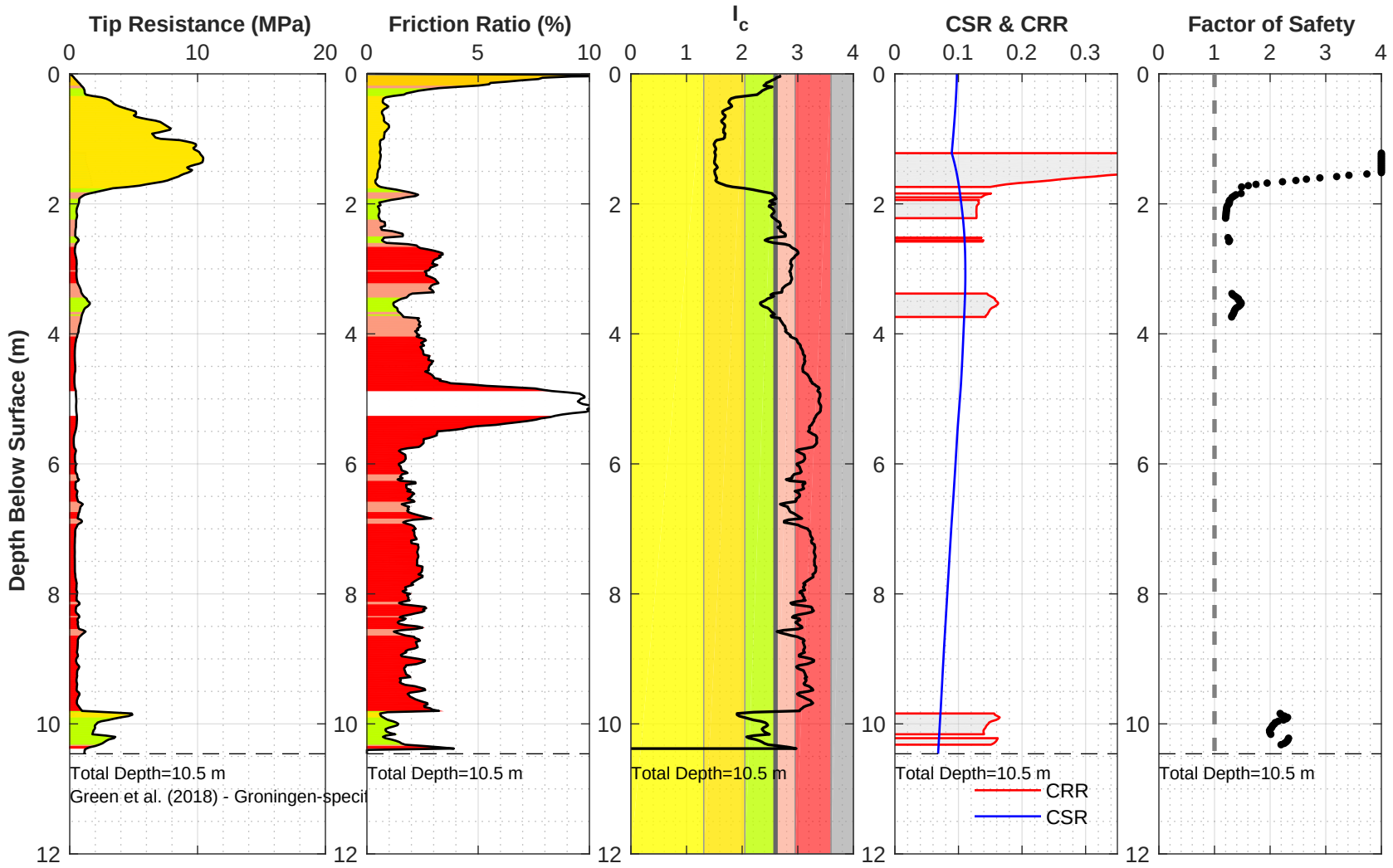
Location: 21225_258_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



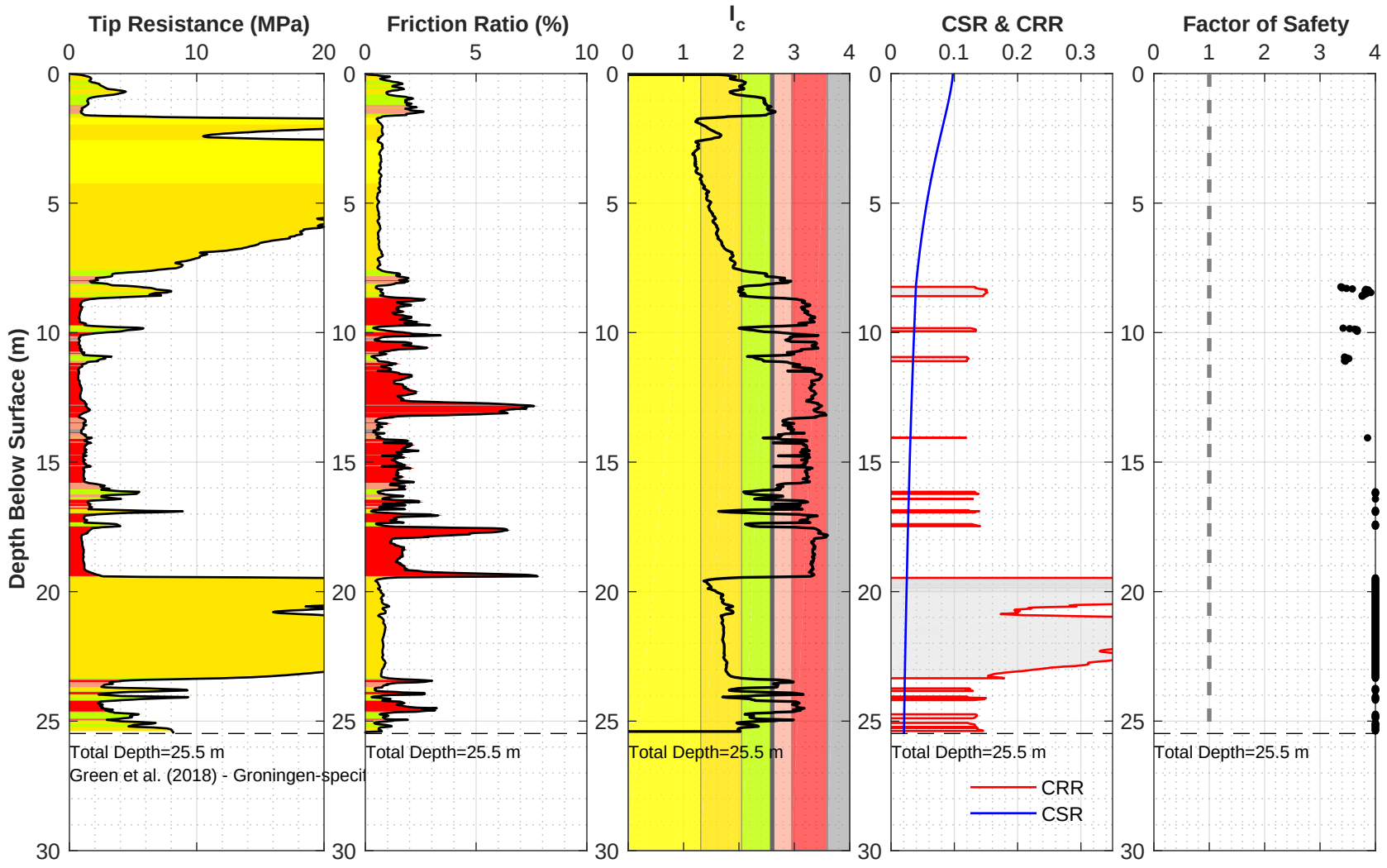
Location: 21225_259_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



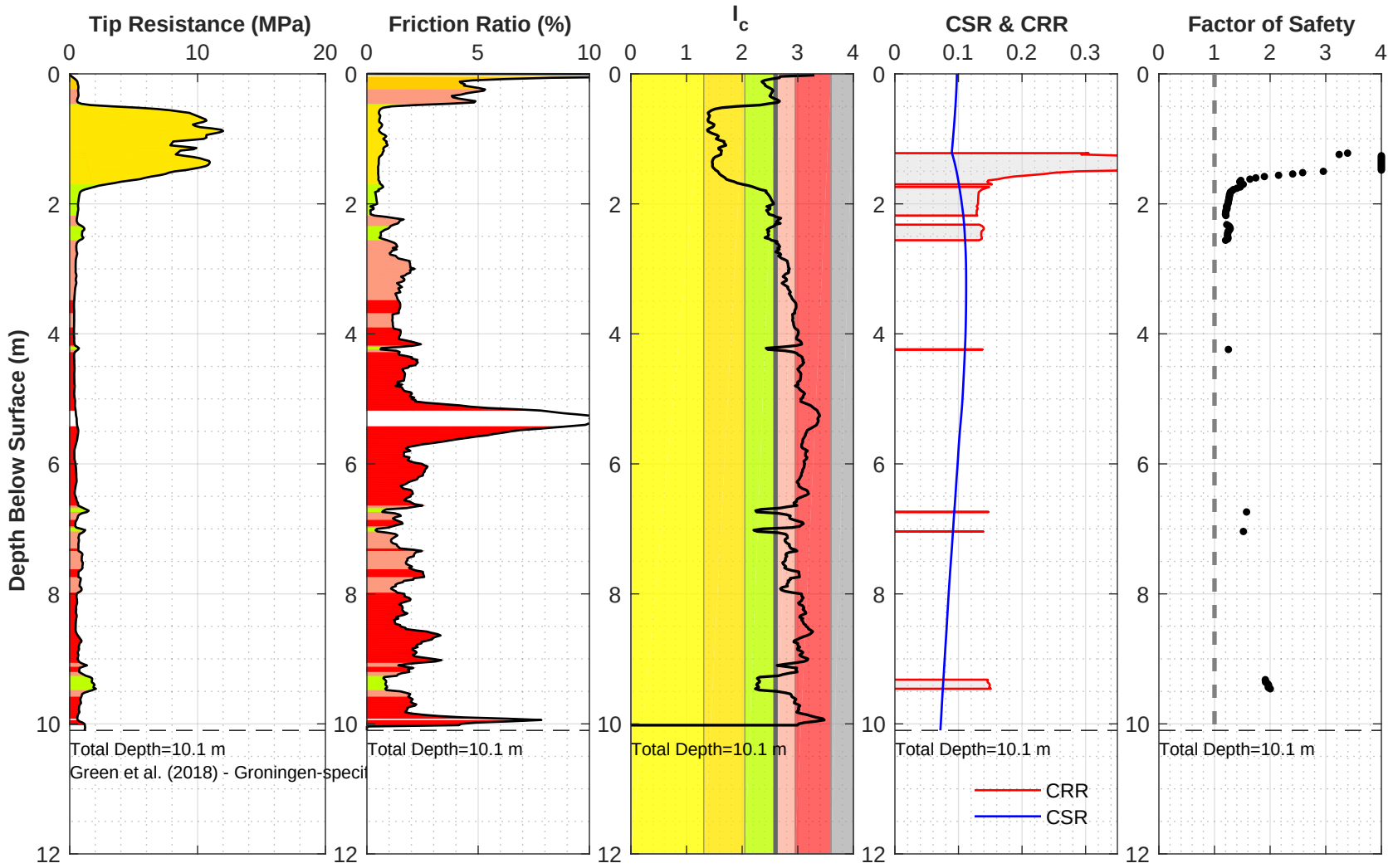
Location: 21225_260_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



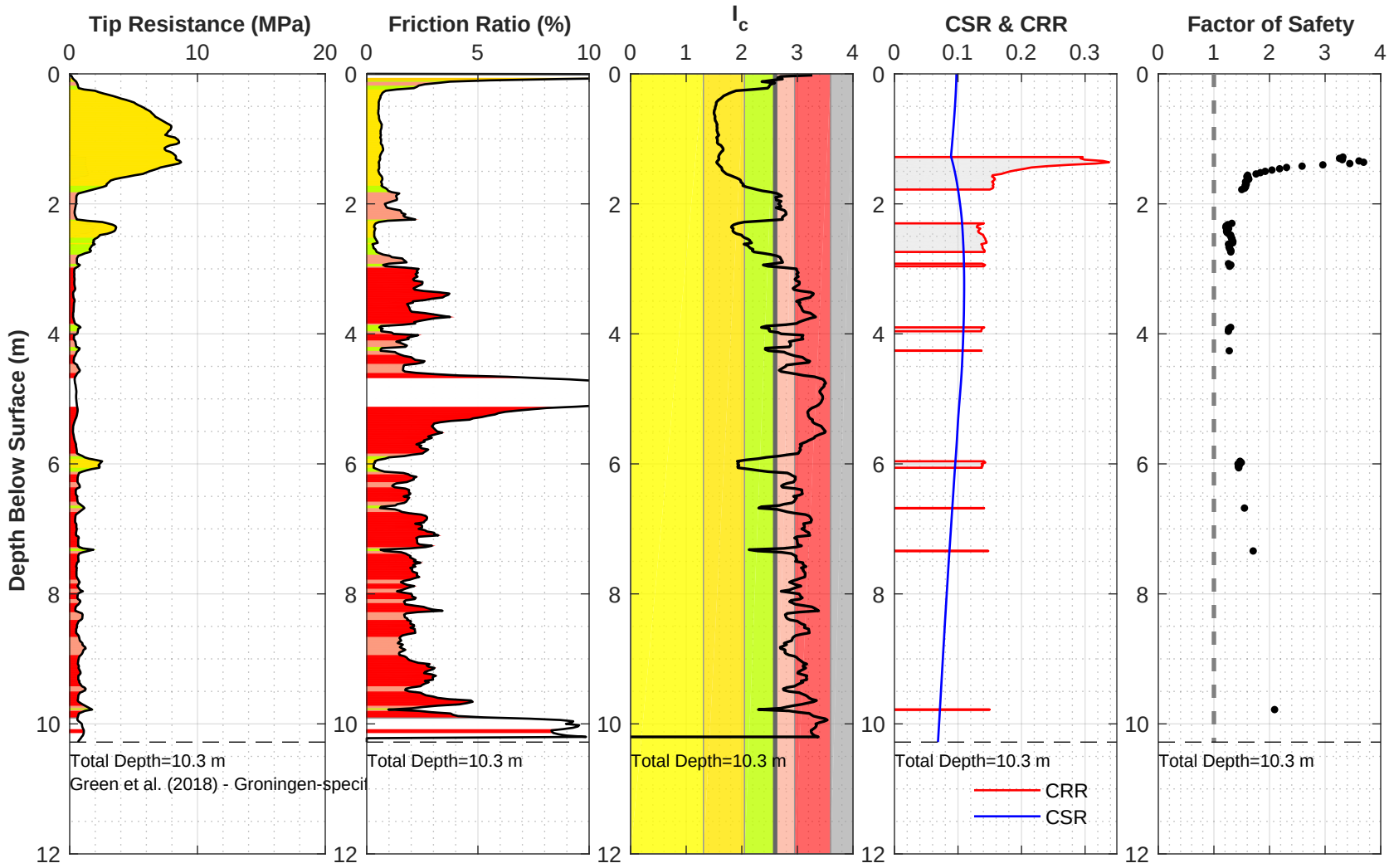
Location: 21225_261_coord
Surface EL: 8.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



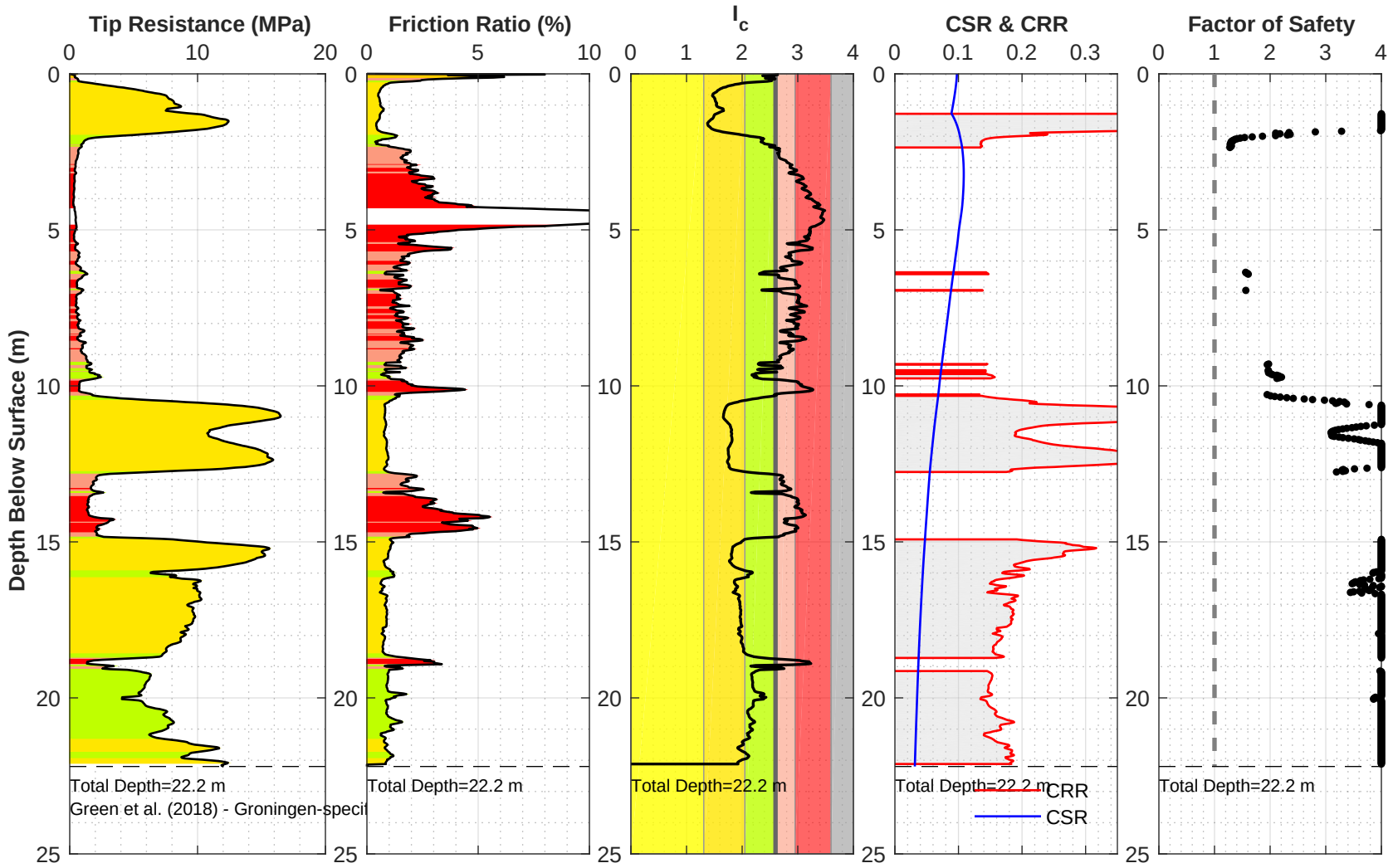
Location: 21225_262_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



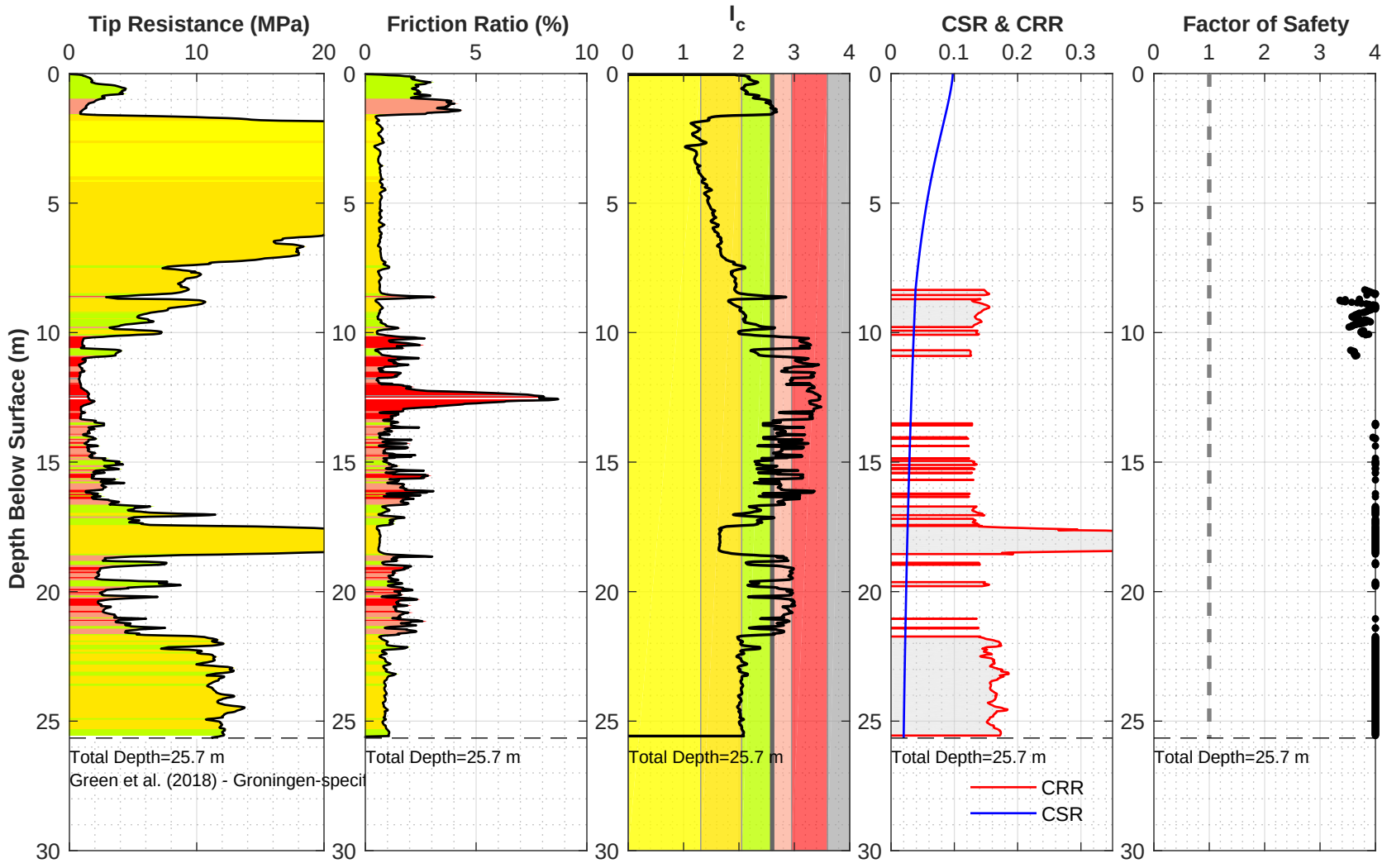
Location: 21225_263_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



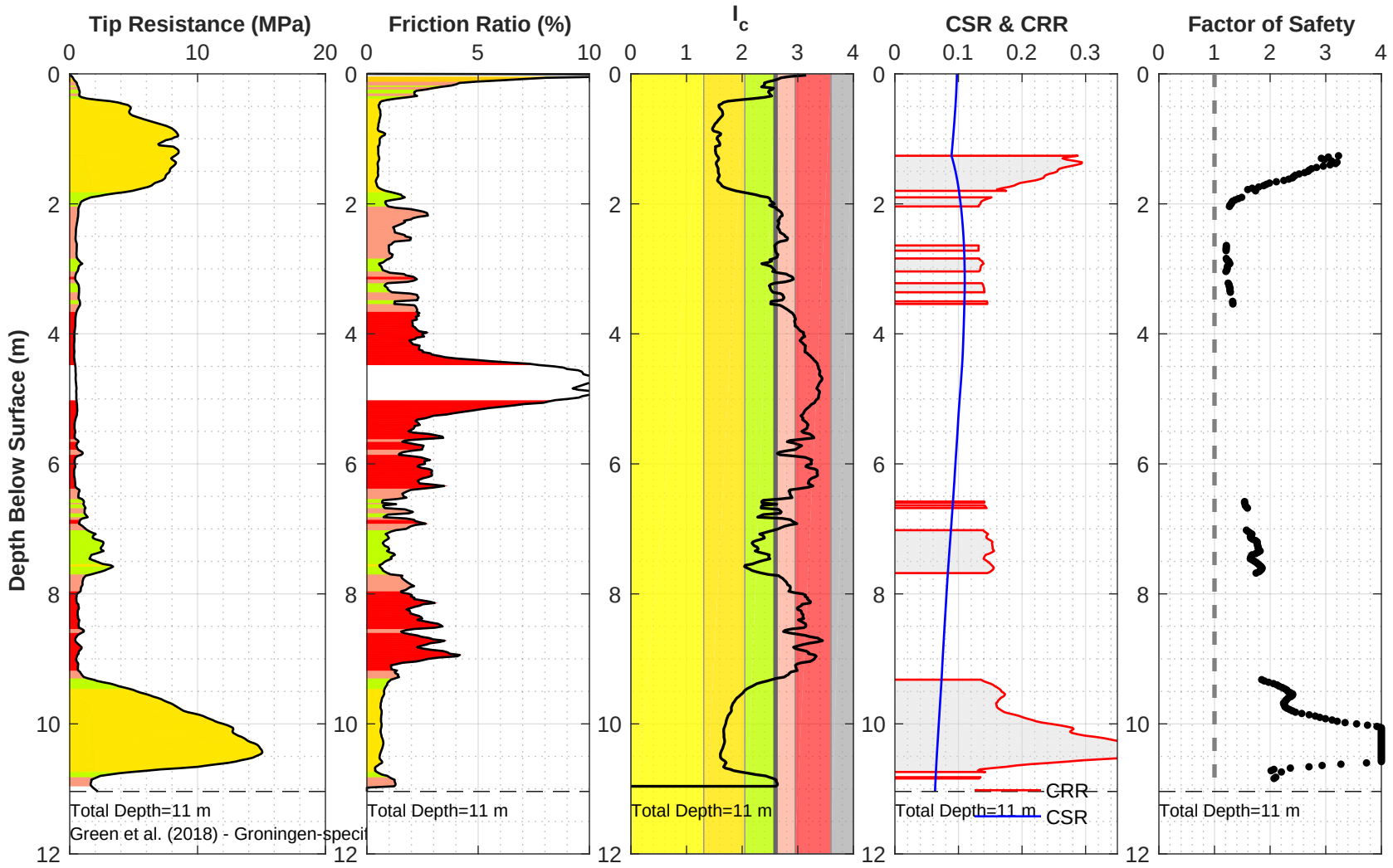
Location: 21225_264_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



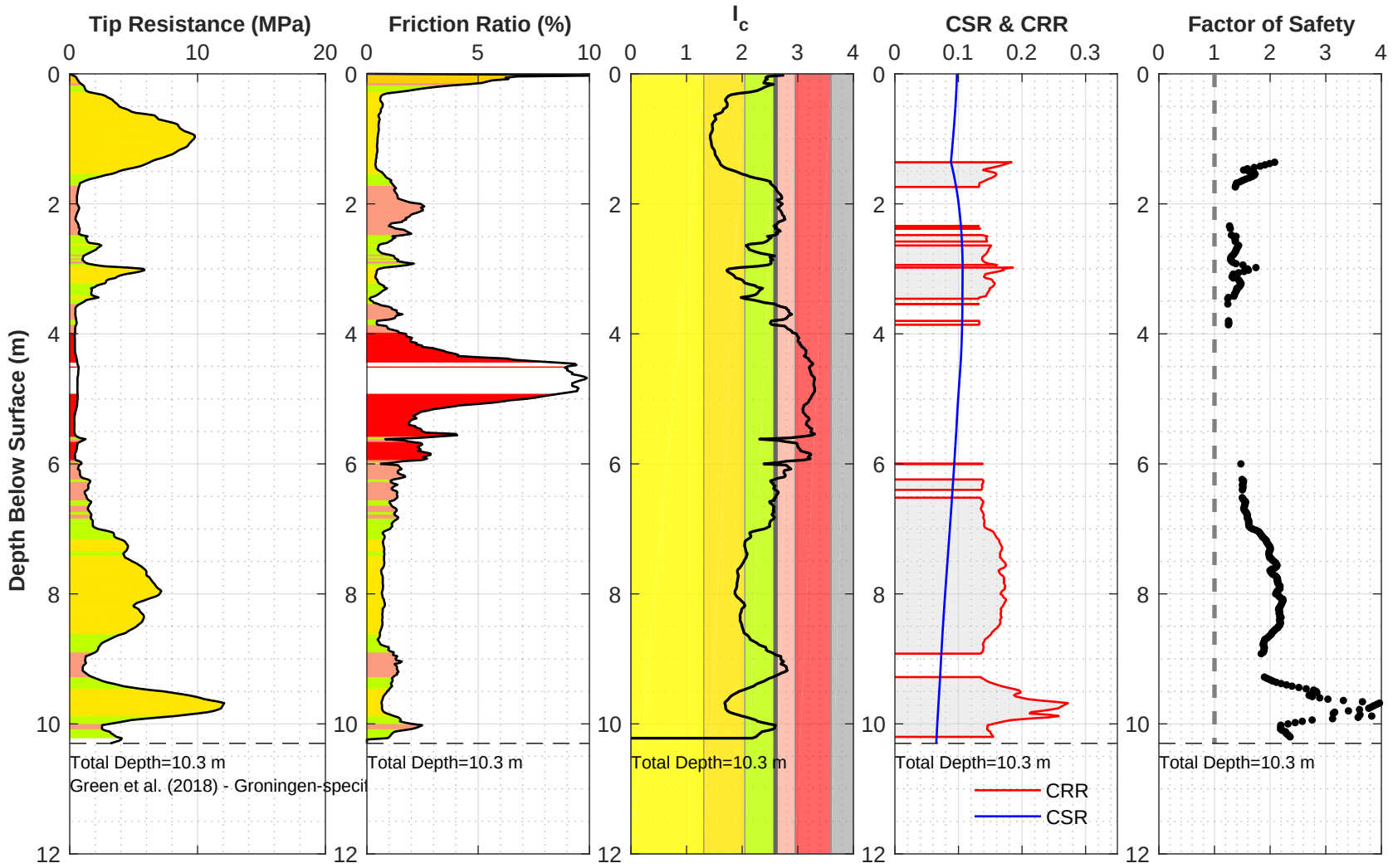
Location: 21225_265_coord
Surface EL: 8.9 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



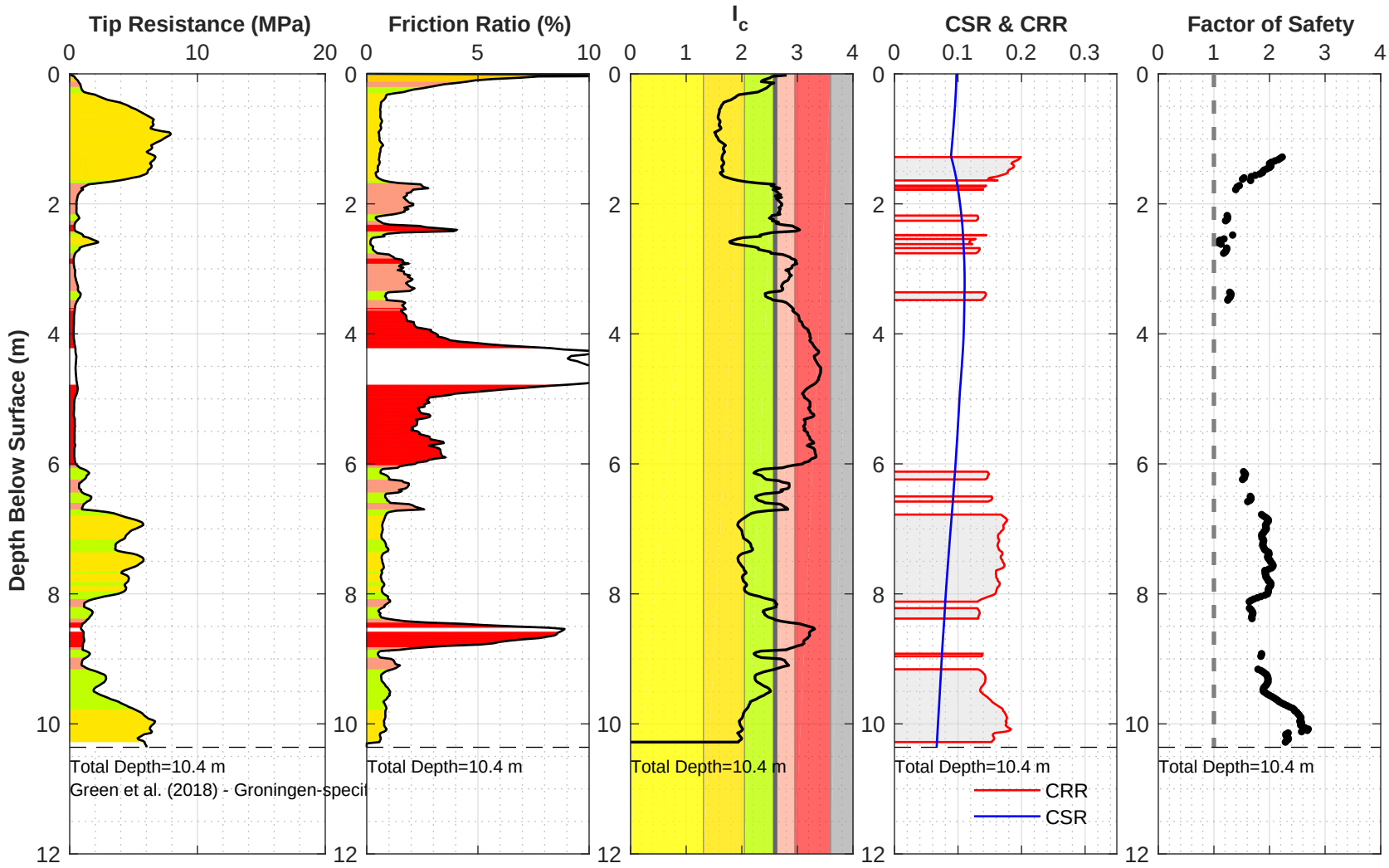
Location: 21225_266_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



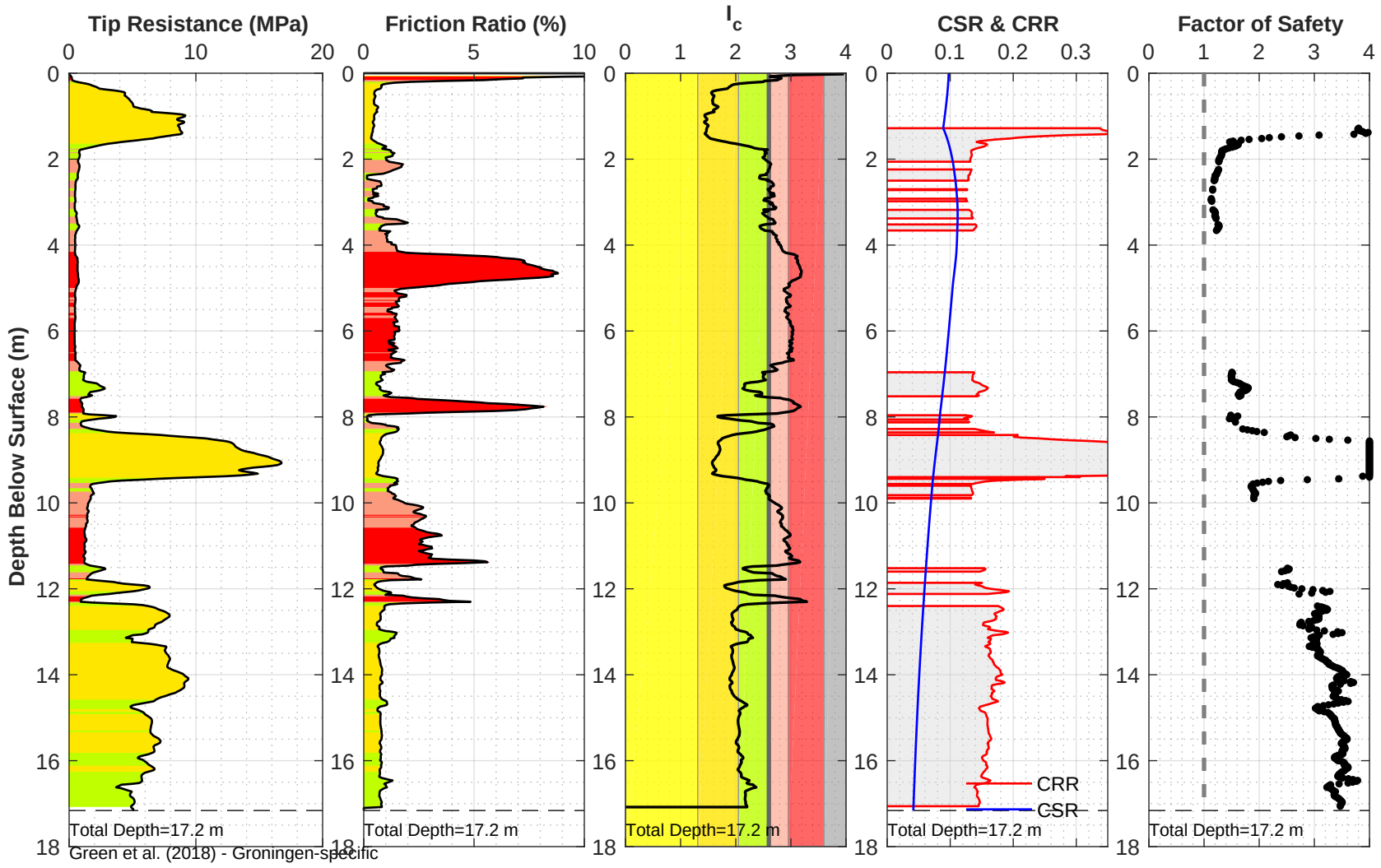
Location: 21225_267_coord
Surface EL: 1.9 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



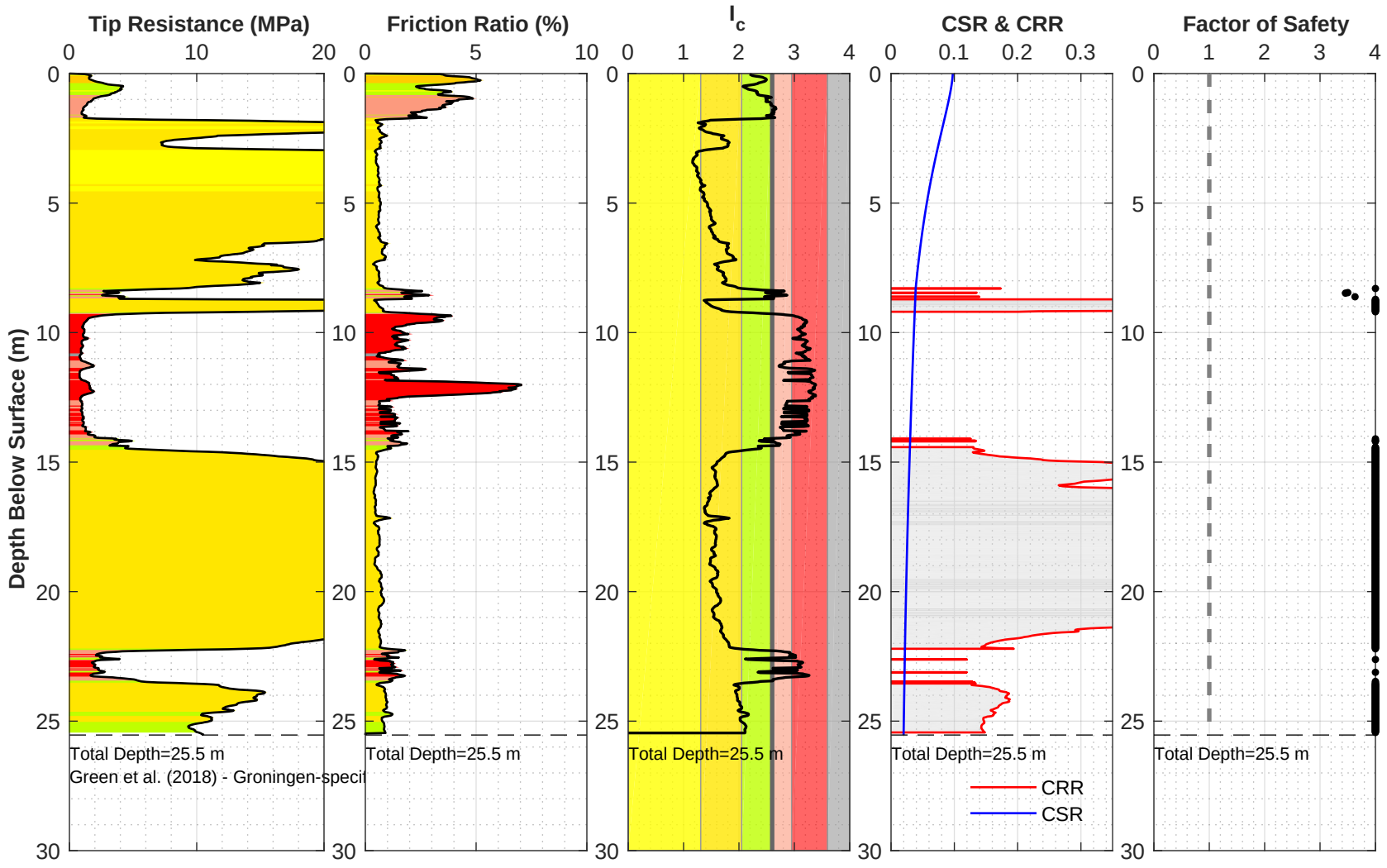
Location: 21225_268_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



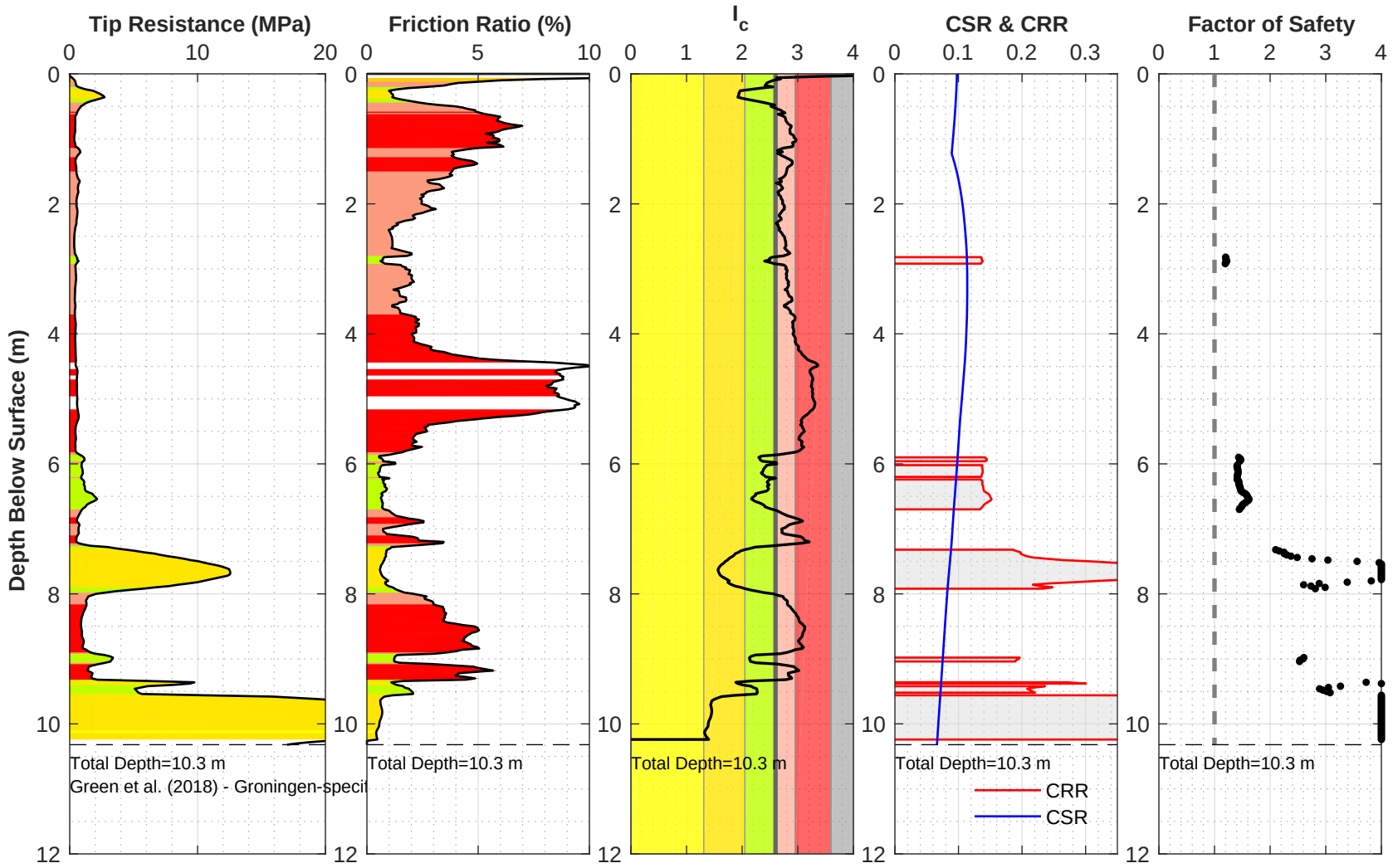
Location: 21225_269_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



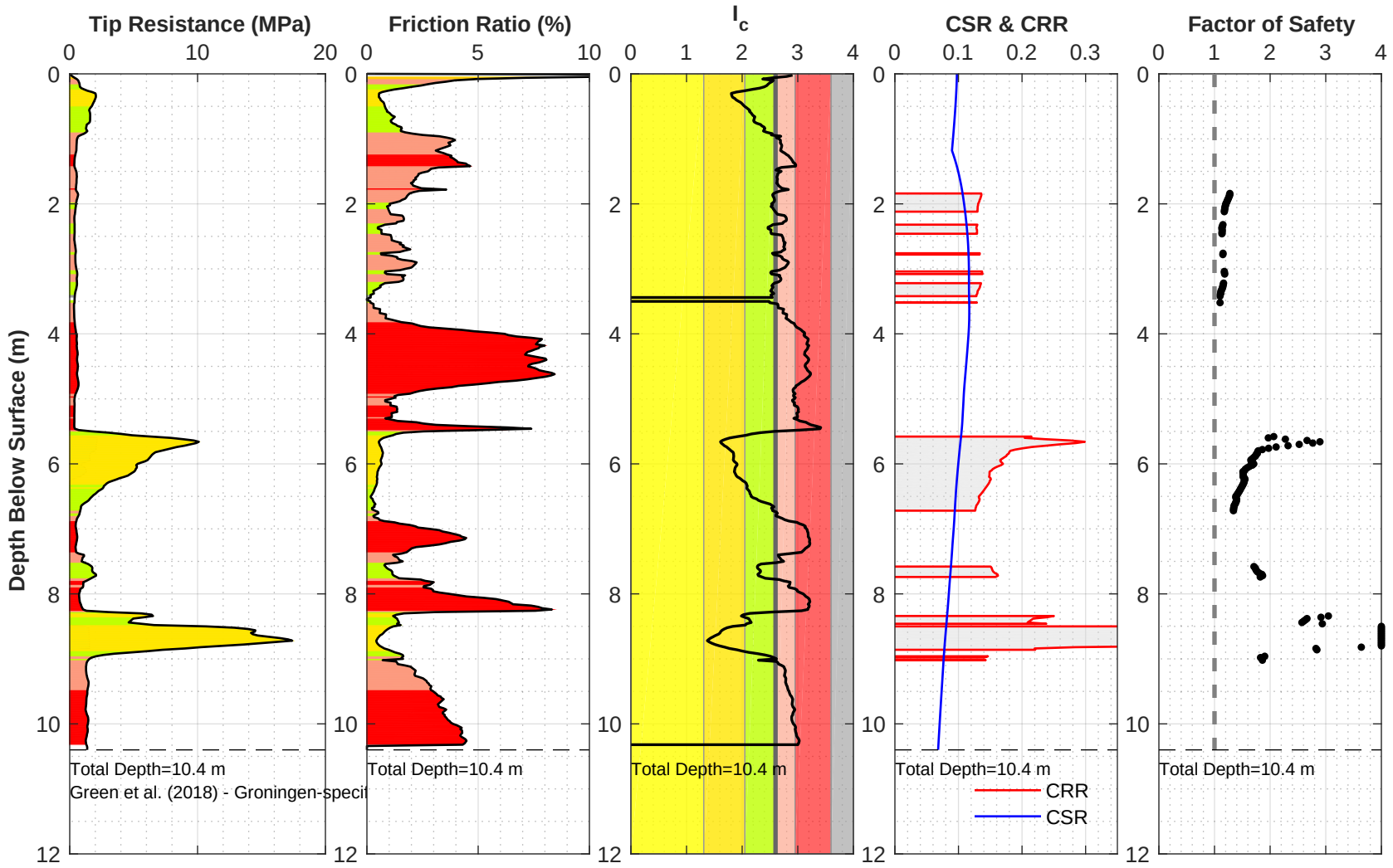
Location: 21225_270_coord
Surface EL: 8.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



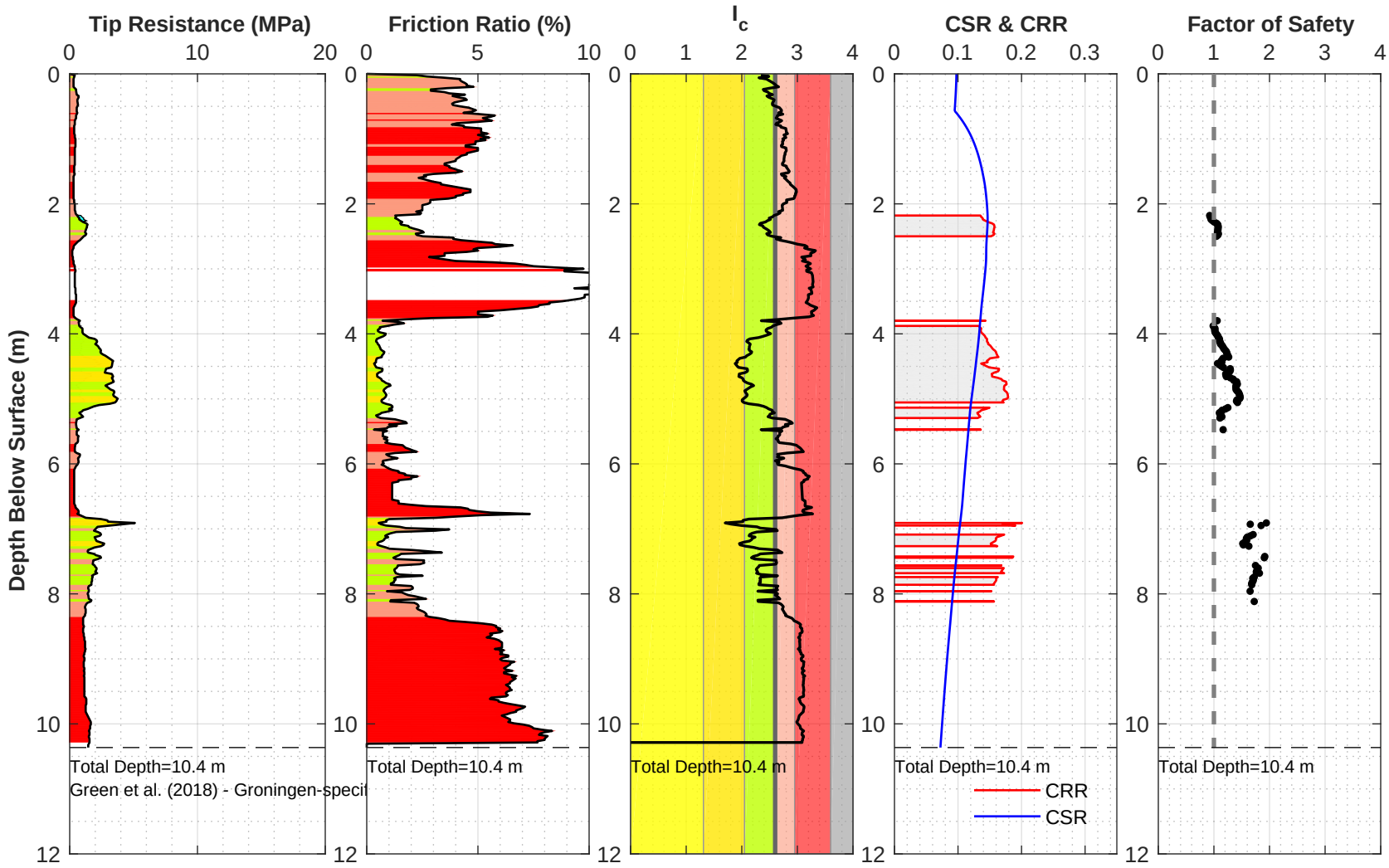
Location: 21225_271_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



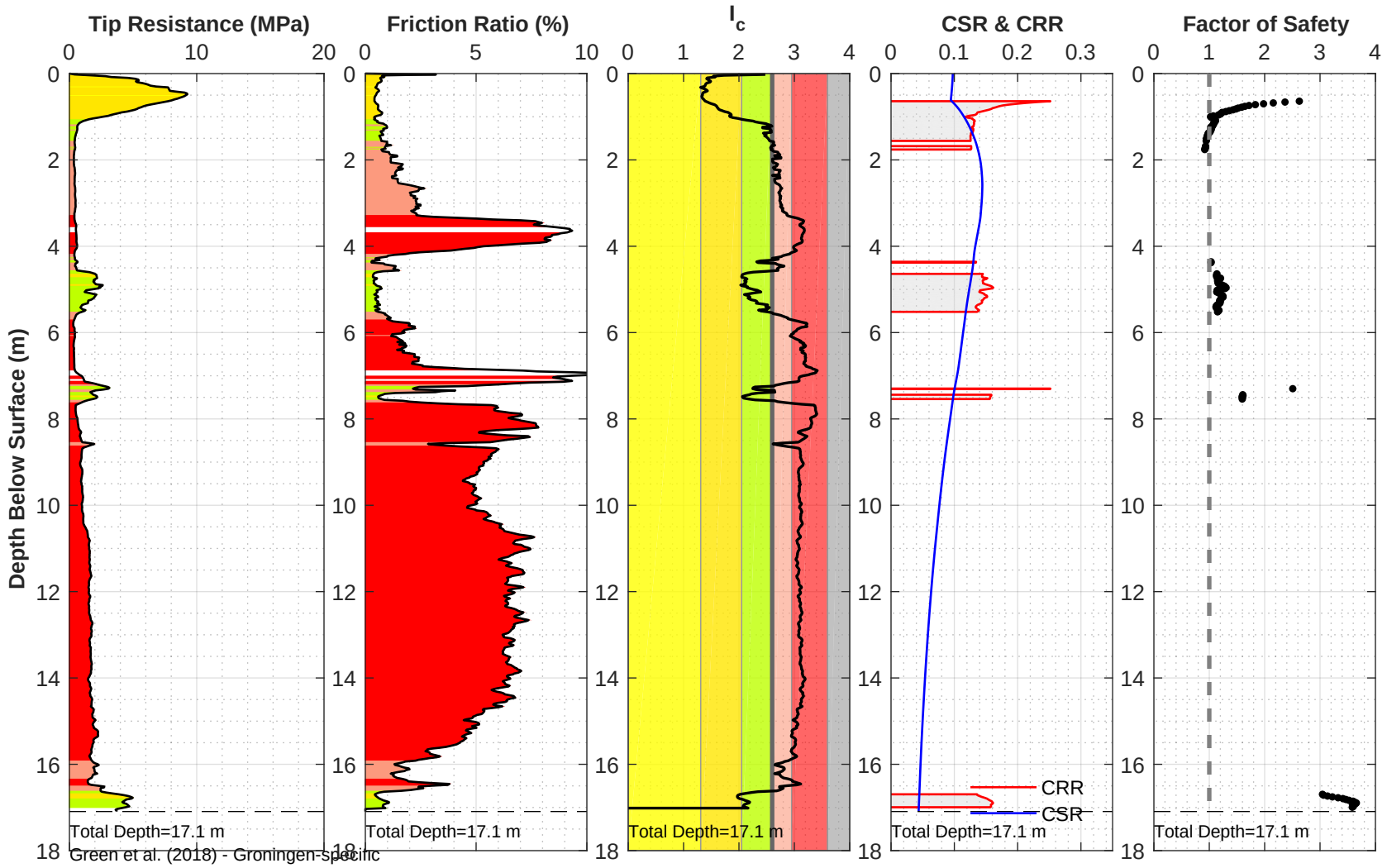
Location: 21225_272_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



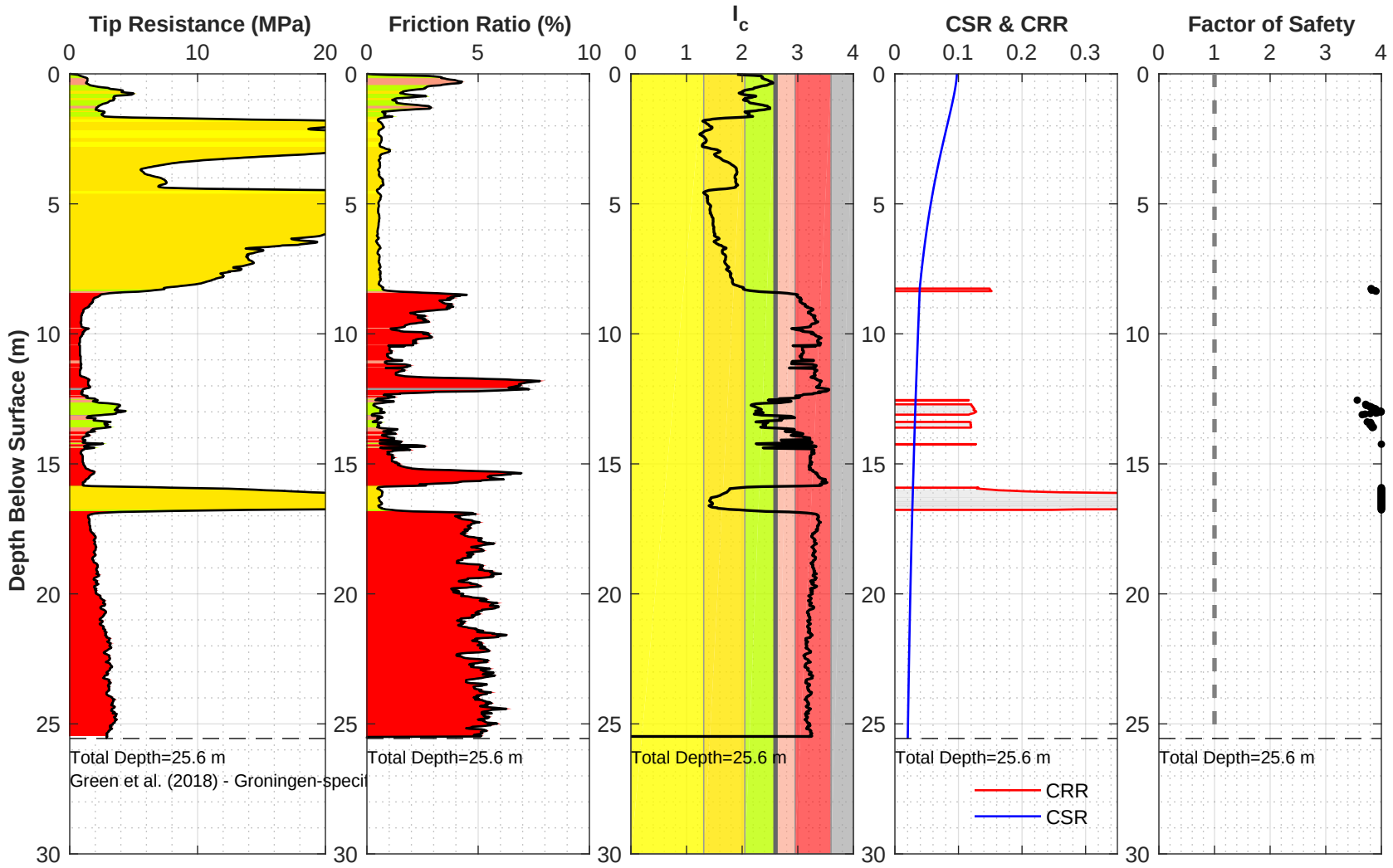
Location: 21225_273_coord
Surface EL: 1.1 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



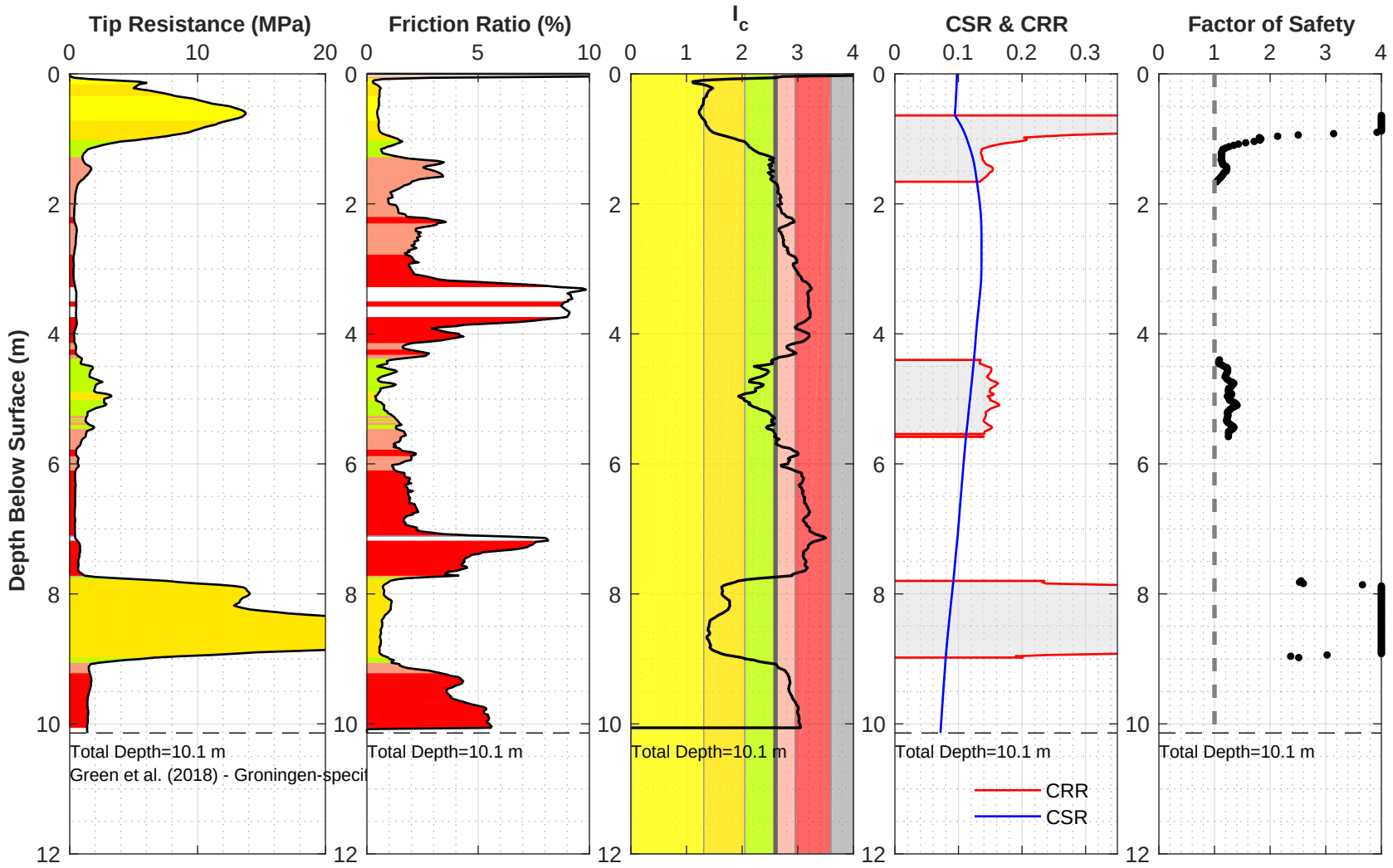
Location: 21225_274_coord
Surface EL: 1.1 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



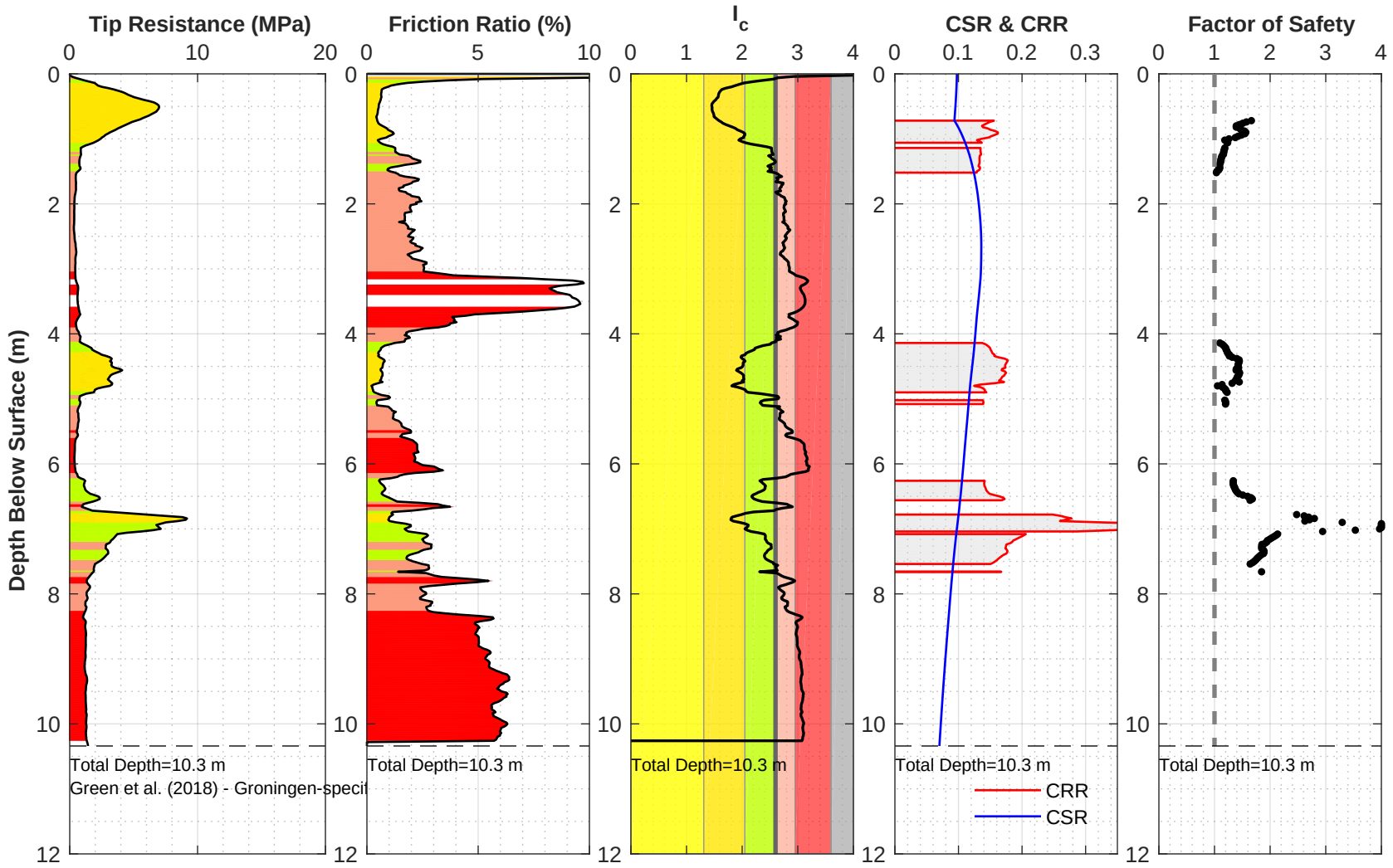
Location: 21225_275_coord
Surface EL: 8.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



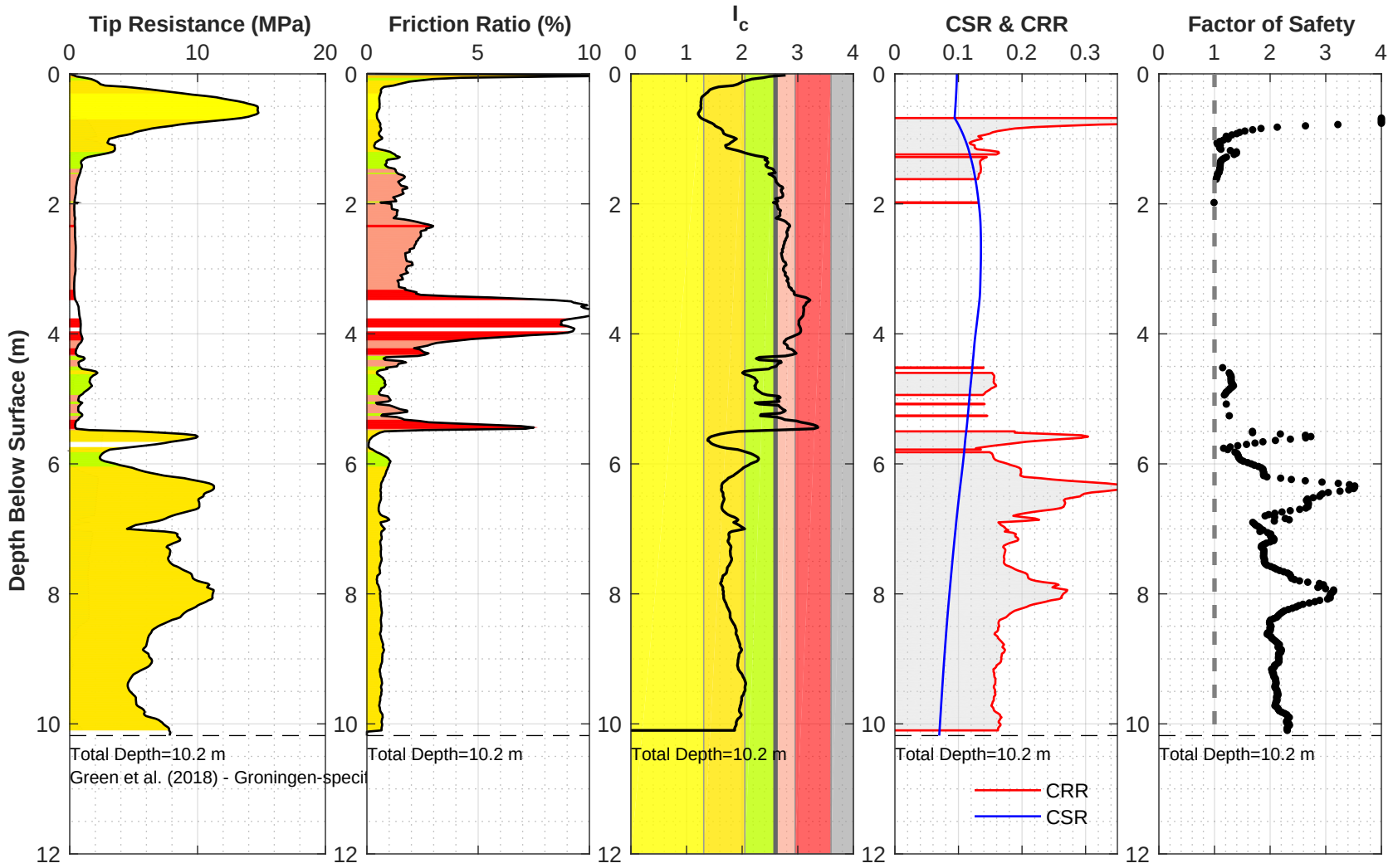
Location: 21225_276_coord
Surface EL: 1.1 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



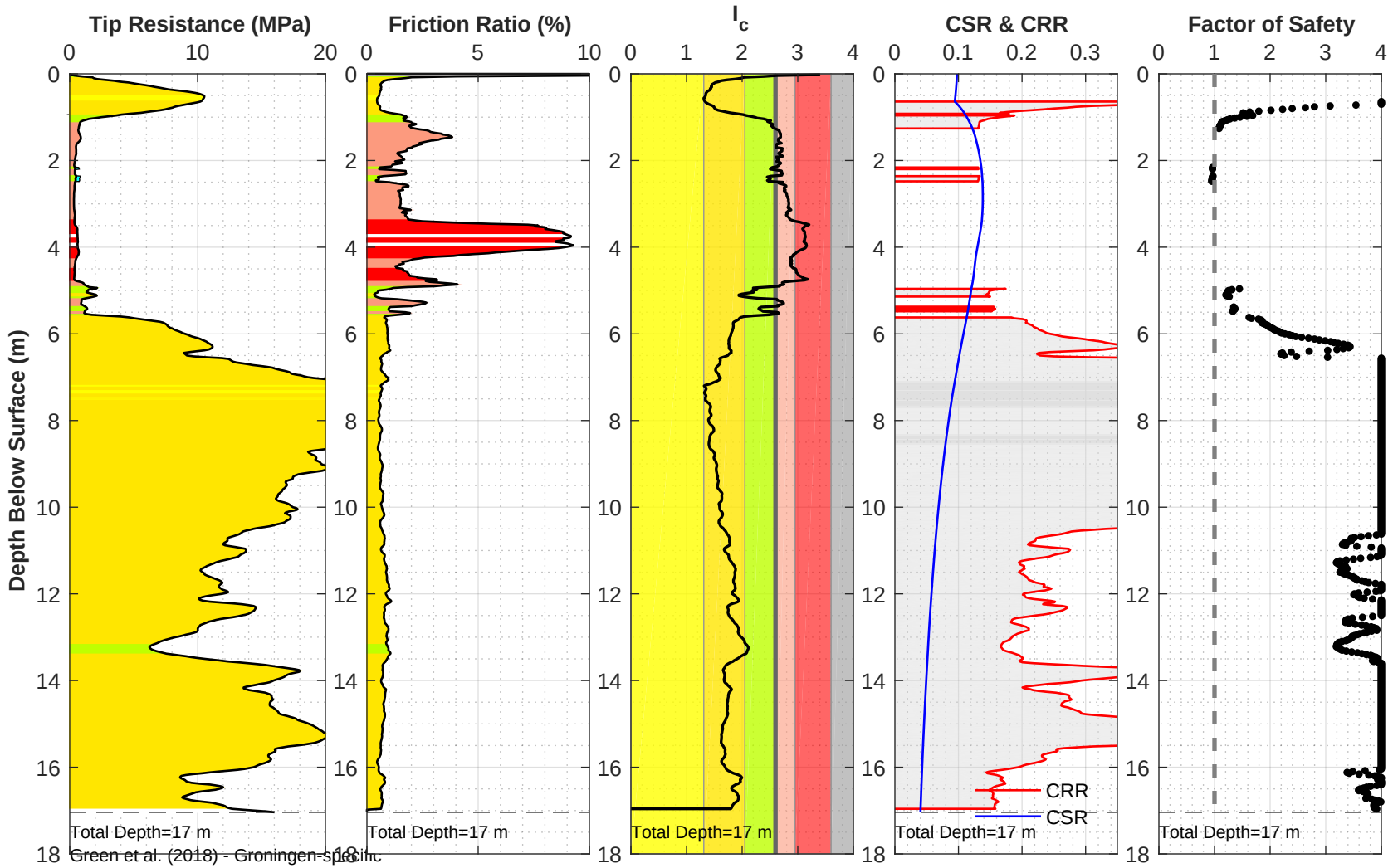
Location: 21225_277_coord
Surface EL: 1.2 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



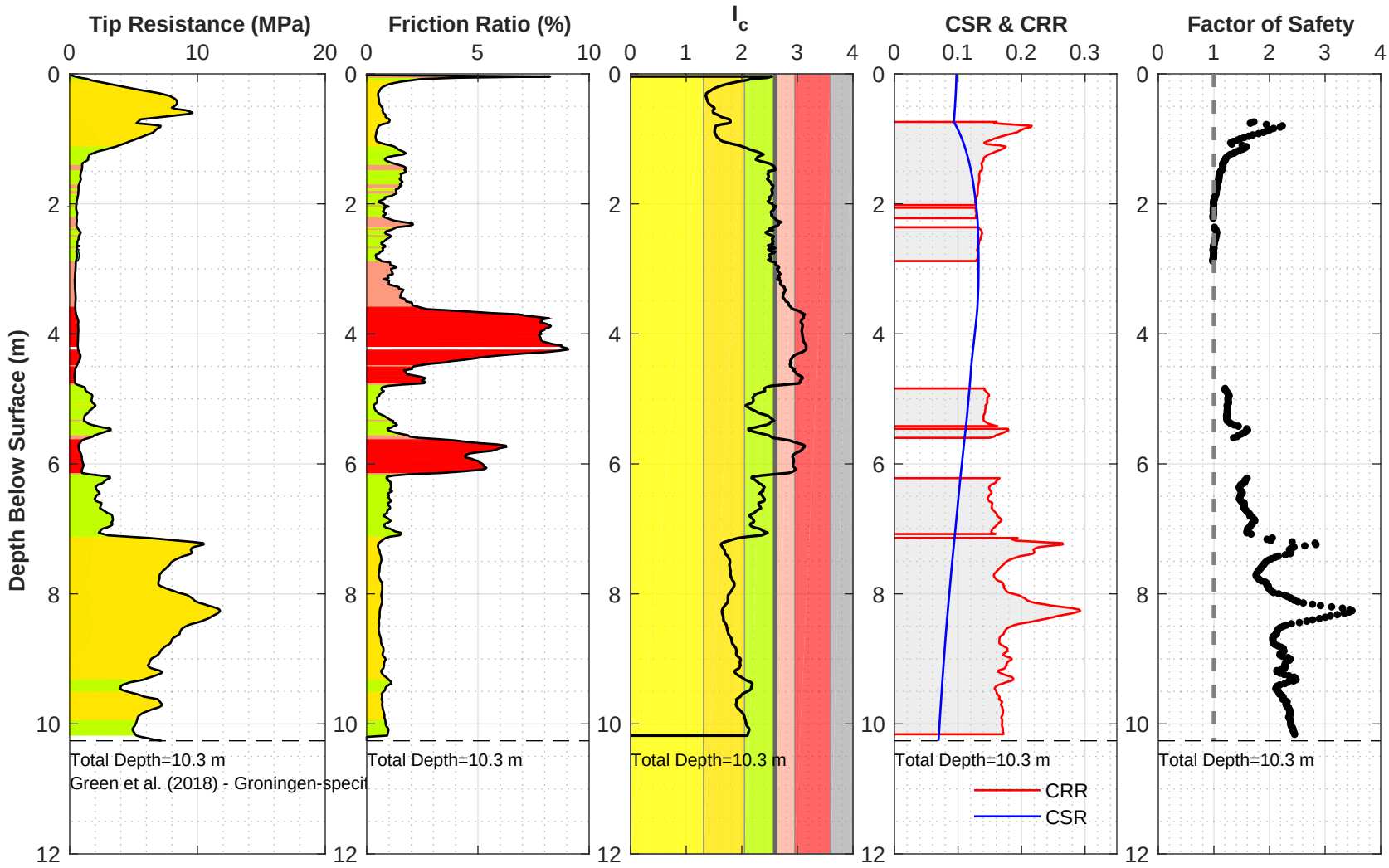
Location: 21225_278_coord
Surface EL: 1.2 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



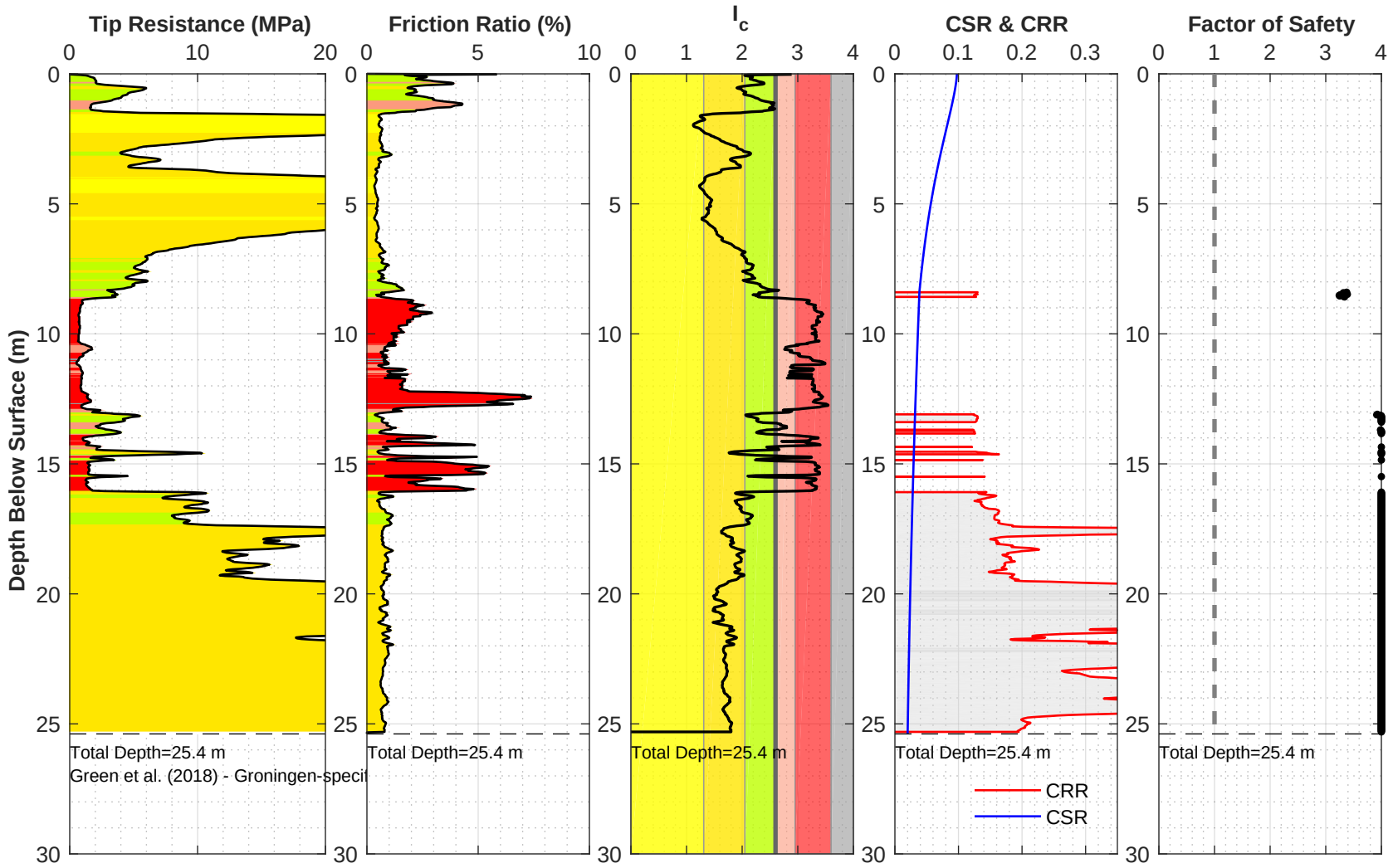
Location: 21225_279_coord
Surface EL: 1.1 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



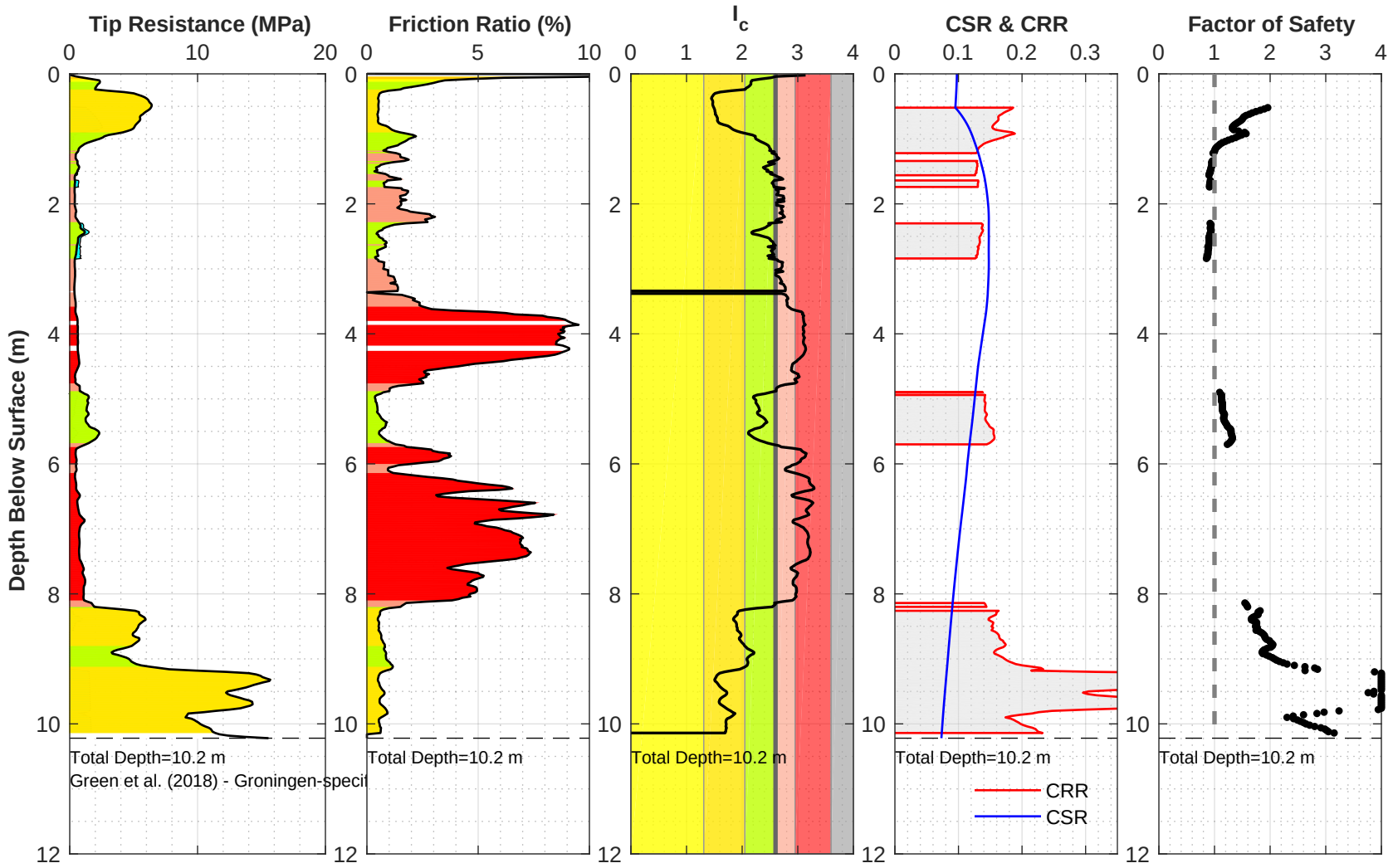
Location: 21225_280_coord
Surface EL: 1.2 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



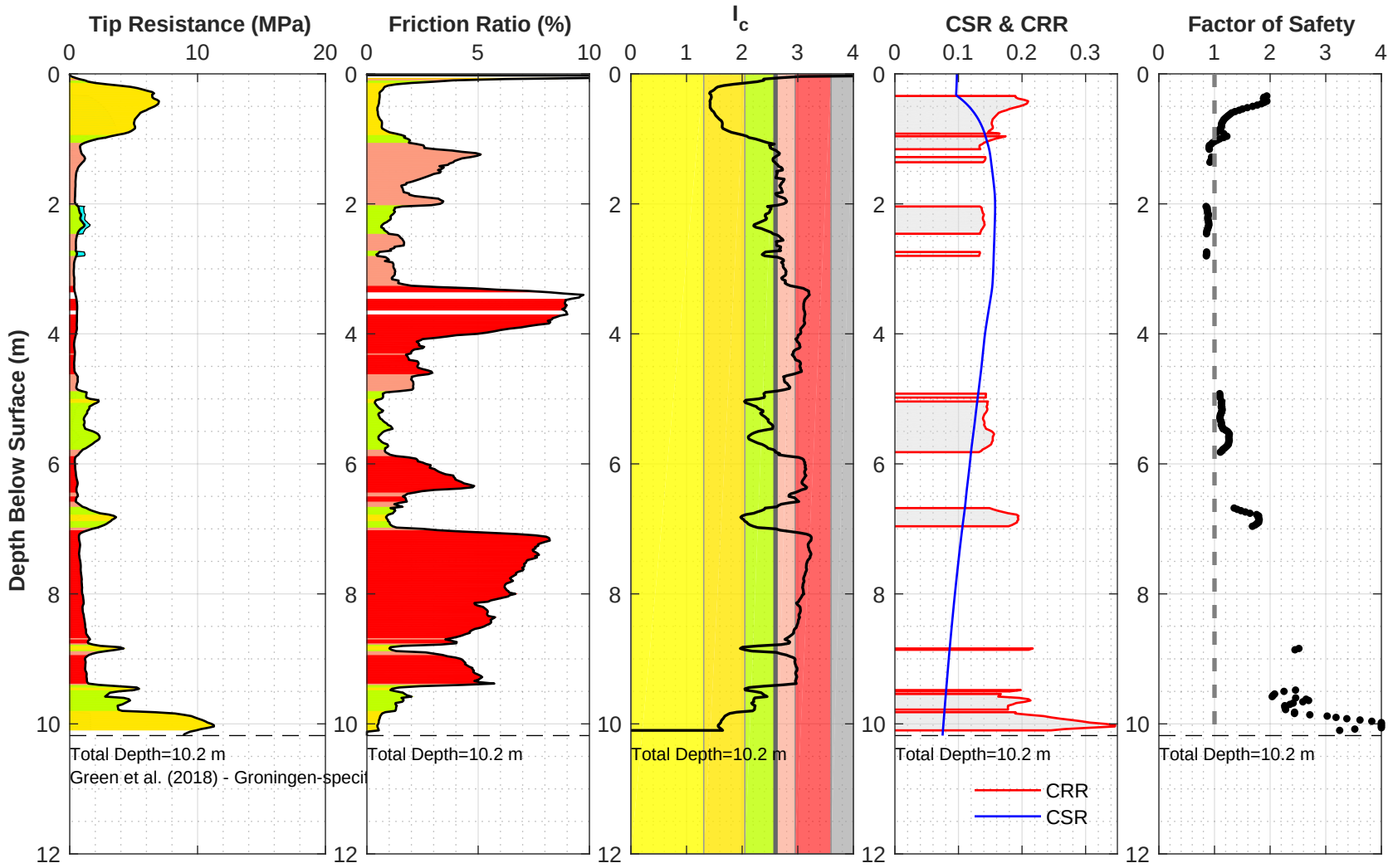
Location: 21225_281_coord
Surface EL: 8.9 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



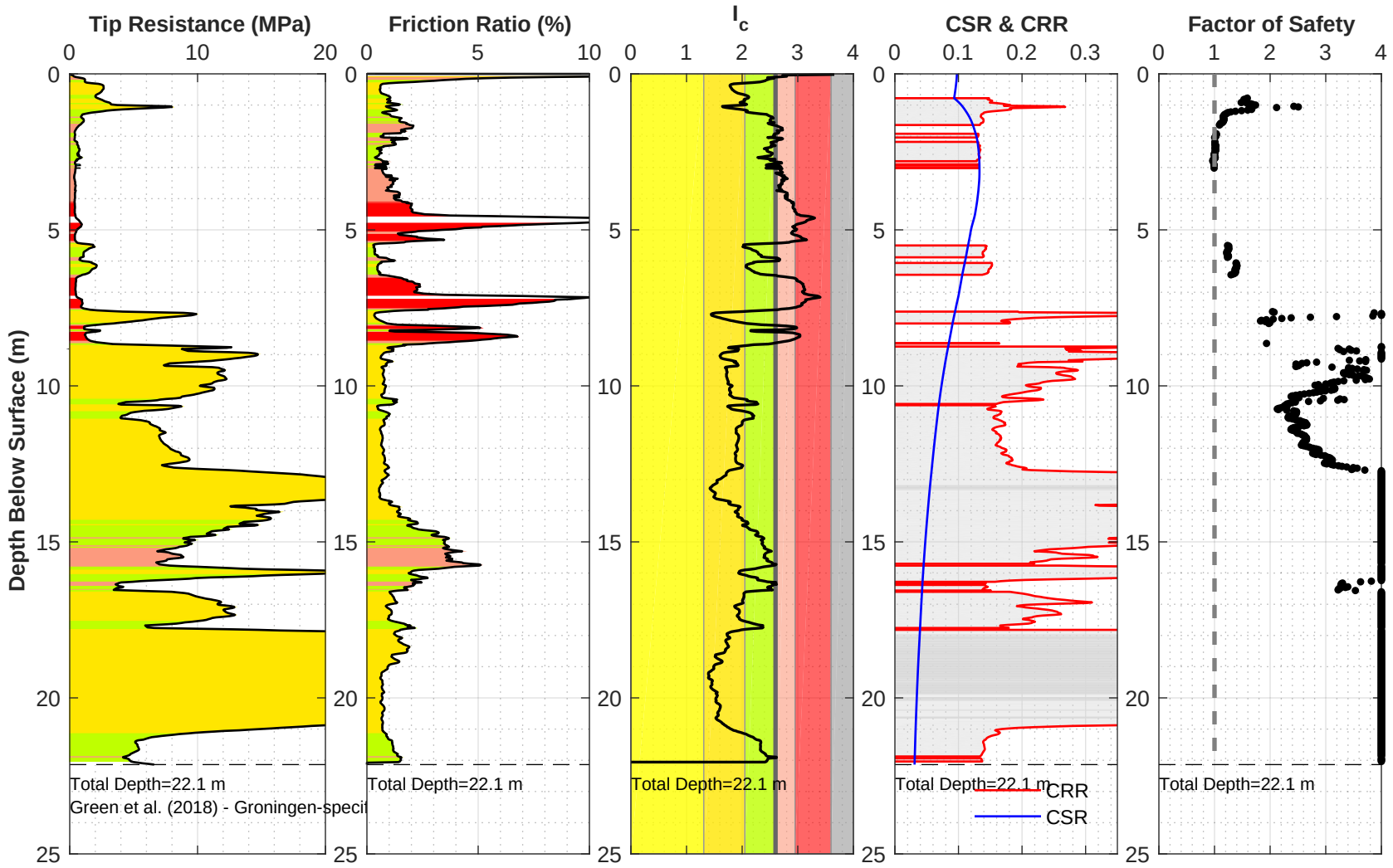
Location: 21225_282_coord
Surface EL: 1 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



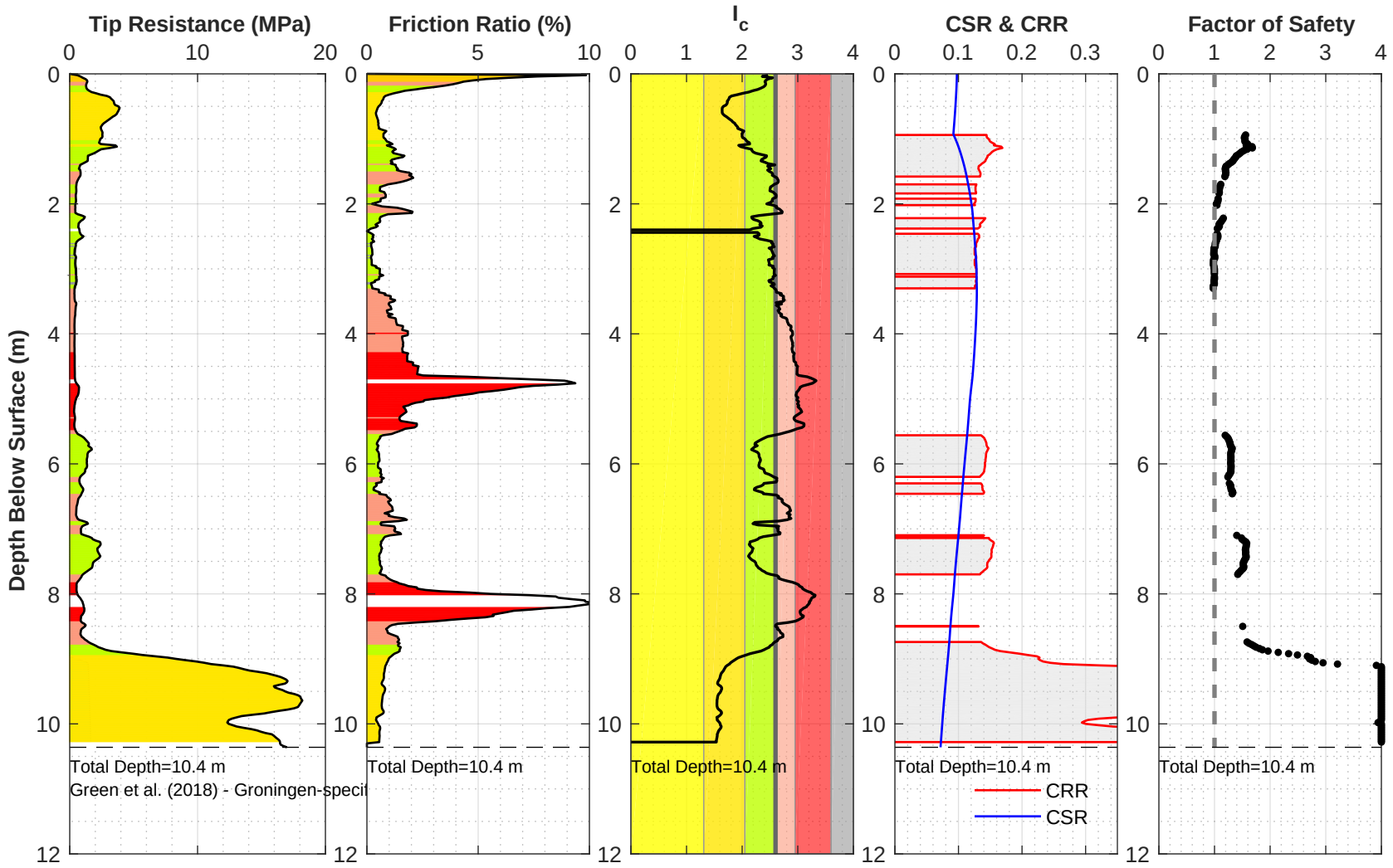
Location: 21225_283_coord
Surface EL: 0.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



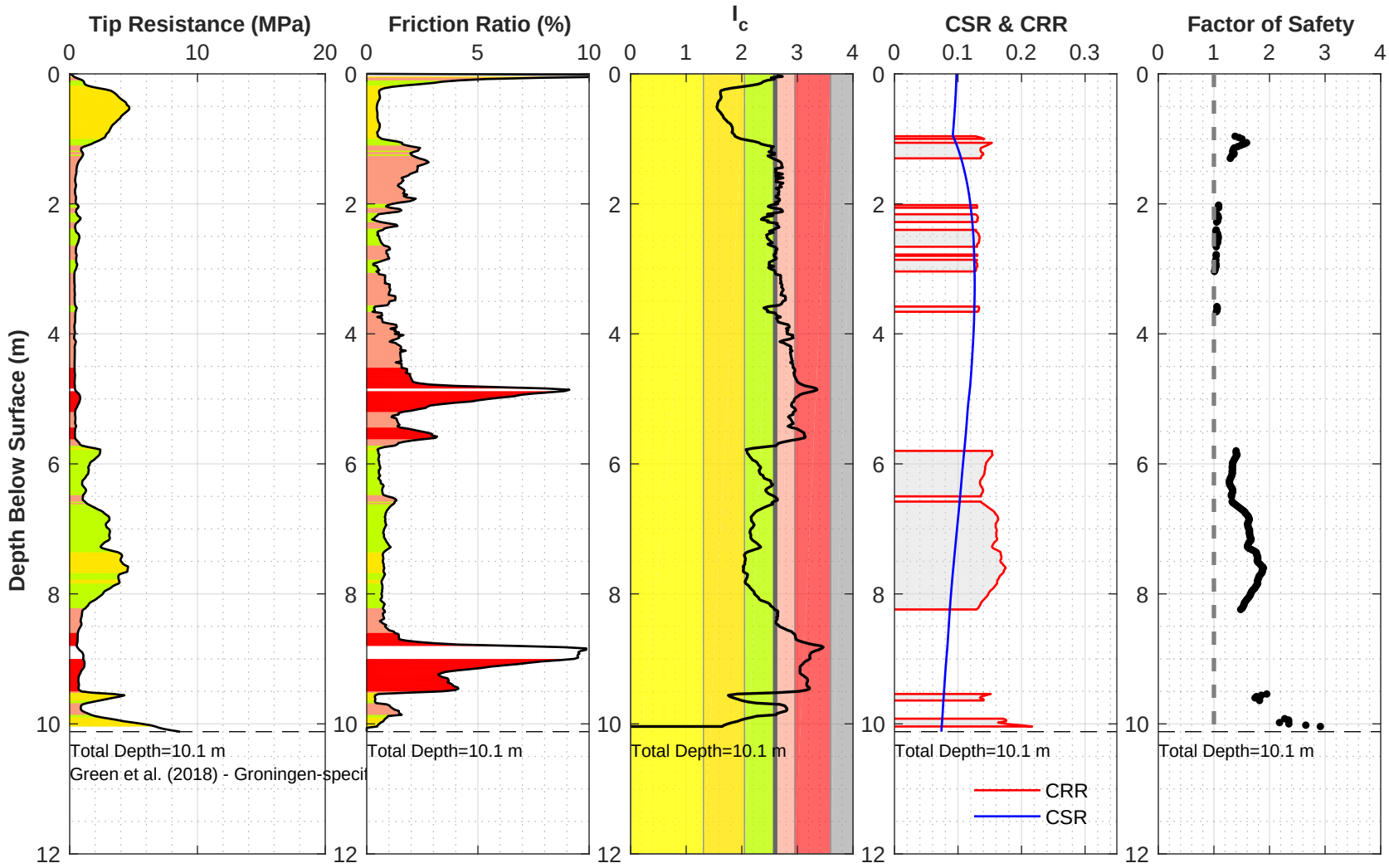
Location: 21225_284_coord
Surface EL: 1.3 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



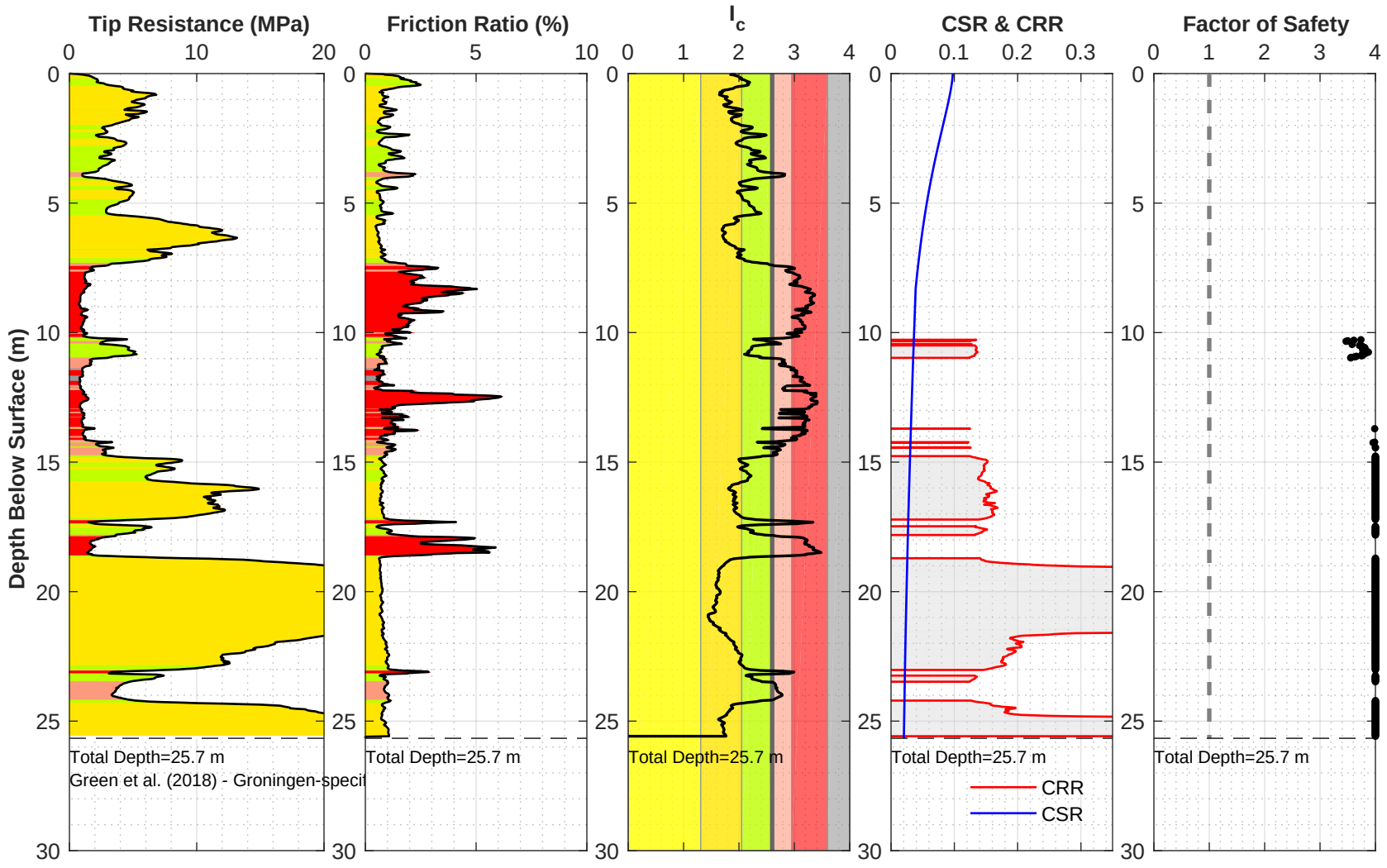
Location: 21225_285_coord
Surface EL: 1.4 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



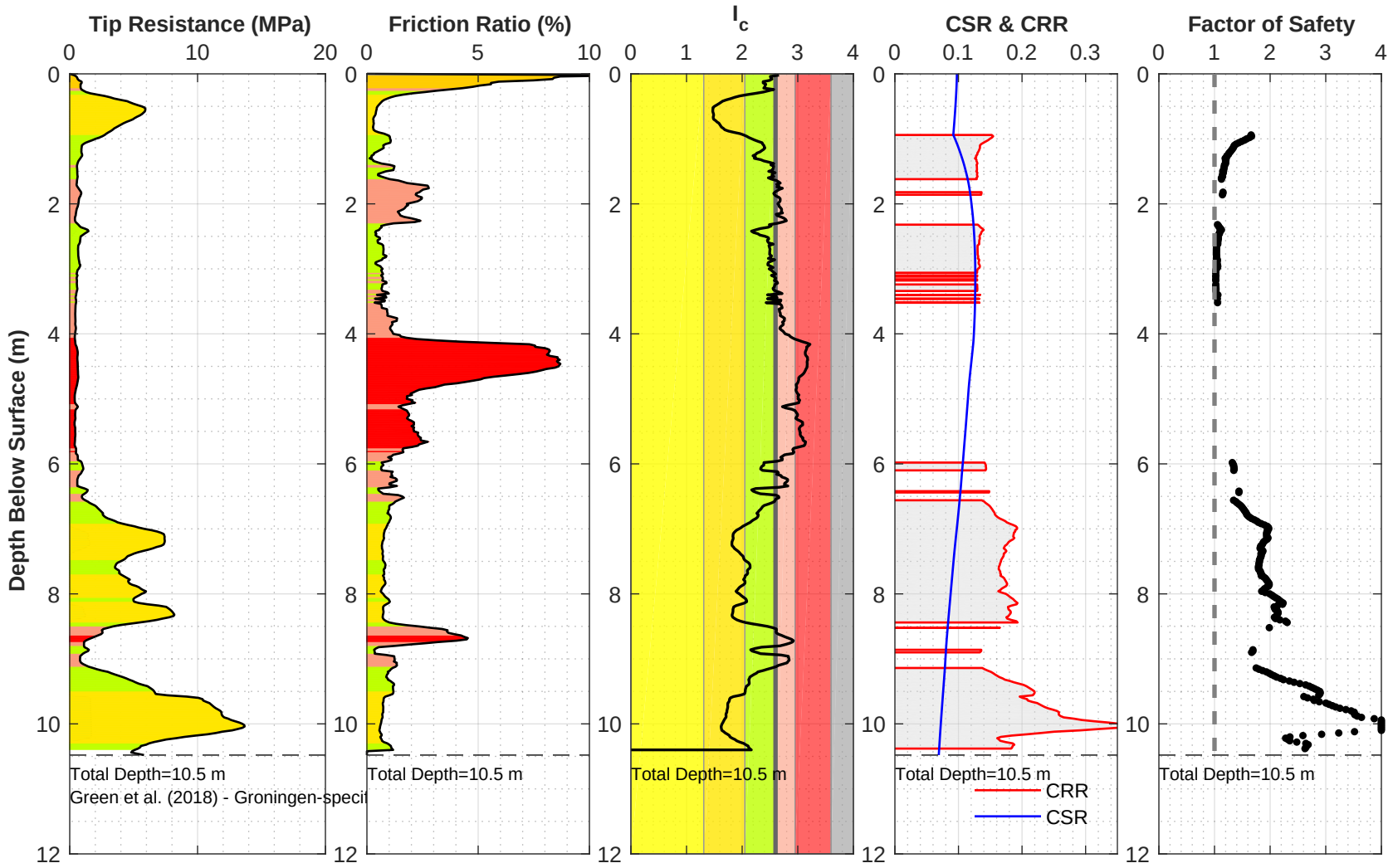
Location: 21225_286_coord
Surface EL: 1.5 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



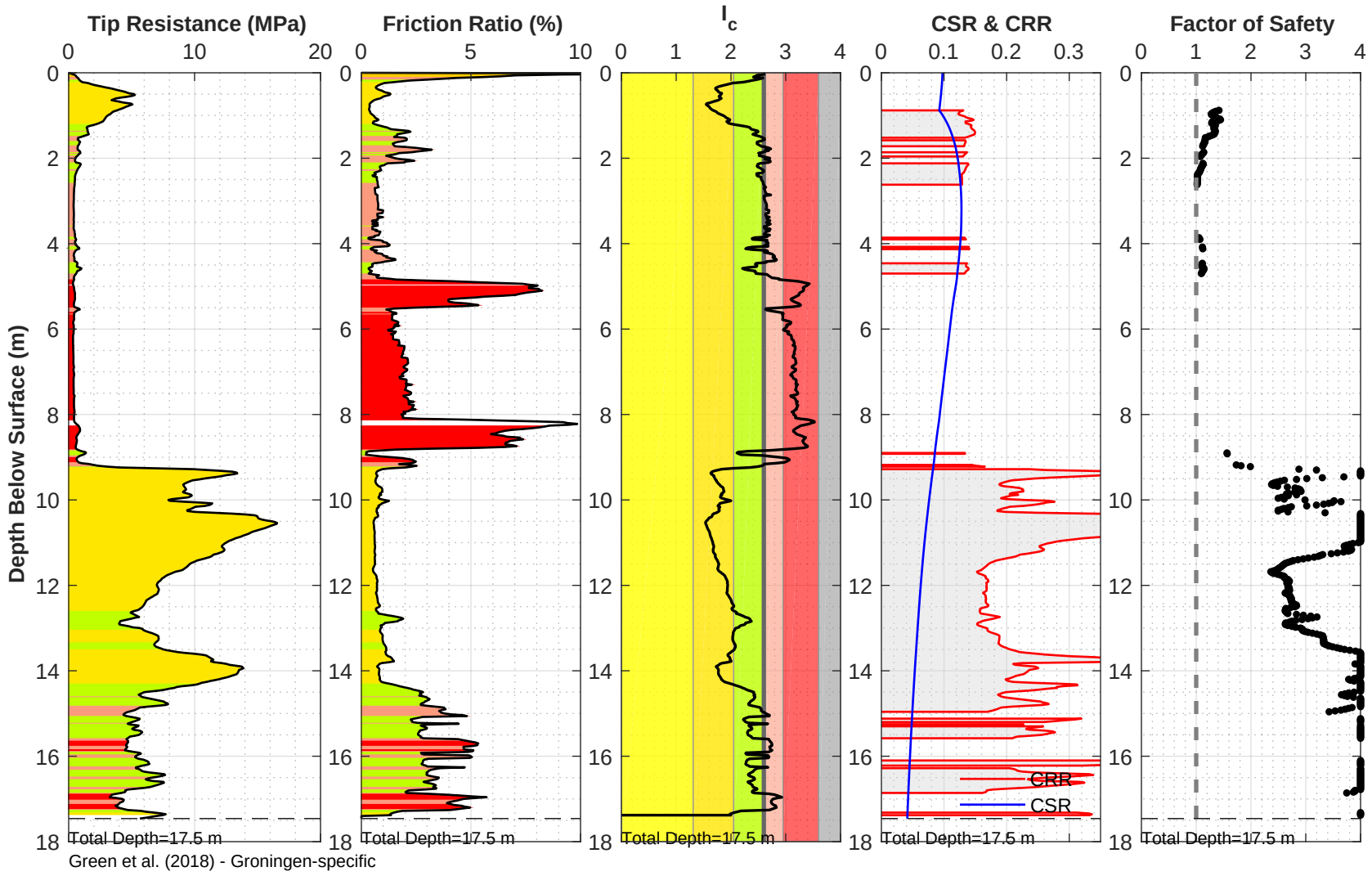
Location: 21225_287_coord
Surface EL: 8.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



Location: 21225_288_coord
Surface EL: 1.4 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

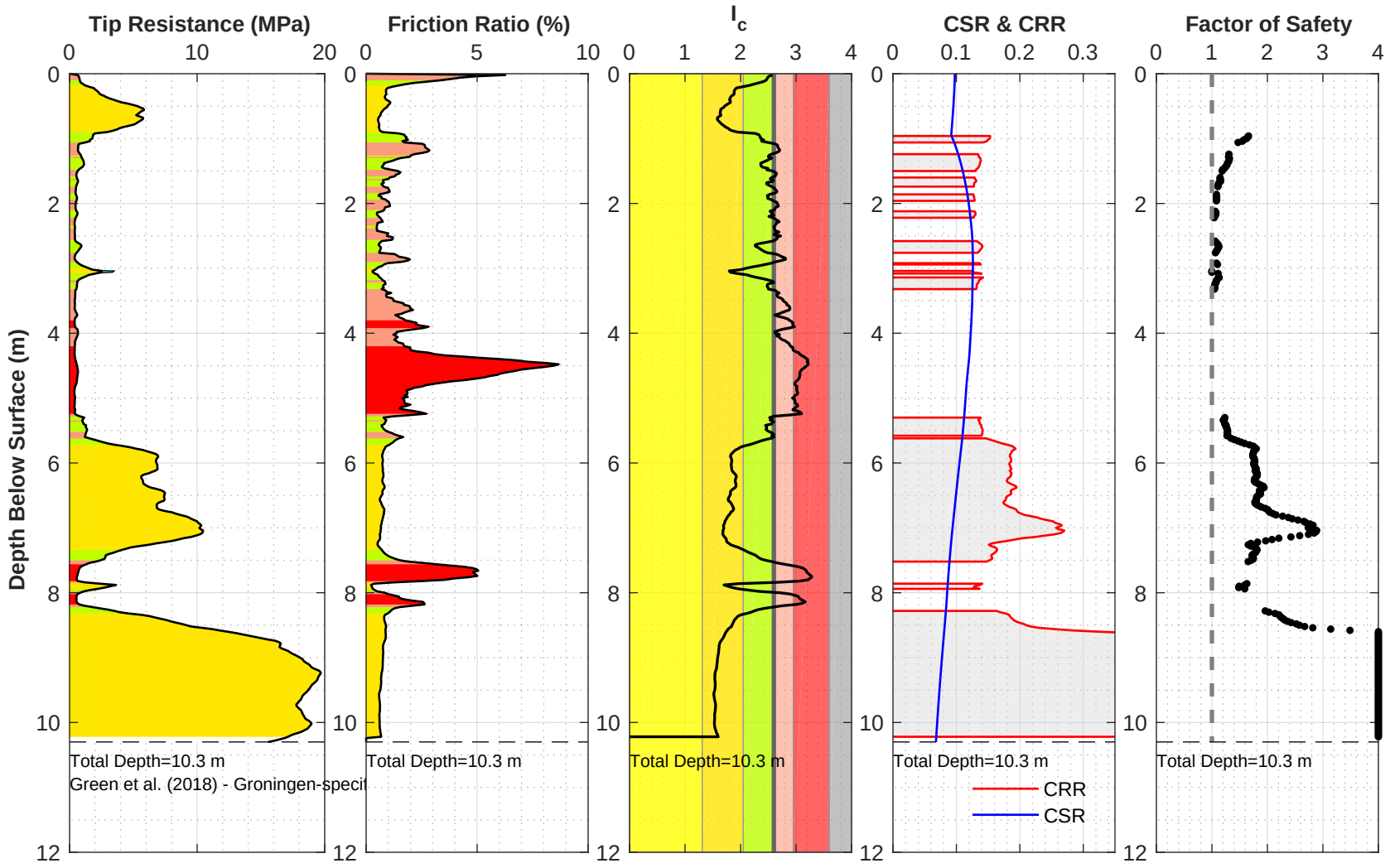
Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



Green et al. (2018) - Groningen-specific

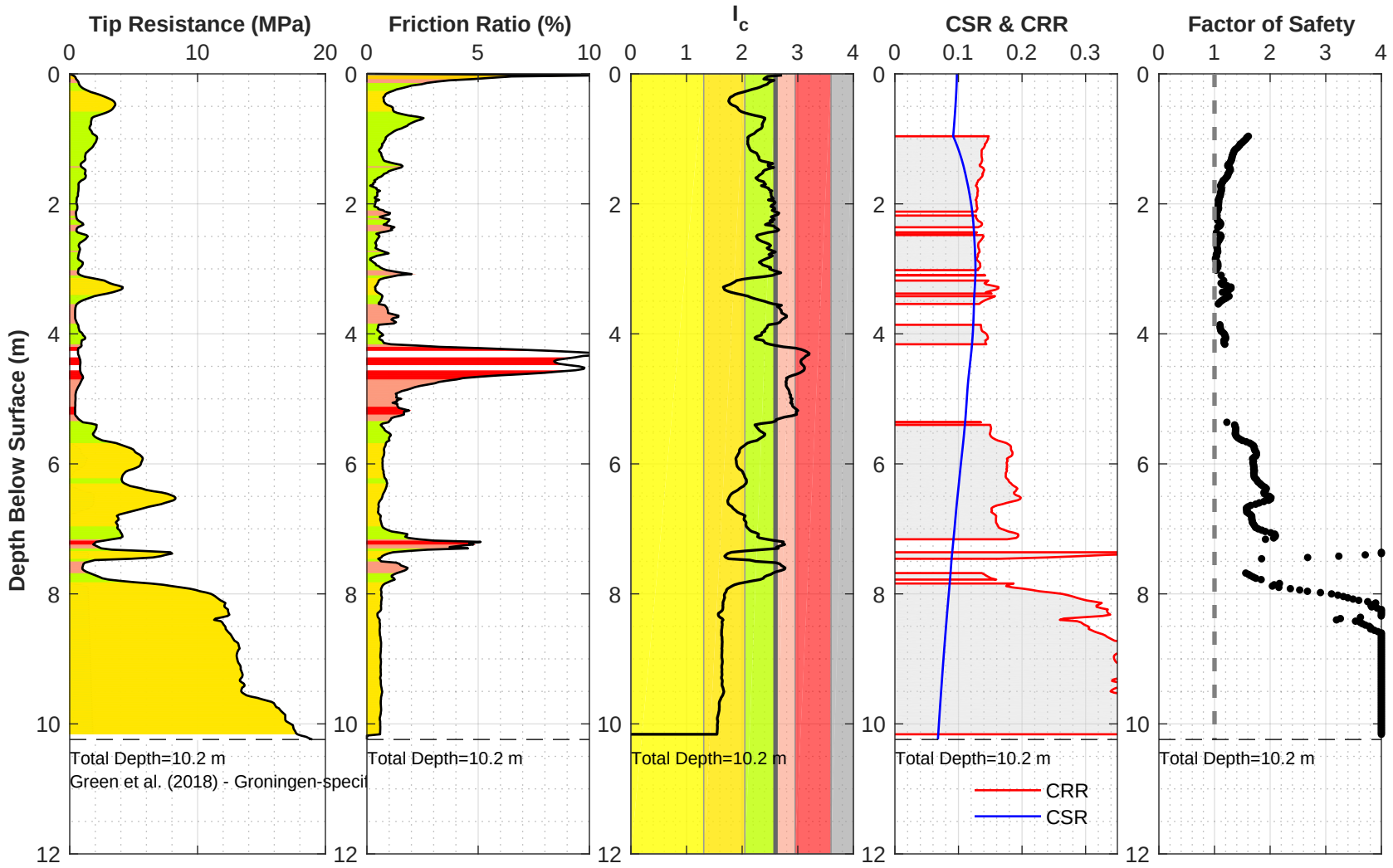
Location: 21225_289_coord
Surface EL: 1.4 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



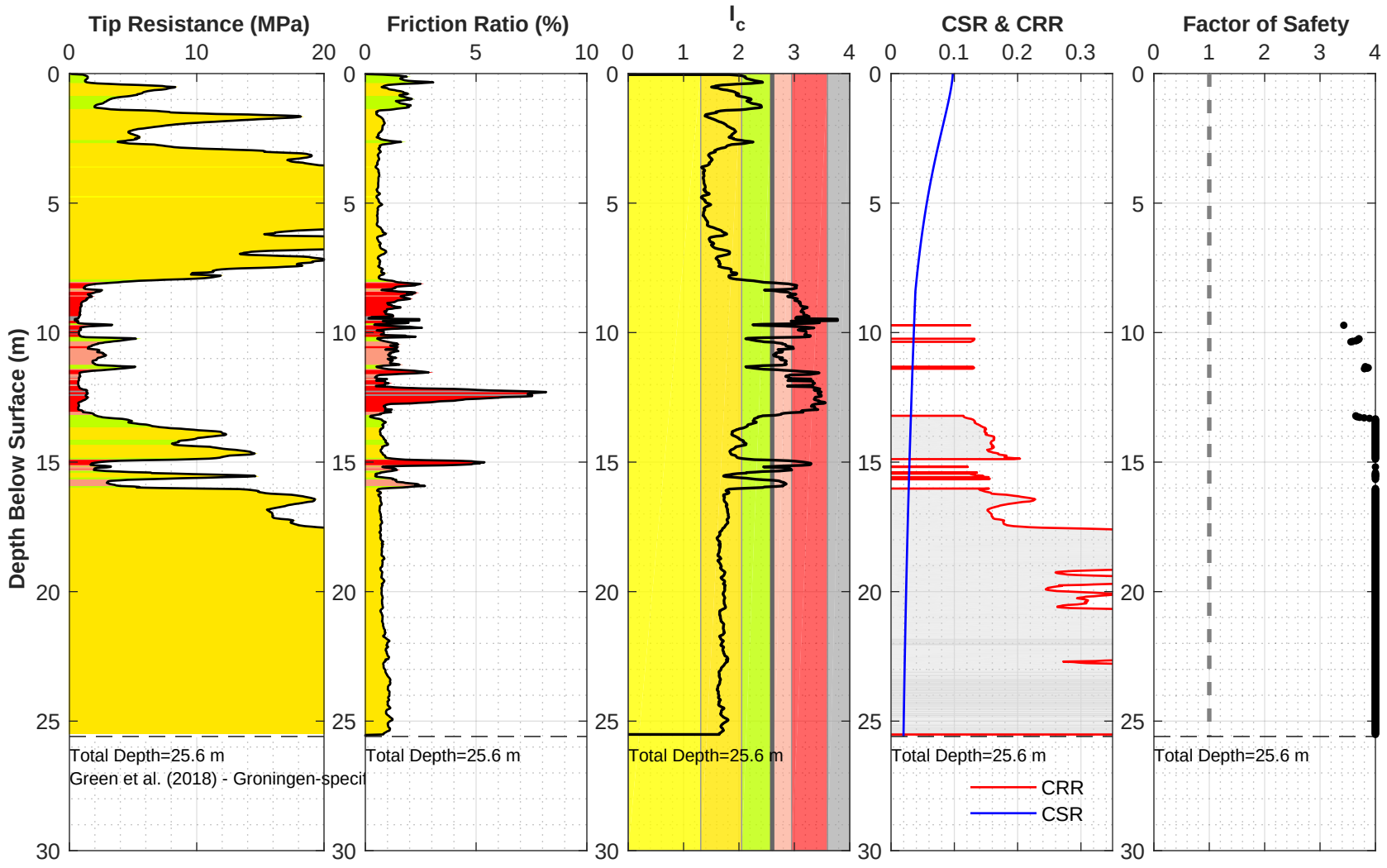
Location: 21225_290_coord
Surface EL: 1.5 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



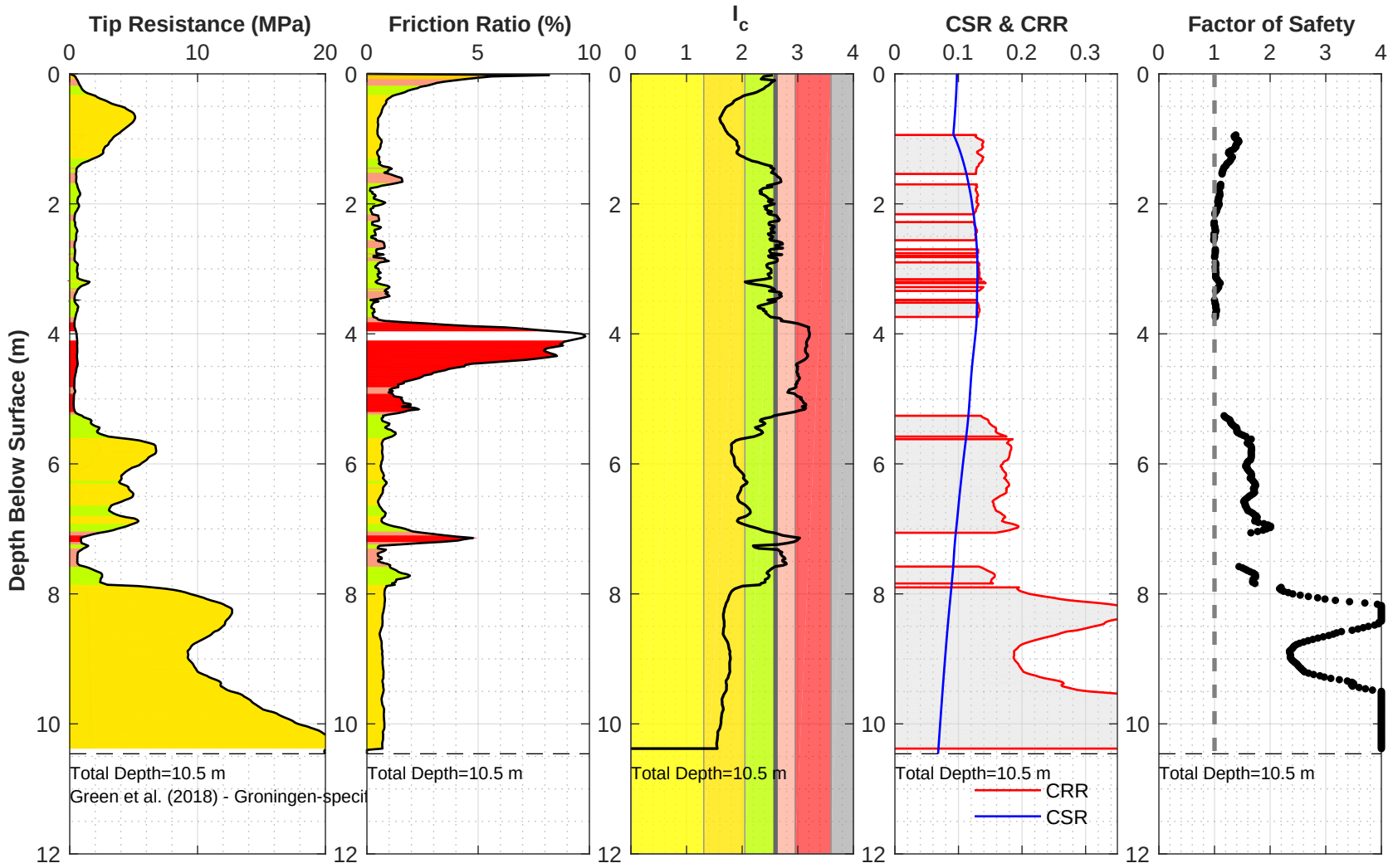
Location: 21225_291_coord
Surface EL: 1.5 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



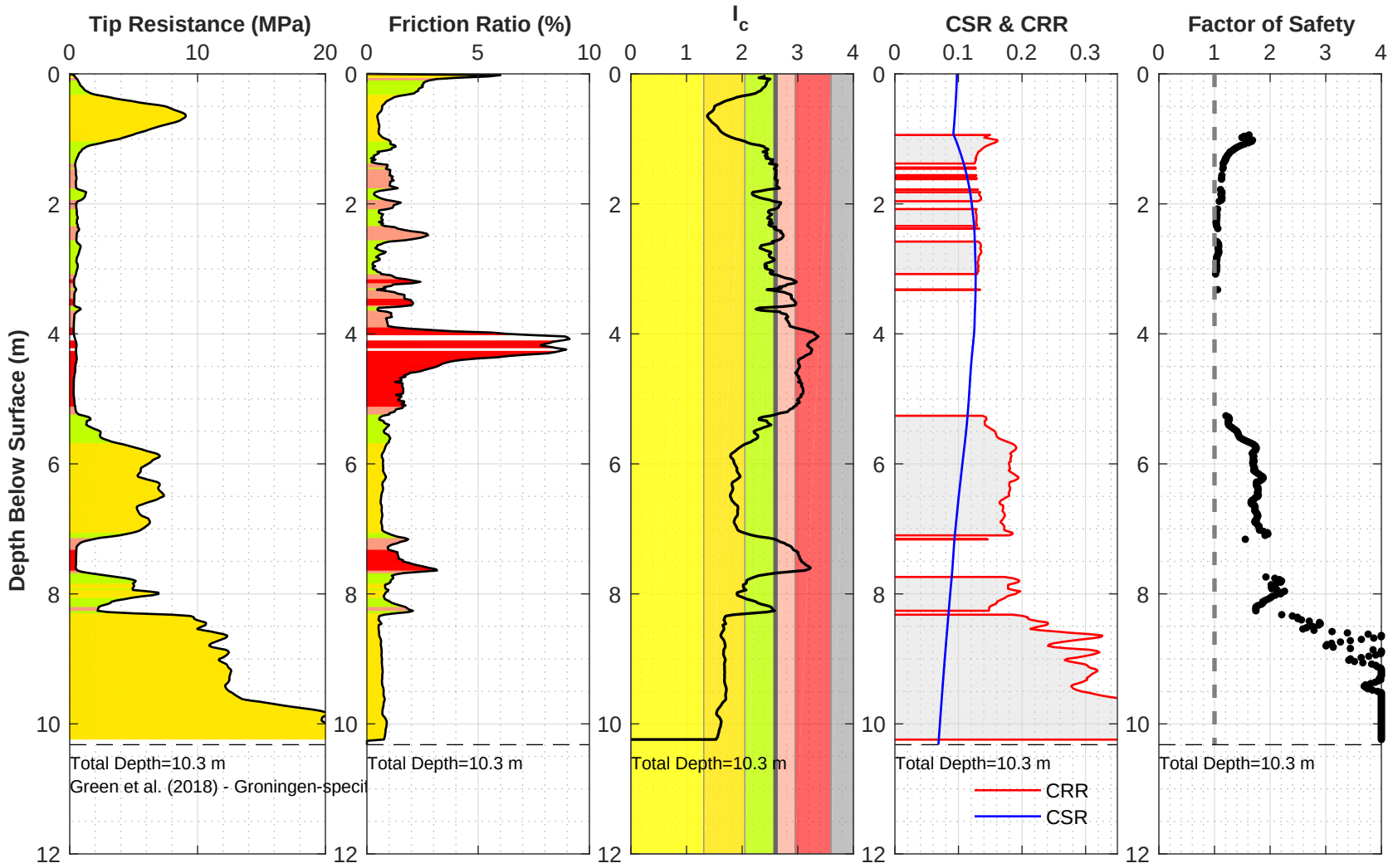
Location: 21225_292_coord
Surface EL: 8.9 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



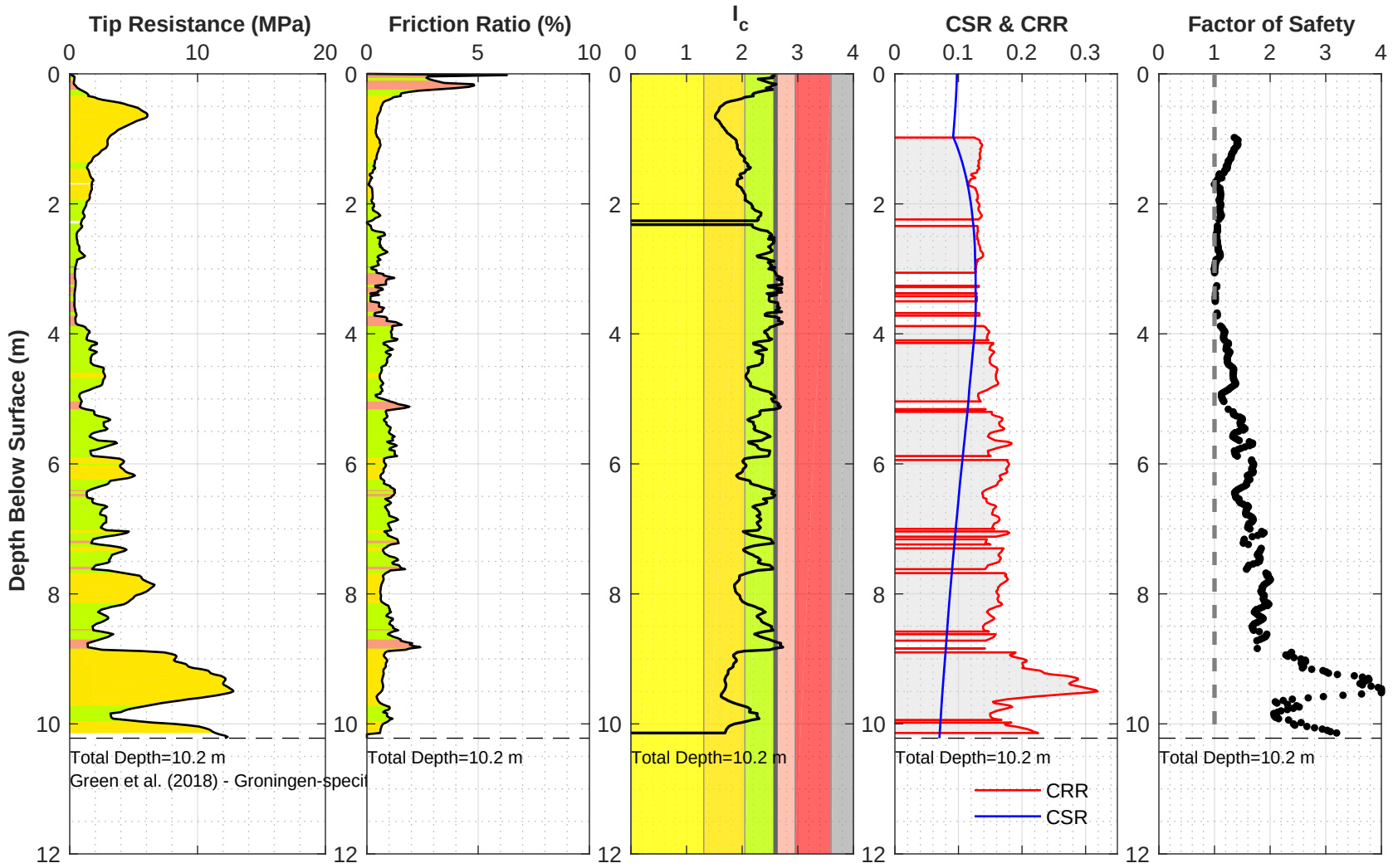
Location: 21225_293_coord
Surface EL: 1.4 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



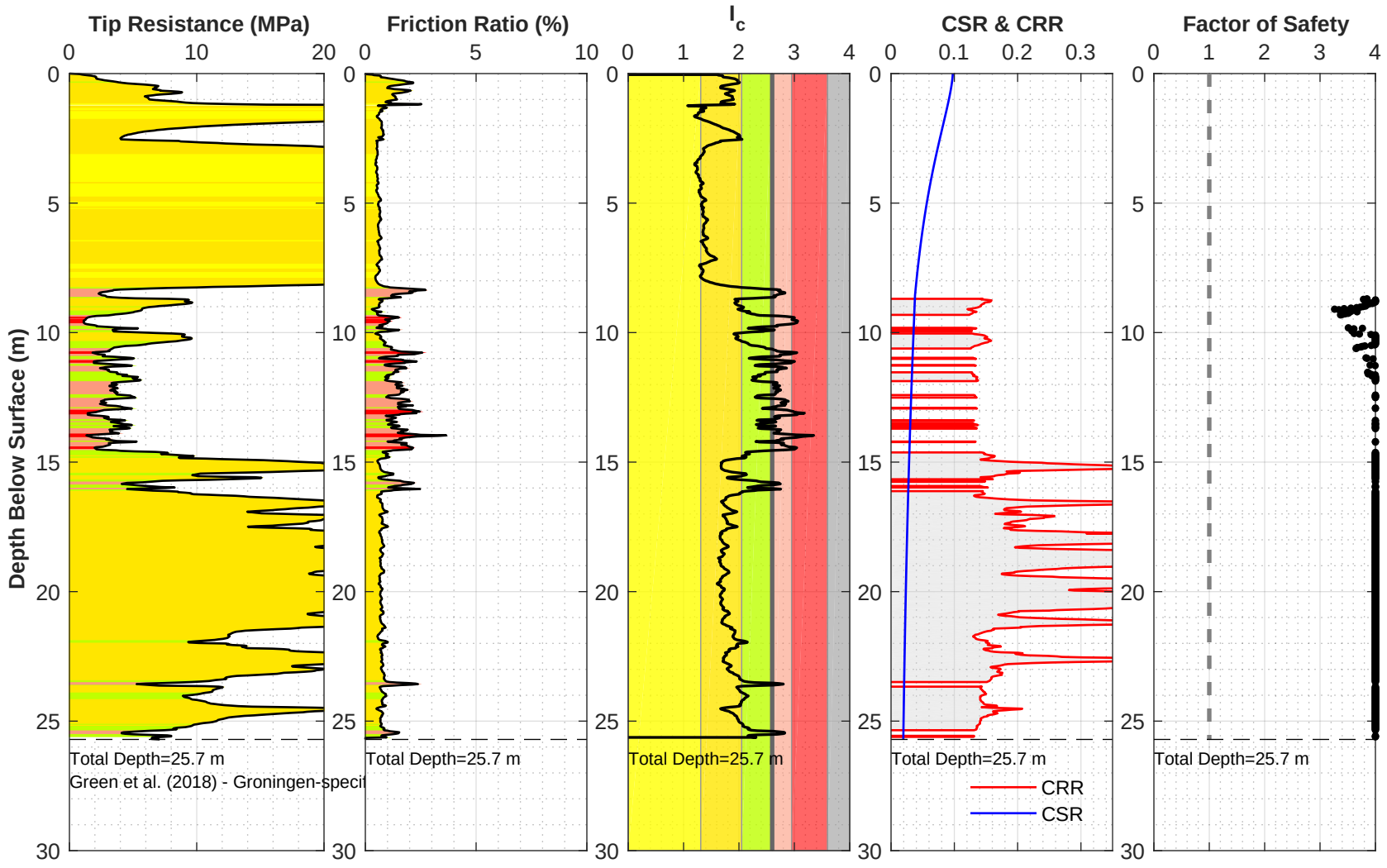
Location: 21225_294_coord
Surface EL: 1.4 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



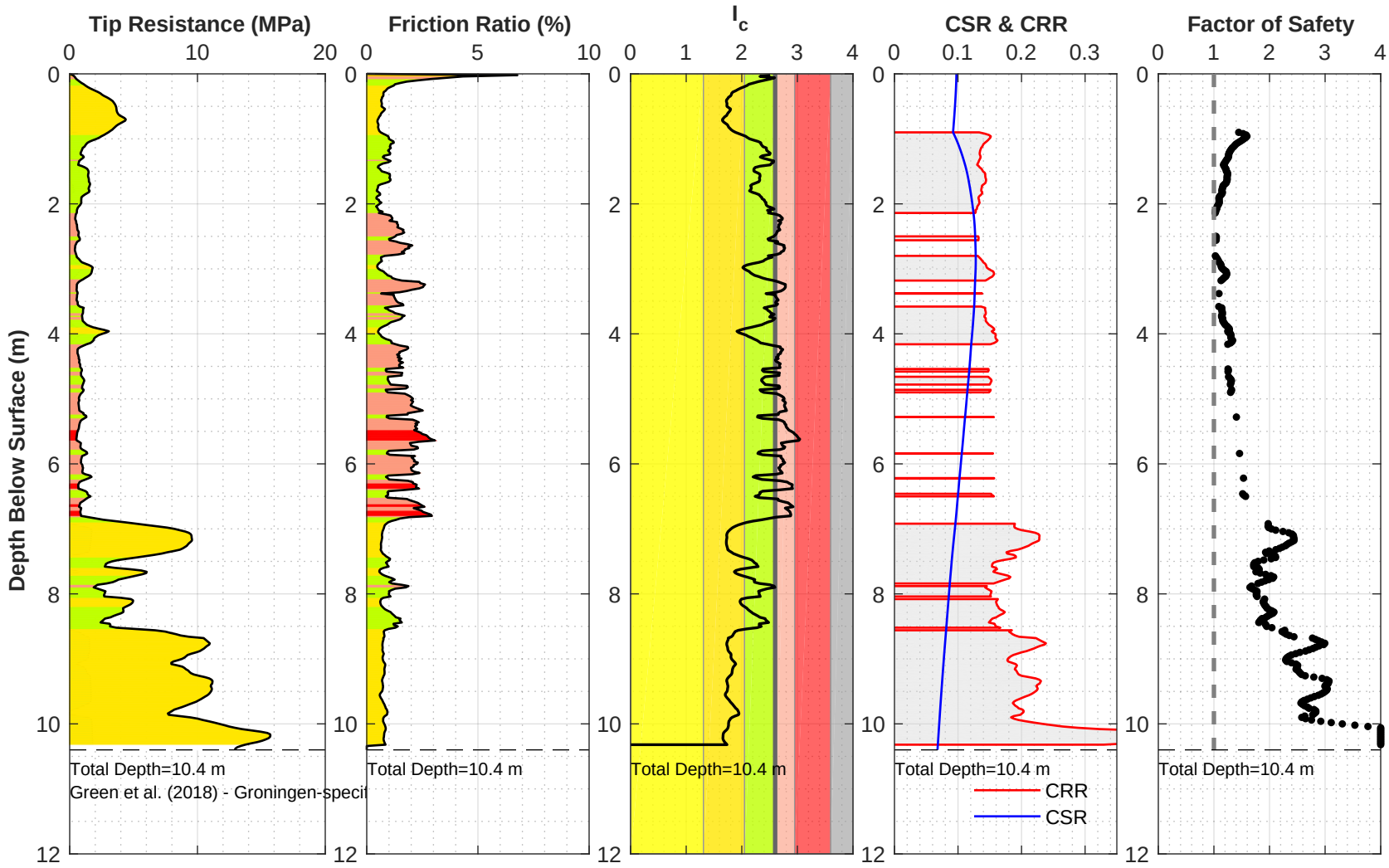
Location: 21225_295_coord
Surface EL: 1.5 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



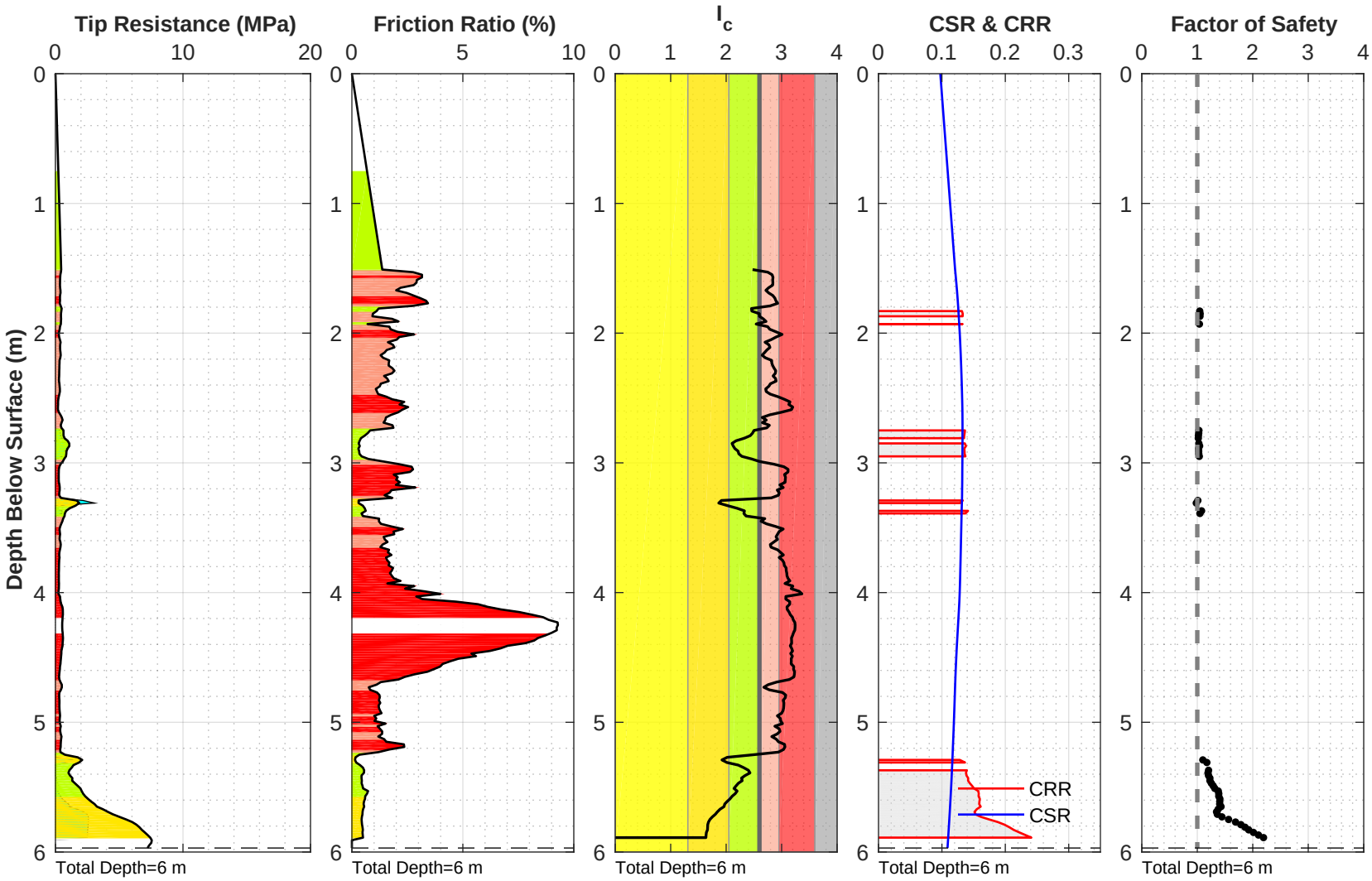
Location: 21225_296_coord
Surface EL: 9.1 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



Location: 21225_297_coord
Surface EL: 1.4 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

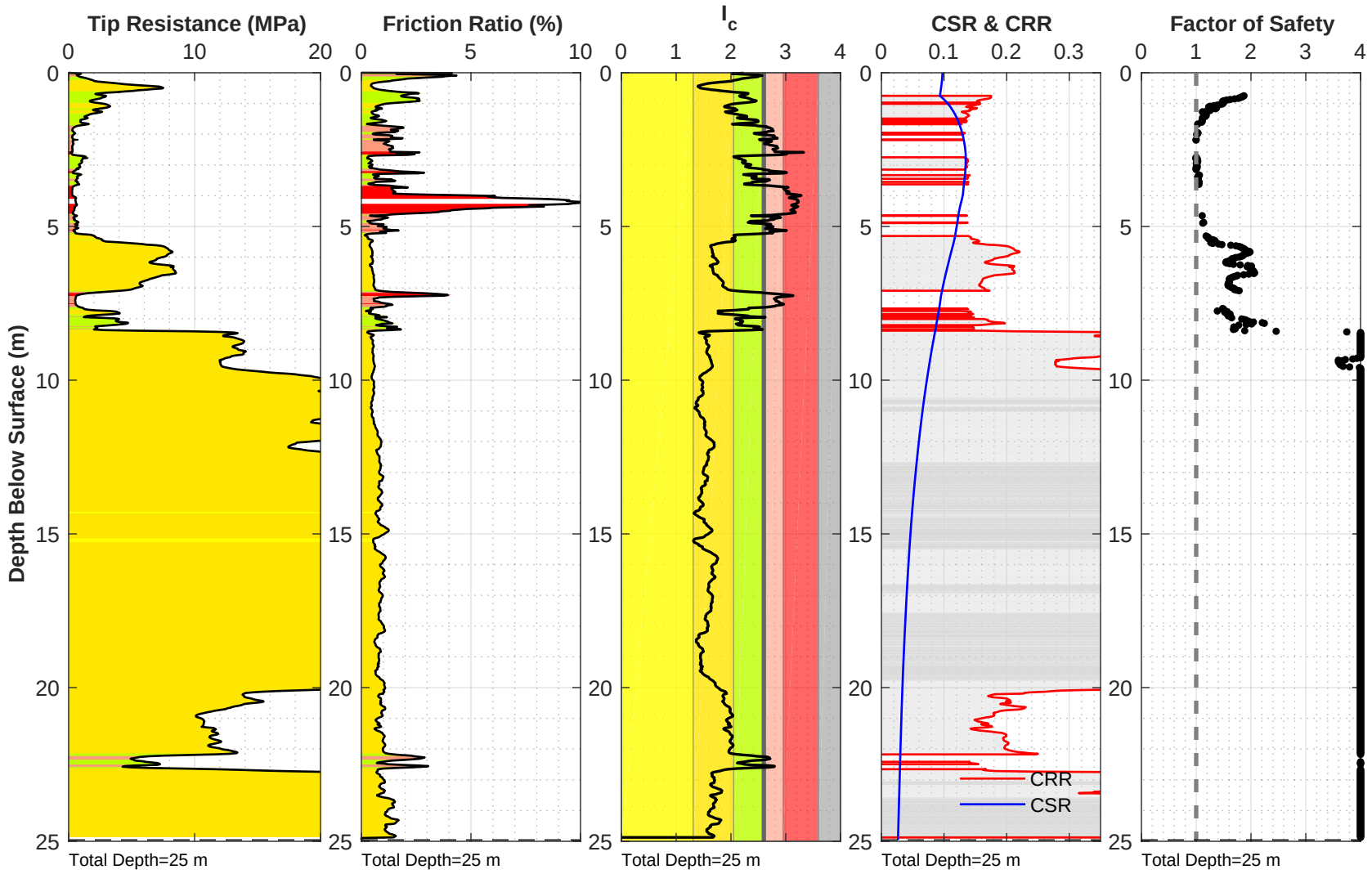
Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



Green et al. (2018) - Groningen-specific

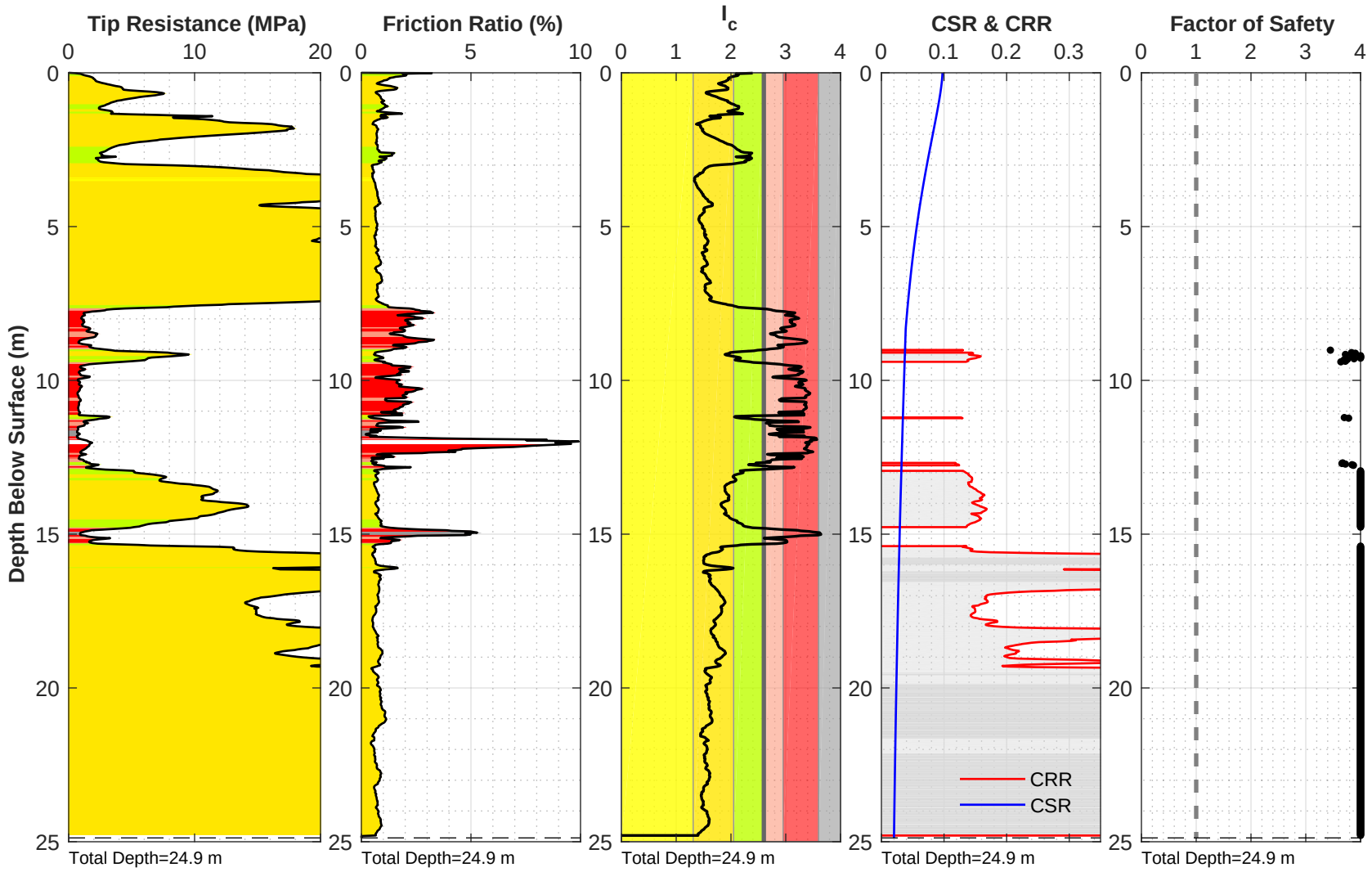
Location: S1-W48.1BIT
Surface EL: 1.2 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



Green et al. (2018) - Groningen-specific
Location: S2-W48.1BIT
Surface EL: 1.3 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



Green et al. (2018) - Groningen-specific

Location: S2-W48.1KR

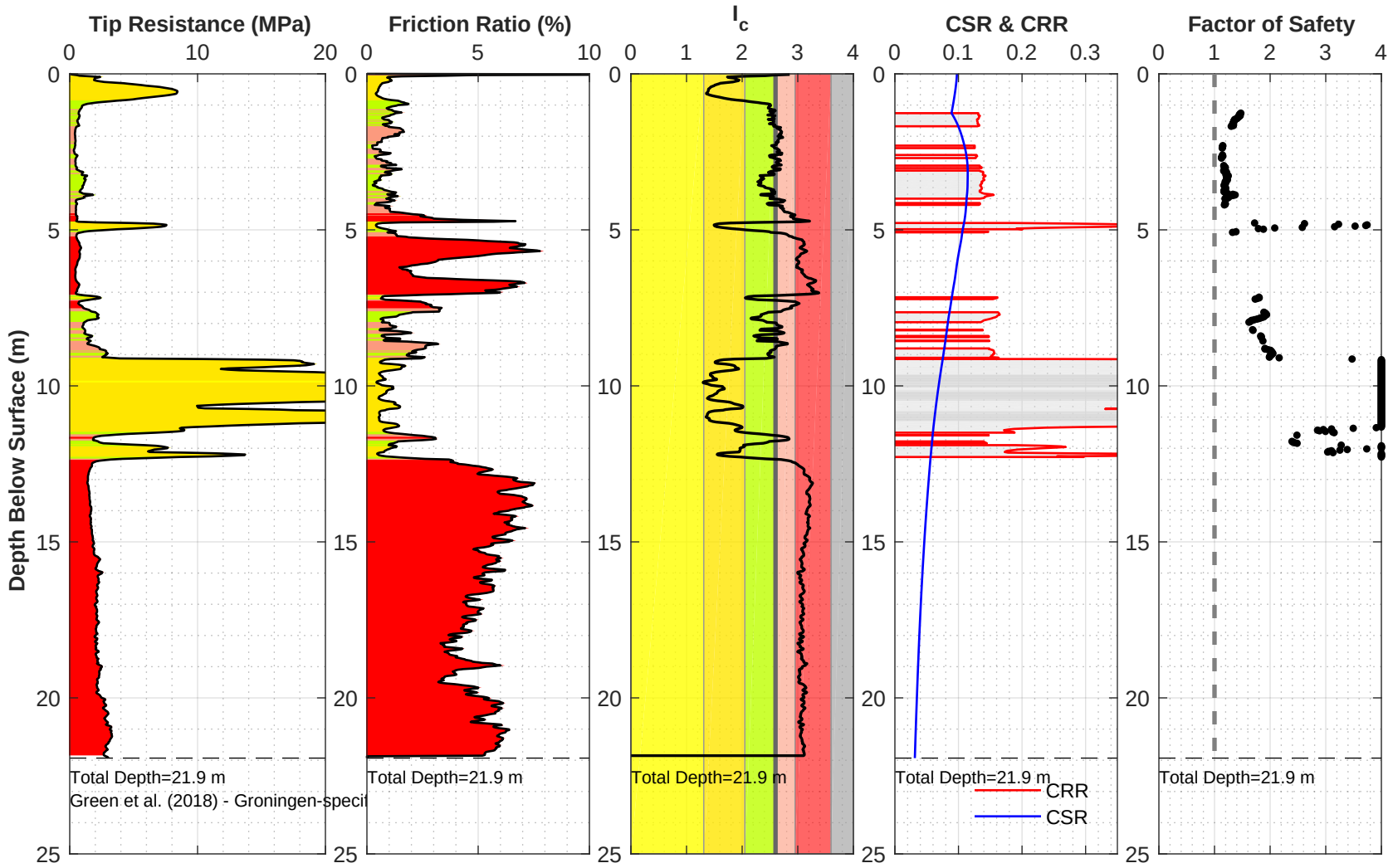
Surface EL: 8.8 m +/- (NAP)

Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)

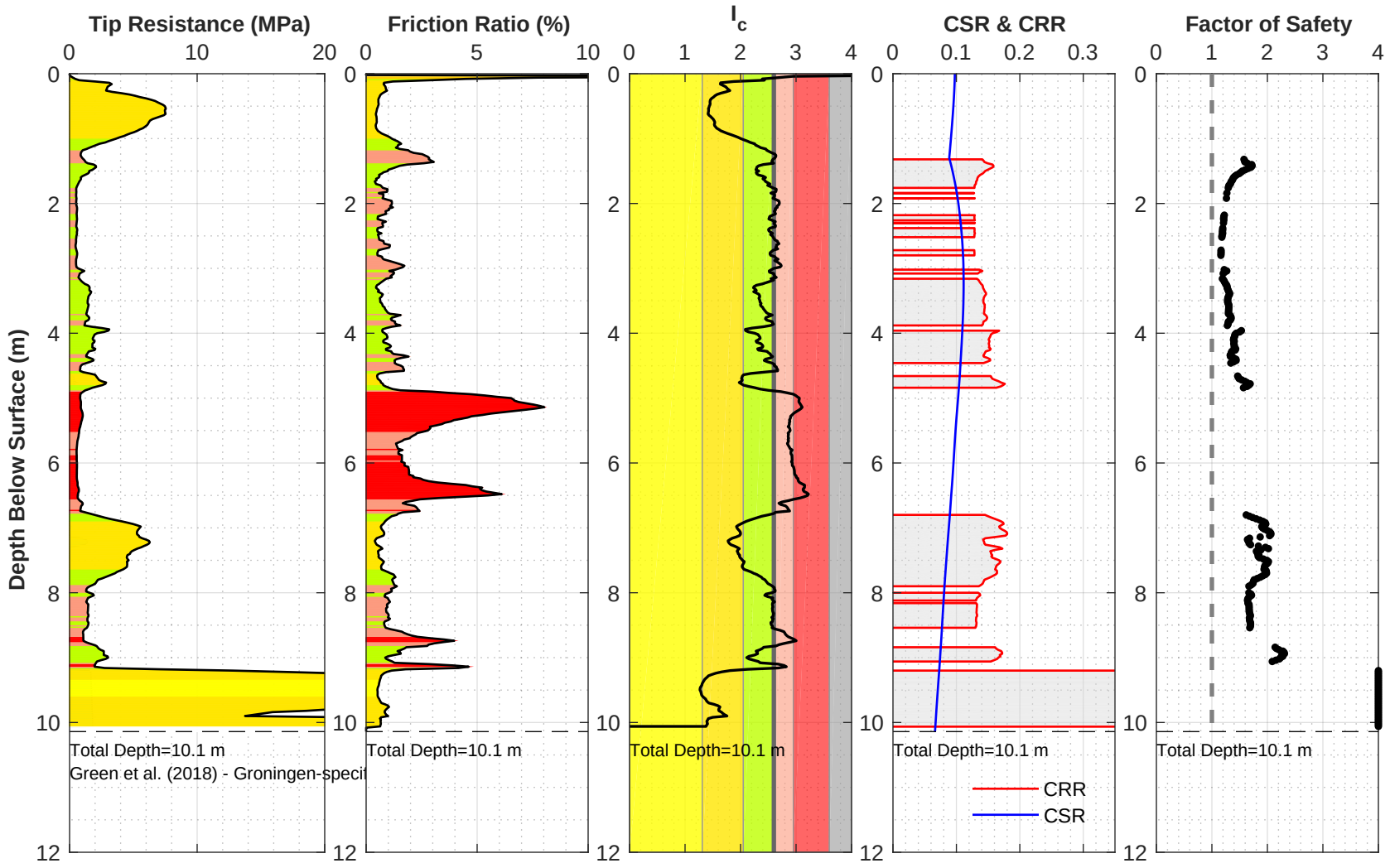
Analysis Title: NC

Mw: 3.9 amax (g): 0.15



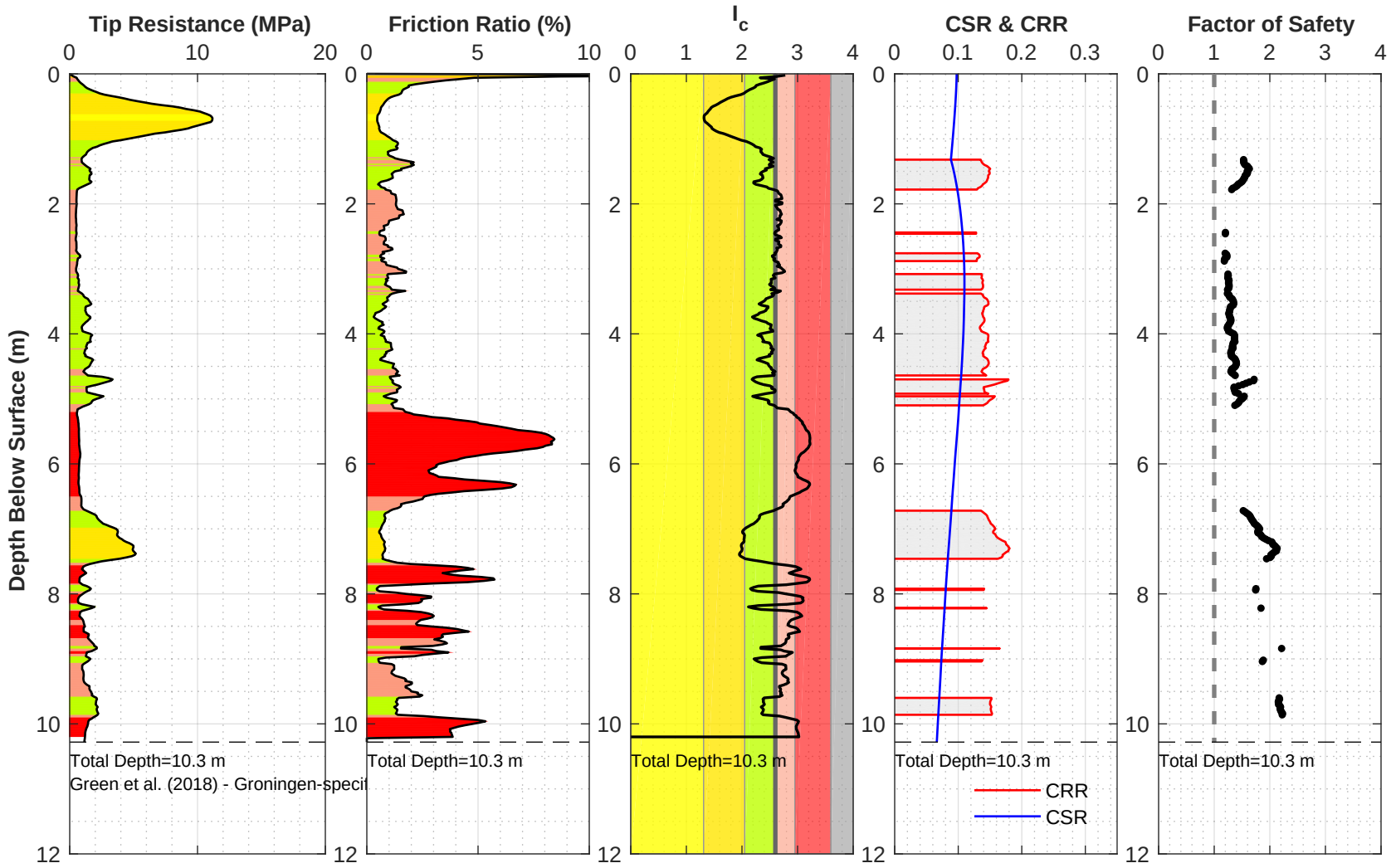
Location: 21225_234_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



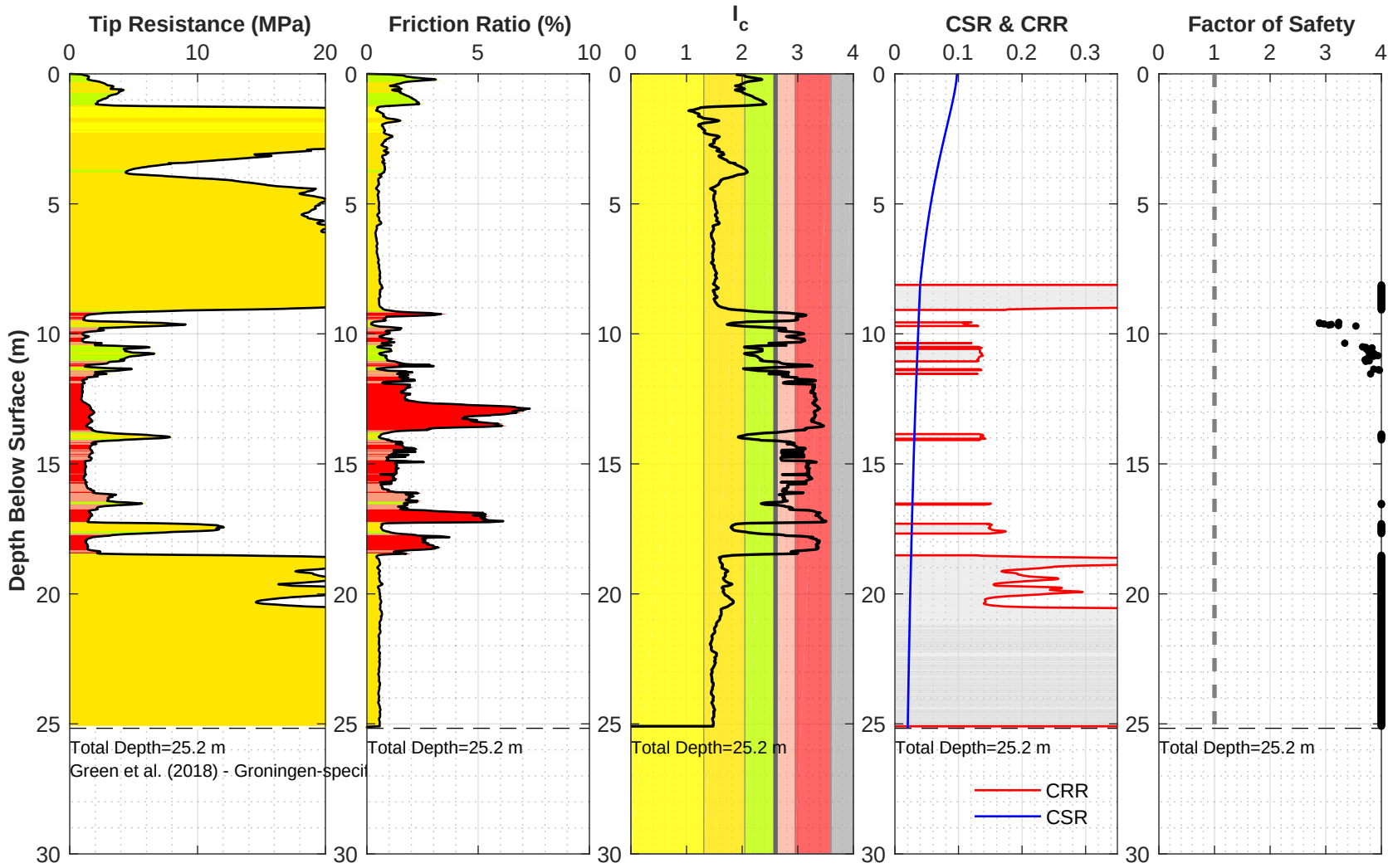
Location: 21225_235_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



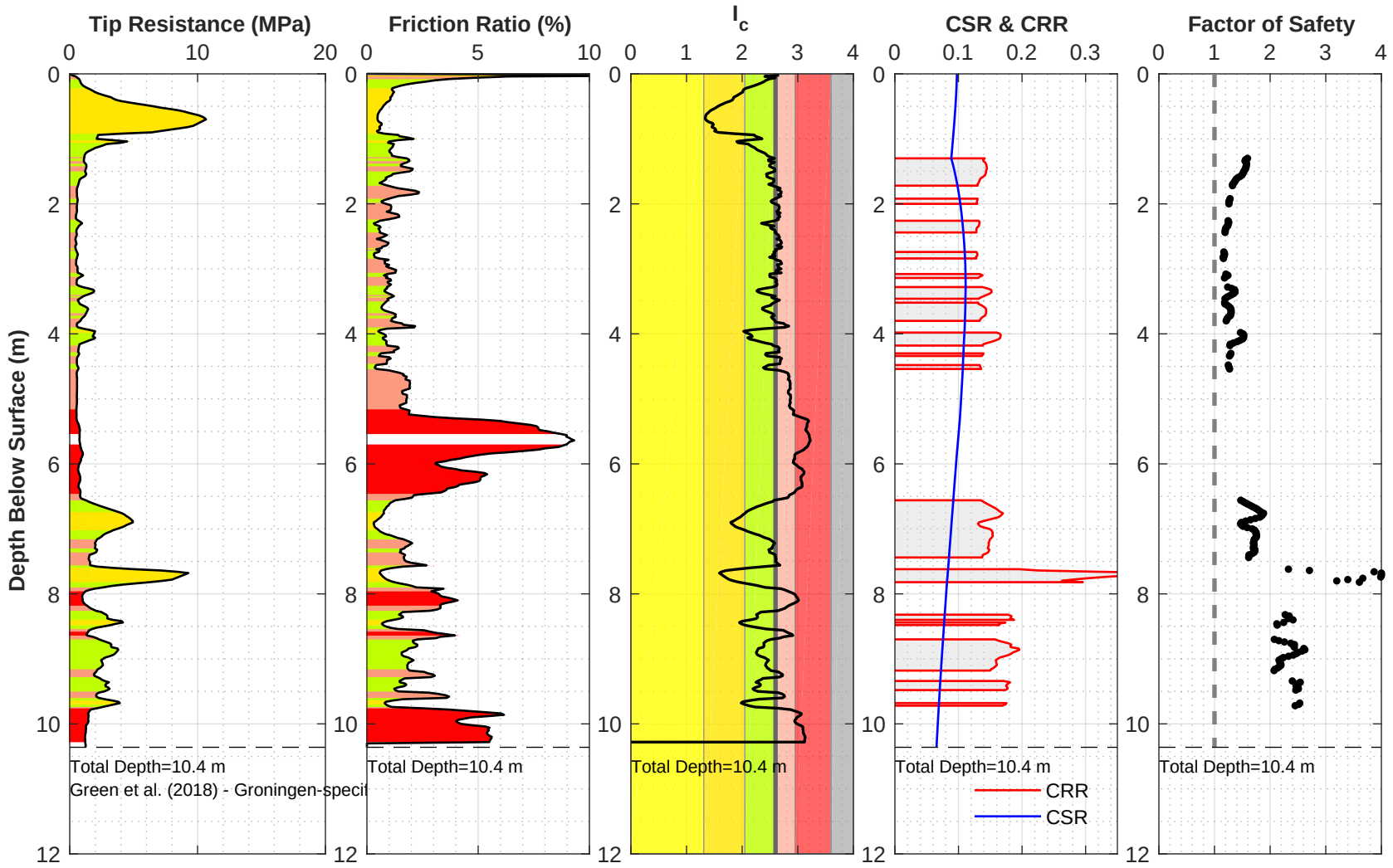
Location: 21225_236_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



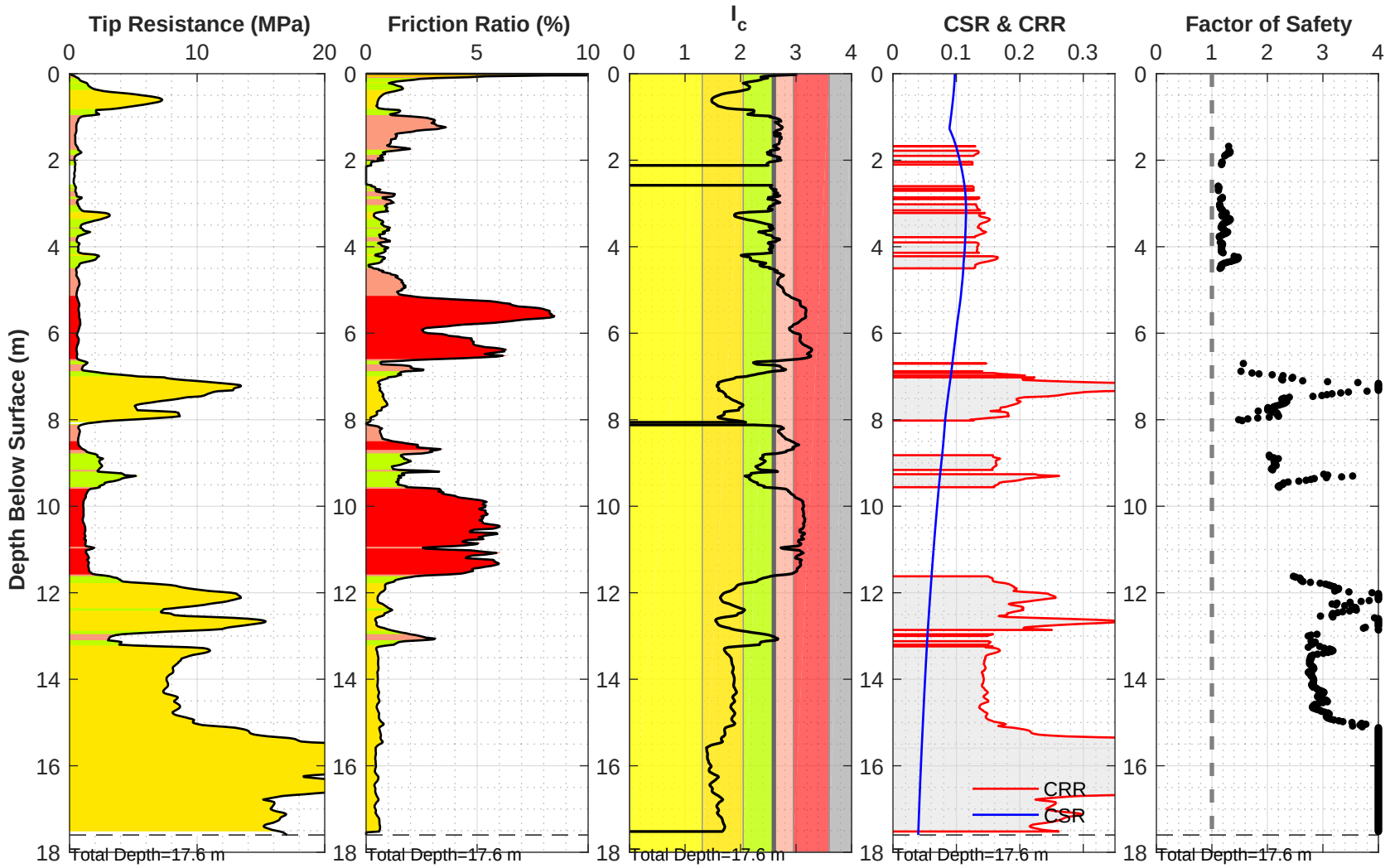
Location: 21225_237_coord
Surface EL: 8.6 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



Location: 21225_238_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

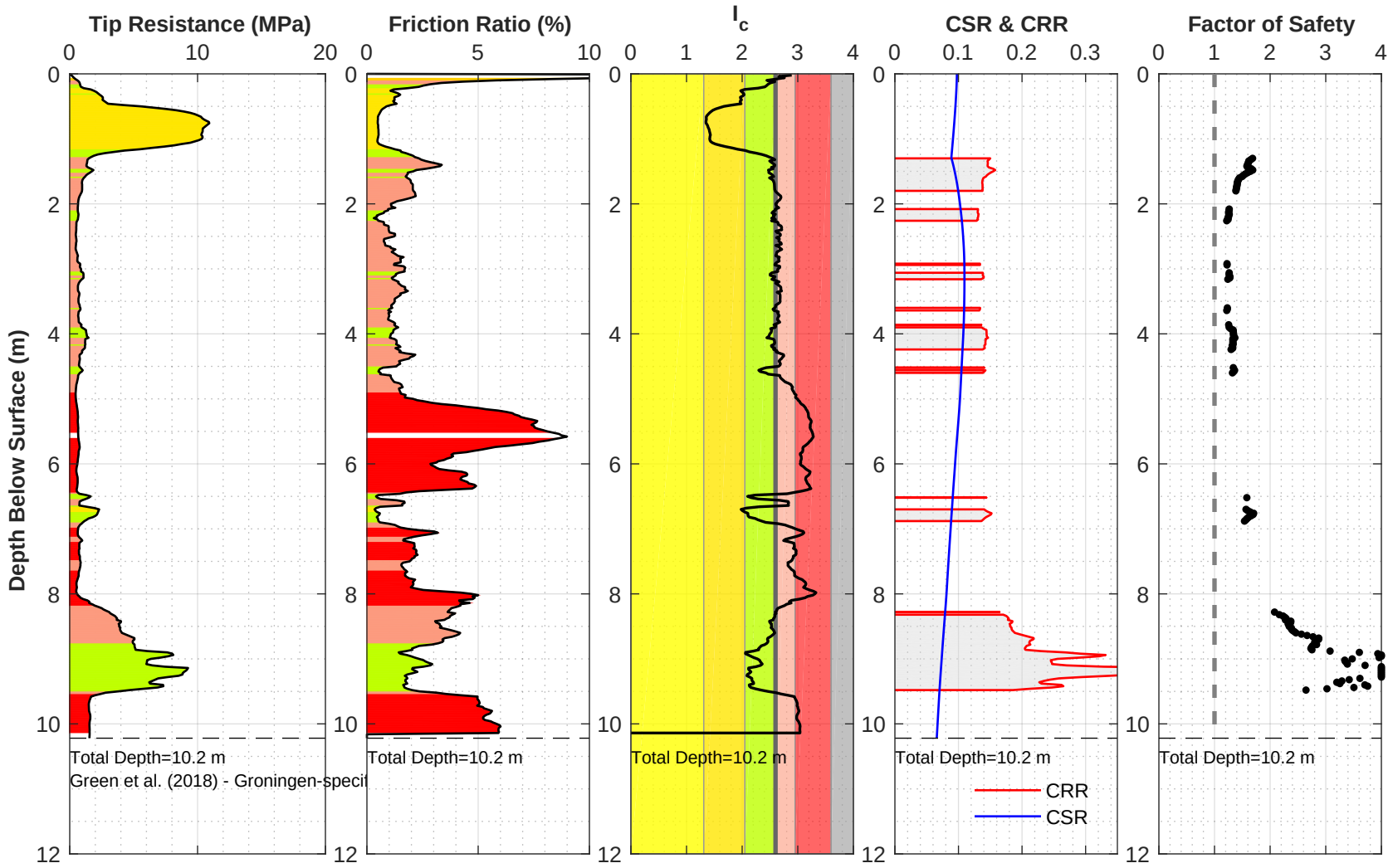
Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



Green et al. (2018) - Groningen-specific

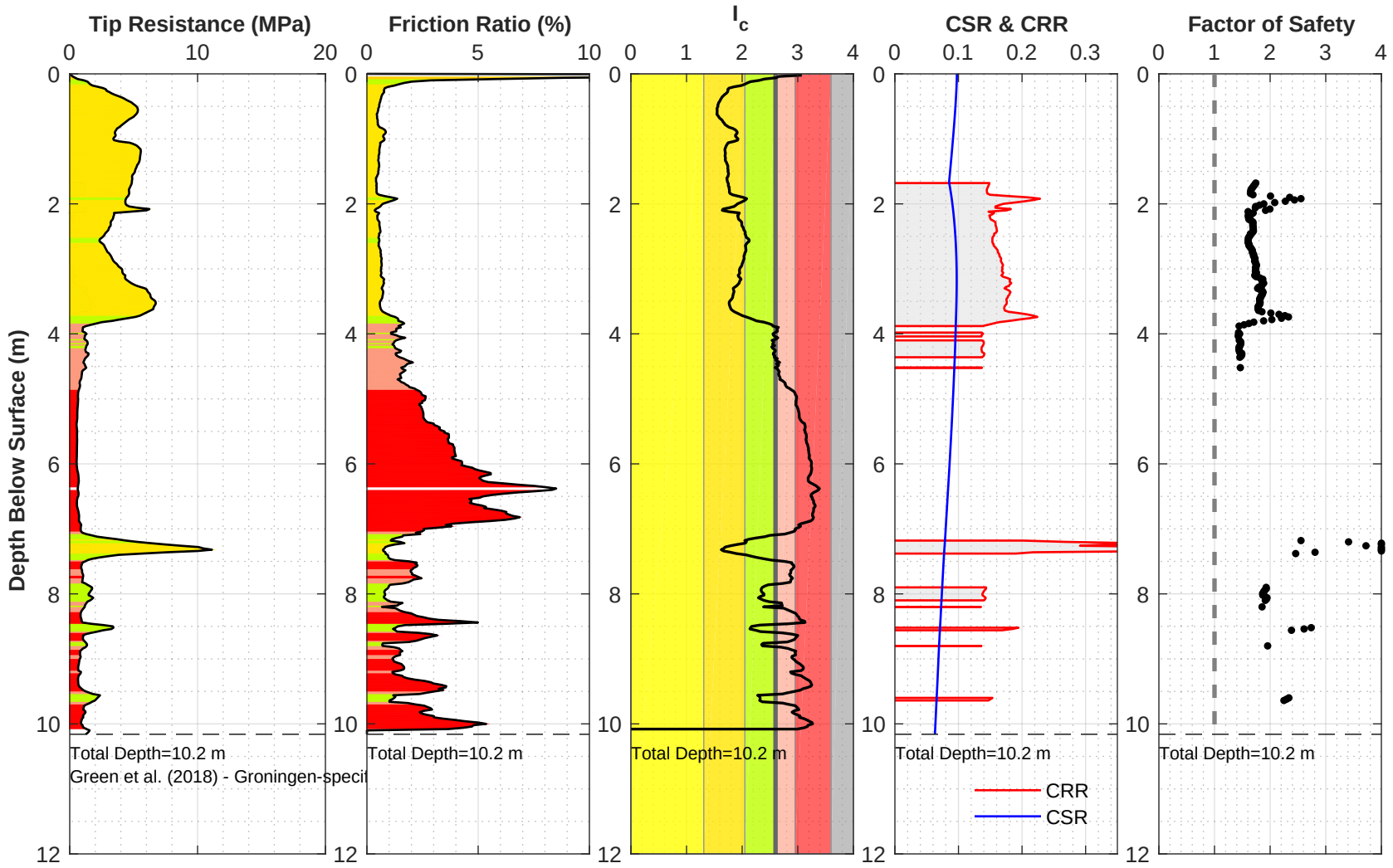
Location: 21225_239_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



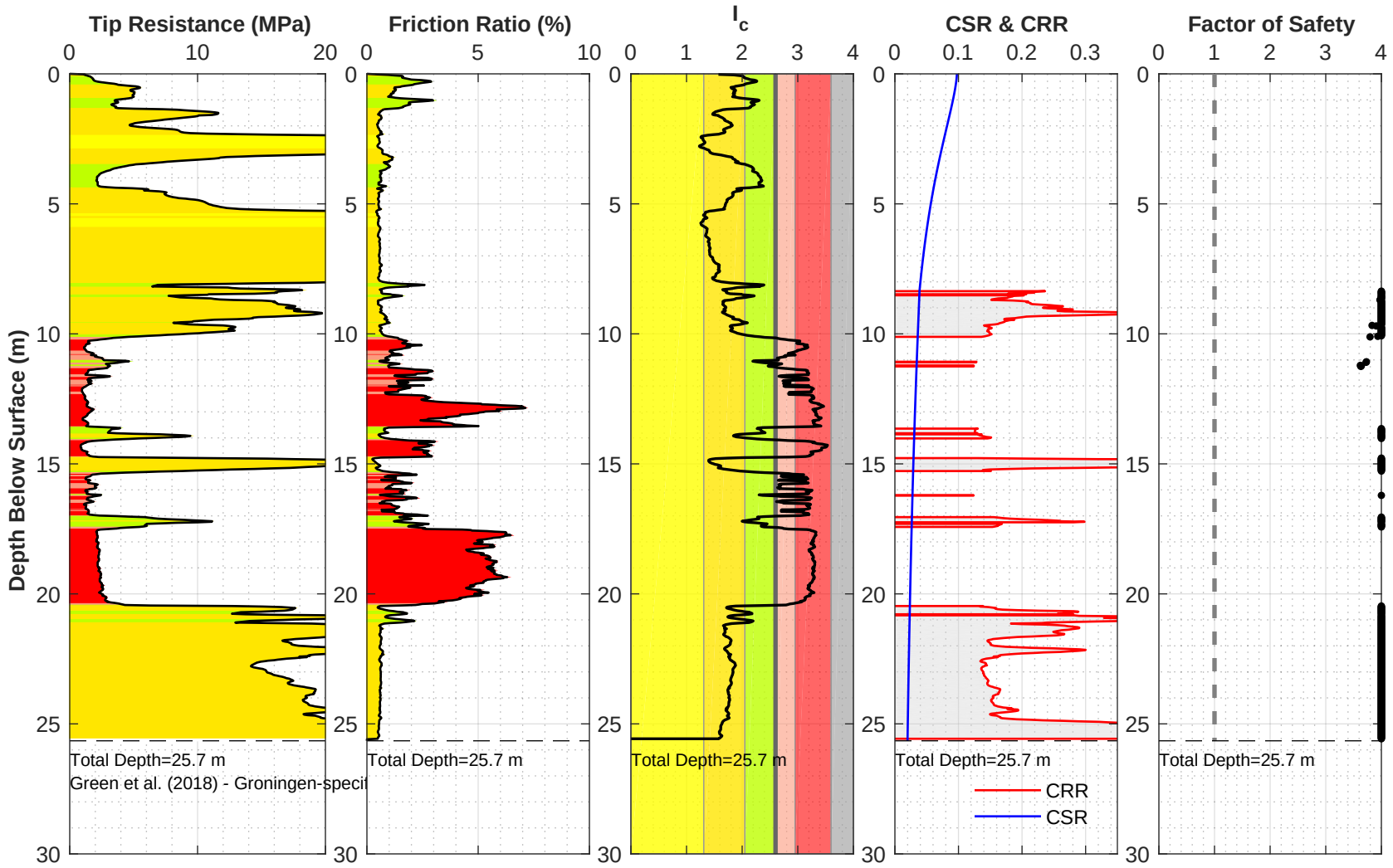
Location: 21225_240_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



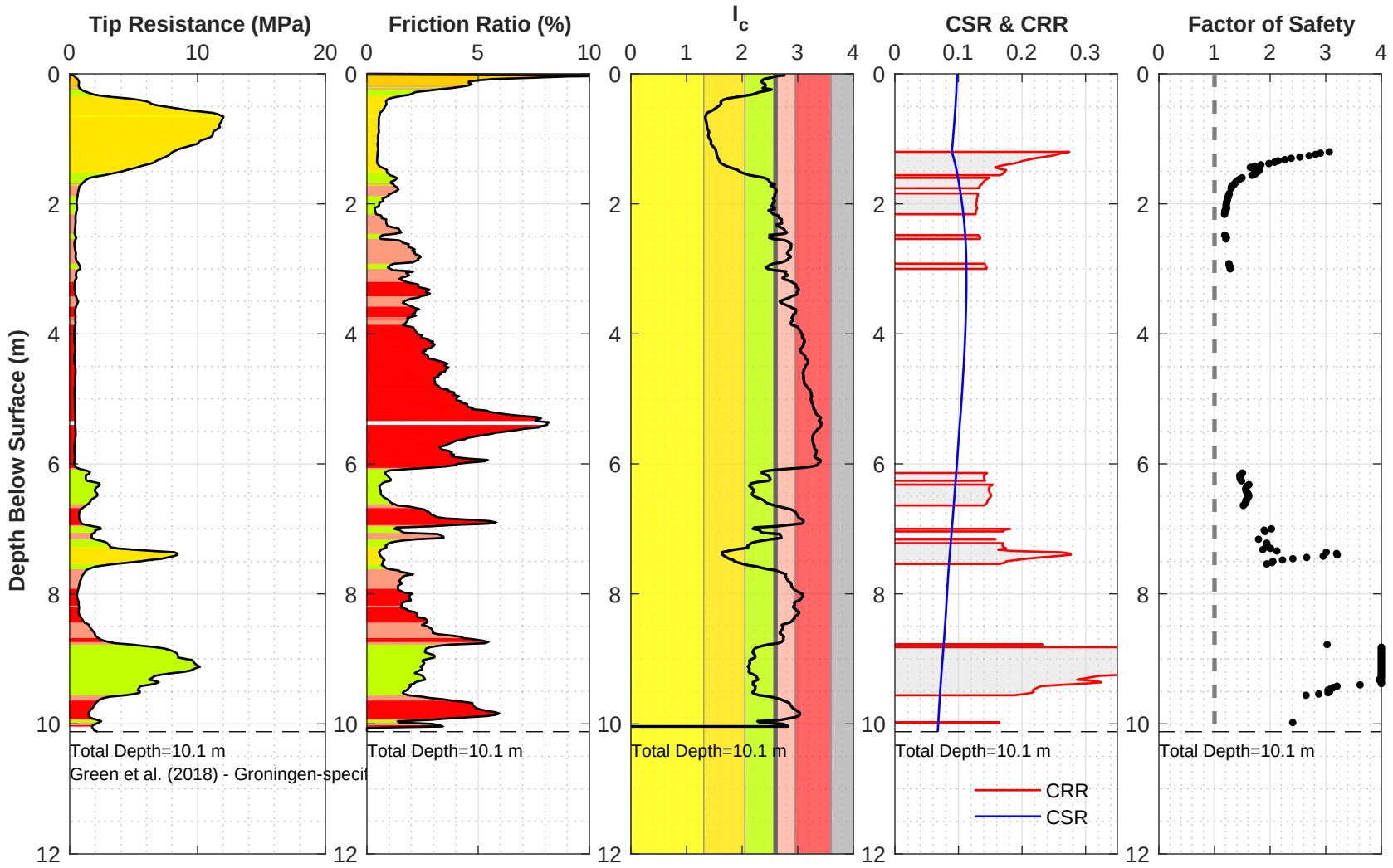
Location: 21225_241_coord
Surface EL: 2.2 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



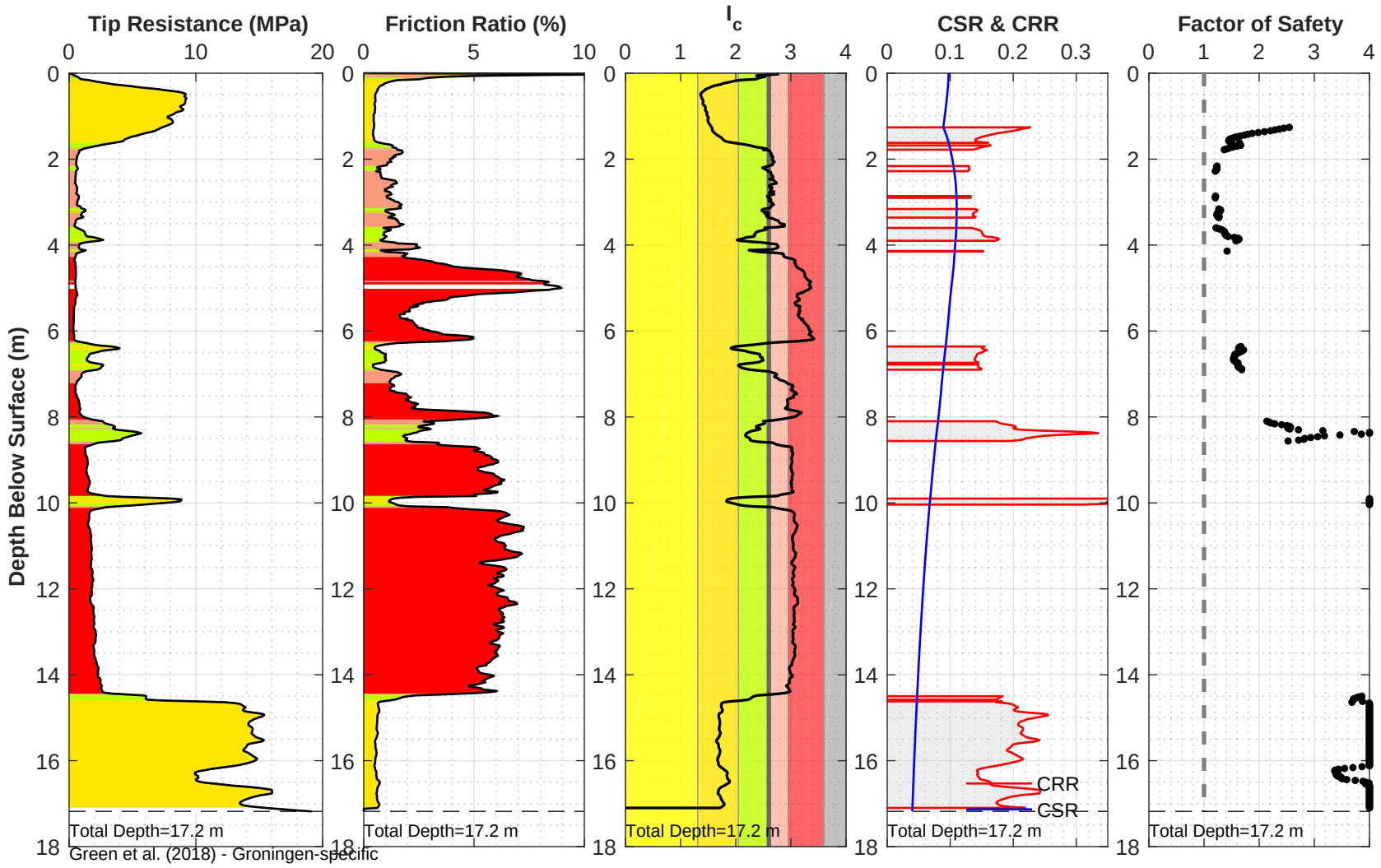
Location: 21225_242_coord
Surface EL: 8.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



Location: 21225_243_coord
Surface EL: 1.7 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15



Location: 21225_244_coord
Surface EL: 1.8 m +/- (NAP)
Cone Diameter: 43.7 mm

Thin Layer Correction: NCEER (Youd et al. 2001)
Analysis Title: NC
Mw: 3.9 amax (g): 0.15

Ministerie van Infrastructuur en Milieu

> Retouradres Postbus 20904 2500 EX Den Haag

Waterschap Noorderzijlvest
T.a.v. De heer W.F. Brenkman
Postbus 18
9700 AA GRONINGEN

Bestuurskern
Dir. Algemeen Waterbeleid en Veiligheid
Afd. Waterveiligheid

Den Haag
Postbus 20904
2500 EX Den Haag

Contactpersoon
J. Poot
Senior Beleidsmedewerker

T 070-4567993
Koos.Poot@minienm.nl

Ons kenmerk
IENM/BSK-2017/172122

Uw kenmerk
Z/17/007036

Bijlage(n)
-

Datum 19 juli 2017
Betreft technische uitgangspunten voor belasting en sterkte van primaire keringen bij aardbevingen

Geachte heer Brenkman,

In uw brief van 22 juni 2017 verzoekt u mij, mede namens het waterschap Hunze en Aa's, in te stemmen met de in de memo "Eemshaven-Delfzijl - Uitgangspunten voor een aardbevingsbestendig ontwerp" vastgelegde technische uitgangspunten voor de belasting en sterkte van de primaire waterkering onder invloed van aardbevingen.

In mijn brief van 21 april 2016 heb ik ingestemd met de memo "Uitgangspunten voor een aardbevingsbestendig dijkontwerp" van Deltares van 15 april 2016. Op dat moment zou nog onderzoek plaatsvinden naar het al dan niet verweken van de ondergrond en de invloed daarvan op het versterken van de dijk. Als de verkregen inzichten daartoe aanleiding gaven, zouden de uitgangspunten worden aangevuld en/of aangescherpt.
In uw brief van 15 september 2016 heeft u mij geïnformeerd over de stand van zaken van de lopende onderzoeken naar de gevoeligheid van de ondergrond voor verweking.
Naar aanleiding van het uitgevoerde onderzoek adviseerden experts in november 2016 op een tweetrapsbenadering over te gaan:

1. Een globaal onderzoek van het gehele dijkvak om potentieel onvoldoende betrouwbare delen in beeld te krijgen.
2. Een geavanceerde analyse van de potentieel onvoldoende betrouwbare delen om te bepalen of deze wel of niet aan de veiligheidsnormen voldoen.

De uitvoering van deze aanpak is begeleid door een specialist op het gebied van risicoanalyse en het probabilistisch ontwerp van waterkeringen en gereviewd door een Amerikaanse specialist in het geotechnisch ontwerpen onder invloed van aardbevingen en een Nederlandse specialist op het vlak van het grondmechanisch ontwerp van dijken.
Het onderzoek en de analyses hebben geleid tot aanpassingen van de eerder opgestelde uitgangspunten. Met uw brief van 22 juni 2017 heeft u mij de geactualiseerde memo van 15 juni 2017 "Uitgangspunten voor een aardbevingsbestendig ontwerp" toegezonden.
Met de uitgangspunten in deze memo kan ik instemmen.

In de regeling "Veiligheid primaire waterkeringen 2017" is opgenomen dat bij de beoordeling van de veiligheid van de in Noord-Nederland gelegen waterkeringen

rekening gehouden dient te worden met de belasting door geïnduceerde aardbevingen. Deze beoordeling is een toets op maat. Daarbij kan gebruik gemaakt worden van de in de notitie van 15 juni 2017 opgenomen uitgangspunten.

De uitgangspunten voor een aardbevingsbestendig ontwerp zijn door intensief onderzoek en overleg door uw waterschap, de NAM, adviseurs en de Nationaal Coördinator Groningen tot stand gekomen. Ik heb veel waardering voor de wijze waarop deze partijen, ondanks de verschillende achtergronden, er in geslaagd zijn een gedeeld antwoord op dit, voor Nederland nieuwe vraagstuk, te vinden.

De Nationaal Coördinator Groningen, Hans Alders, de projectdirecteur bij de NAM, Thijs Jurgens, en Harm Küpers, secretaris-directeur waterschap Hunze en Aa's, heb ik een afschrift van deze brief doen toekomen.

Met vriendelijke groet,

DIRECTEUR-GENERAAL RUIMTE EN WATER, (plv.)

drs. P.R. Heij

Bestuurskern
Dir. Algemeen Waterbeleid en Veiligheid
Afd. Waterveiligheid

Datum
19 juli 2017

Ons kenmerk
IENM/BSK-2017/172122

Memo

Aan
Walja Karten (Waterschap Noorderzijlvest)

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
15 juni 2017	1220173-040-GEO-0011	31

Van	Doorkiesnummer	E-mail
Arjan Venmans	+31(0)88335 7263	arjan.venmans@deltares.nl

Onderwerp
Eemshaven-Delfzijl - Uitgangspunten voor een aardbevingsbestendig ontwerp

---

1 Inleiding

Vanwege de aardbevingen in Groningen heeft waterschap Noorderzijlvest een versnelde verbetering ingezet van de zeedijk tussen Eemshaven en Delfzijl. De reguliere toets- en ontwerpvoorschriften houden geen rekening met aardbevingen. Daarom heeft het waterschap in 2014 een onderzoeks- en afwegingstraject gestart, in samenwerking met Deltares. Het doel is om te komen tot een vastgestelde set van te hanteren uitgangspunten voor een sober en doelmatig aardbevingsbestendig ontwerp. Een dergelijk ontwerp biedt voldoende veiligheid tegen overstroming, maar is niet onnodig conservatief. De uitgangspunten worden vastgesteld door het Rijk, als kadersteller en toezichthouder. Daarmee geeft het Rijk duidelijkheid en zekerheid aan het waterschap als keringbeheerder en aan de NAM als financier van de meerkosten voor aardbevingsbestendigheid. Het in 2014 gestarte traject heeft in oktober 2016 geleid tot een eerste beoordelings- en ontwerpprotocol voor de zeedijk, inclusief een onderliggend uitgangspuntendocument. Naar aanleiding van de aanbevelingen van een panel van internationale experts in november 2016 (bijlage A) is eind 2016 aan dit traject een tweede spoor toegevoegd bestaande uit dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses, uitgevoerd door Fugro. Hiervoor is in de periode tussen eind 2016 en maart 2017 een nieuwe beoordelings- en ontwerpmethode ontwikkeld, die bestaat uit twee stappen:

1 Een screening langs de hele zeedijk naar de gevoeligheid voor verweking van de grondslag onder de dijk, op basis van de Liquifaction Potential Index (LPI, Iwasaki et al., 1978).
2 Berekening van de kruindaling in de profielen die volgens de LPI screening maatgevend zijn, op basis van dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses.

In het oorspronkelijke protocol en uitgangspuntendocument van oktober 2016 was screening nog geen aparte stap.

Jongejan et al. (2017) beschrijft de de procedure voor semi-probabilistisch ontwerp met dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses (bijlage D).

Tijdens het traject heeft het waterschap diverse nationale en internationale deskundigen geraadpleegd:

- Expertise netwerk Waterkeren (ENW): schriftelijke raadpleging betreffende versie 2 van dit uitgangspuntenmemo, maart 2015.
- Expert workshop seismisch ontwerp: experts Boulanger, Chacko, Finn, Yoshida, juli 2015.
- Expert workshop terugkeertijd aardbevingsbelasting: experts Vrouwenvelder, Jongejan, Kok, Vrijling, Calle, december 2015.
- Tweede expert workshop terugkeertijd aardbevingsbelasting: experts Vrouwenvelder, Jongejan, Kok, Vrijling, Calle, december 2015.
- Expert workshop karakterisering van de verwekingsgevoeligheid: experts Towhata, Green, Kramer, mei 2016.
- Expert workshop seismisch ontwerp: experts Kramer, Green, Chacko, Towhata, november 2016, bijlage A.
- Review van LPI screening, dynamische gekoppelde effectieve spanningsberekeningen en code calibration van deze berekeningen door prof. Kramer, bijlage B.
- Review van code calibration van dynamische gekoppelde effectieve spanningsberekeningen door dr. Calle, bijlage C.

Verder heeft het waterschap alle betrokken publieke partijen tussentijds geïnformeerd door middel van een drie keer geactualiseerde uitgangspuntennotitie voor zowel primaire als regionale keringen (Deltares, 2015). Elke versie is besproken tijdens door het waterschap georganiseerde informatiebijeenkomsten.

De uitgangspunten en het protocol voor een regulier ontwerp voor hoogwaterbelasting zijn al vastgelegd in het document “Ontwerpuitgangspunten Hoogwateropgave Dijkverbetering Eemshaven-Delfzijl” (Deltares, 2016a). In het voorliggende document worden alleen de extra uitgangspunten voor een aardbevingsbestendig ontwerp behandeld. De extra uitgangspunten worden beschreven in:

- Veiligheidsfilosofie en terugkeertijd: het rapport “Code calibration for coupled, effective stress FEM-assessments of the primary flood defenses at Eemshaven-Delfzijl” (Jongejan et al., 2017).
- De wijze waarop de weerstand tegen verweking van het zand wordt bepaald in de LPI screening: “LPI screening for the Eemshaven-Delfzijl levee” (Deltares, 2017).
- De wijze waarop de weerstand tegen verweking van het zand wordt bepaald in de dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses: het rapport “Code calibration for coupled, effective stress FEM-assessments of the primary flood defenses at Eemshaven-Delfzijl” (Jongejan et al., 2017).
- Aardbevingsbelasting, effect van de aardbeving op de ondergrond en de waterkering: het rapport “Evaluation of dynamic stability using code calibrated design parameters, Eemshaven-Delfzijl levee, The Netherlands” (Fugro, 2017).
- Kruindalingscriterium: appendix I.2 van het protocol “Seismisch Dijkontwerp – Protocol voor Eemshaven-Delfzijl” (Deltares, 2016b).

In paragraaf 2 is het overzicht opgenomen van de voorgestelde ontwerpuitgangspunten waarvoor vaststelling wordt gevraagd. In paragraaf 3 worden de voorgestelde ontwerpuitgangspunten nader toegelicht. Daarbij wordt achtereenvolgens ingegaan op:

- De te hanteren aardbevingsbelasting als functie van de terugkeertijd.
- Het te berekenen effect van de aardbeving op de ondergrond en de waterkering.
- De te hanteren veiligheidsfilosofie, waaruit ook de terugkeertijd voor de aardbevingsbelasting volgt.
- De wijze waarop de weerstand tegen verweking van het zand wordt gekarakteriseerd in de LPI screening en in de dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses.

2 Overzicht voorgestelde ontwerpuitgangspunten

Kansverdeling aardbevingsbelasting

1 De door NAM geproduceerde en door KNMI gevalideerde resultaten uit de PSHA versie 2 “op maat” worden gebruikt voor het dijkontwerp, met als grondslag het GMPE v2 model met specifieke keuze voor M_{max} (M_{max}=5,0) en logic-tree gewichten (0; 0,5; 0,5).

Effect van aardbevingsbelasting op ondergrond en waterkering

2 De responsberekening bestaat uit twee stappen:
   1 Van een diepte van 350 m tot bovenkant Peelo formatie: 1D berekening met de *Total Stress, Equivalent Linear* rekenmethode.
   2 Van bovenkant Peelo formatie tot maaiveld: 2D berekening met dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses.

3 De voor waterveiligheid relevante vervormingen tijdens en na de aardbeving worden bepaald met dynamische gekoppelde effectieve spanningsberekeningen.

Veiligheidsfilosofie

4 Het aardbevingsbestendig ontwerp vindt plaats op basis van een semi-probabilistische procedure. Door middel van rekenwaarden voor sterkte en belasting(en) wordt ervoor gezorgd dat de faalkans beneden de normwaarde (een op basis van de norm bepaalde toelaatbare waarde) blijft. Daarbij wordt rekening gehouden met de onwaarschijnlijkheid dat extreme waarden voor sterkte en belasting(en) tegelijk zullen voorkomen. Daarop aansluitend dient een dominante aardbevingsbelasting (met hoge terugkeertijd) te worden gecombineerd met een niet-dominante hydraulische belasting (met minder hoge terugkeertijd) en omgekeerd. Daarnaast moet ook het klassieke geval met alleen maatgevend hoogwater worden beschouwd. Bij elke te onderscheiden belastingcombinatie moet de kering voldoen aan de eis.

5 De invloedsfactor voor een dominante aardbevingsbelasting is 0,9. De invloedsfactor voor een dominante hydraulische belasting is 0,7.

6 Het faalkansbudget voor macrostabiliteit wordt verhoogd van 4 naar 24 %. Het faalkansbudget voor piping wordt dienovereenkomstig verlaagd van 24 naar 4 %.

7 Bij aardbevingen wordt het lengte-effect in rekening gebracht zoals beschreven in Jongejan et al. (2017). De parameters waarmee het lengte-effect wordt beschreven zijn a = 0,033 en b = 200 m.

8 Na significante vervormingen van de dijk als gevolg van een aardbevingsbelasting wordt gedurende de hersteltijd een voorwaardelijke kans van 1/10 op overstroming aangenomen.

9 Een voorwaardelijke overstromingskans van 1/10 leidt op grond van representatieve overslagberekeningen gedurende een hersteltijd van 3 maanden tot een maximaal toelaatbare kruindaling van 3 m.

10 Jongejan et al. (2017) beschrijft de procedure voor semi-probabilistisch ontwerp en de daarin toe te passen partiële veiligheidsfactoren voor alle van belang zijnde stochastische variabelen.

Weerstand tegen verweking in de LPI screening en in de dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses

11 Een CPT datapunt wordt als zand geclassificeerd als de *soil type behaviour index* I_c volgens (Robertson & Wride, 1998) kleiner of gelijk is aan 2,6.

12 Rond discrete overgangszones zand/klei wordt over 0,2 m de conuswaarde in de zandlaag gecorrigeerd.

13 De weerstand tegen verweking wordt berekend op basis van:
- correlaties met sonderingen volgens Boulanger & Idriss (2014) in afzettingen die bestaan uit zand, al dan niet afgewisseld met relatief dikke kleilagen, waarin de I_c waarde kleiner is dan 2,05.
- cyclische laboratoriumproeven op ongeroerde monsters in afzettingen die bestaan uit een afwisseling van relatief dunne zand- en kleilaagjes, waarin de de I_c waarden tussen 2,05 en 2,6 liggen (afzettingen van het *Tfsc* type).

14 In de screening wordt de LPI bepaald op basis van alle data punten in de sondering met I_c kleiner dan of gelijk aan 2,6. Appendix G van Jongejan (2017) beschrijft de bepaling van de representatieve waarde van de conusweerstand en de weerstand tegen verweking voor de dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses.

15 Op de genormaliseerde conusweerstand wordt een *fines* toeslag toegepast om te corrigeren voor het gunstige effect van het gehalte fijne fractie volgens Boulanger and Idriss (2014), met $CFC = 0$.

16 De magnitude scaling factor wordt bepaald volgens Boulanger and Idriss (2014).

17 De correctiefactor voor de verticale spanning K_σ en de correctiefactor voor statische schuifspanning K_α voor zand in taluds worden bepaald volgens Boulanger & Idriss (2014). In de LPI screening op basis van de sonderingen aan de zeezijde van de dijk wordt gerekend met $K_\alpha = 1$.

18 Voor de correctiefactor voor de leeftijd van de afzettingen K_{DR} wordt voor de relatief jonge holocene afzettingen een waarde 1 aangehouden, voor het pleistocene zand een waarde van 1,3.

3 Toelichting voorgestelde ontwerpuitgangspunten

3.1 Aardbevingsbelasting

De te hanteren aardbevingsbelasting heeft een overheersende invloed op het aardbevingsbestendig ontwerp van waterkeringen en andere objecten.

De kansverdeling wordt afgeleid uit een zogenaamde *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA). Hierna wordt kort beschreven voor welke PSHA versies door KNMI en NAM al resultaten zijn geleverd en welke specifieke vervolgontwikkeling heeft plaatsgevonden voor Eemshaven-Delfzijl.

Van 16 tot en met 18 juli 2015 heeft het waterschap vijf gerenommeerde internationale experts geconsulteerd op het gebied van *Geotechnical Earthquake Engineering*. De voornaamste aanbeveling van die kant was om in dialoog met NAM en KNMI te komen tot een PSHA “op maat” voor de waterkeringen. “Op maat” wil zeggen dat uit de PSHA aardbevingssignalen op diepte worden bepaald, bij de juiste terugkeertijd. Met deze aardbevingssignalen kan vervolgens weer de seismische respons van de dijk worden bepaald. Met hulp van dergelijke responsberekeningen worden piekversnellingen aan maaiveld begrensd door de beperkte sterkte van bovenste grondlagen. Daardoor resulteert minder aardbevingsbelasting op de waterkering die boven op deze grondlagen ligt.

PSHA versie 0 van KNMI. Tot en met juli 2015 is voor de waterkeringen gewerkt met de resultaten van een PSHA versie 0. Deze versie 0 is in 2013 opgezet door KNMI, voor NEN, in samenwerking met NAM (KNMI, 2013). Versie 0 is opgezet voor de in februari 2015 uitgekomen Nationale Praktijkrichtlijn (NPR) van de NEN (NEN, 2015). Deze NPR is alleen van toepassing op gebouwen. Versie 0 levert voor elke locatie een kansverdeling op voor de piekversnelling aan het maaiveld (*Peak Ground Acceleration,* PGA). In versie 0 is een maximum magnitude van 5 aangenomen en een gemiddeld jaarlijks aantal significante bevingen van 40. In maart 2015 is voor het dijkontwerp al voorzichtig geanticipeerd op ontwikkelingen in volgende PSHA versies, door te kiezen voor 27 significante aardbevingen per jaar.

PSHA versie 1 van KNMI. Oktober 2015 heeft KNMI versie 1 openbaar gemaakt (KNMI, 2015). Versie 1 is gebruikt voor een update van de NEN-NPR kaart, die in december 2015 is uitgebracht. Het gebruikte seismologisch model is weer opgezet in samenwerking met NAM. Ook in versie 1 is door KNMI een maximum magnitude van 5 aangenomen, in combinatie met een significant aantal jaarlijkse aardbevingen van 22,7. Direct vanaf de beschikbaarheid is versie 1 binnen het lopende referentieontwerp in gebruik genomen voor de seismische responsberekeningen van de dijk Eemshaven-Delfzijl. Gebruik van dergelijke responsberekeningen is aanbevolen door de internationale experts. Daartoe worden in Groningen gemeten aardbevingssignalen geschaald naar rato van de ontwerpwaarden aan het maaiveld, nadat deze signalen eerst op de meetlocatie naar diepte zijn vertaald.

PSHA versie 2 van NAM. Begin november 2015 heeft NAM de resultaten van PSHA versie 2 aan de minister van EZ opgeleverd, waarna halfjaarlijks updates zullen volgen (NAM, 2015). De PSHA is opgezet voor gebouwen en levert alleen informatie voor een terugkeertijd van 475 jaar. In versie 2 wordt voor het eerst onderscheid gemaakt tussen de versnellingen op

diepte en de daarmee locatie-specifiek bepaalde versnellingen aan maaiveld, rekening houdend met lokale grondcondities.

PSHA versie 2 "op maat" voor Eemshaven-Delfzijl. Op 7 december 2015 heeft NAM de PSHA "op maat" voor Eemshaven-Delfzijl opgeleverd (Bommer & Bourne, 2015), zoals aanbevolen door de experts. In aansluiting op de KNMI keuze voor versie 1 is daarbij een maximum magnitude van 5 gehanteerd. Ten opzichte van versie 1 levert deze analyse voor het eerst direct informatie op diepte, waaruit de benodigde aardbevingssignalen op diepte kunnen worden afgeleid. Dat maakt de met versie 2 bepaalde signalen beter geschikt voor een seismische responsberekening op de door de experts aanbevolen methode dan de met versie 1 bepaalde signalen.

De voor het ontwerp gebruikte versie PSHA versie 2 "op maat" heeft als grondslag het GMPE v2 model met specifieke keuze voor M_{max} (M_{max}=5,0) en logic-tree gewichten (0; 0,5; 0,5). Dit uitgangspunt sluit aan bij de meest actuele (internationale) kennis.

Voorgesteld uitgangspunt voor primaire keringen:

1 De door NAM geproduceerde en door KNMI gevalideerde resultaten uit de PSHA versie 2 "op maat" worden gebruikt voor het dijkontwerp, met als grondslag het GMPE v2 model met specifieke keuze voor M_{max} (M_{max}=5,0) en logic-tree gewichten (0; 0,5; 0,5).

3.2 Effect op ondergrond en waterkering

Macroinstabiliteit (hellinginstabiliteit en verlies van horizontaal evenwicht) en hoogteverlies worden beschouwd als de twee mechanismen met een verhoogde faalkans door aardbevingsbelasting. Als uitgangspunt voor het seismisch ontwerp gelden de methoden en modellen die door de internationale experts zijn geaccordeerd of aanbevolen. Daarom is vanaf september 2015 een overstap gemaakt naar seismische responsberekeningen op basis van versnellingssignalen op diepte, in plaats van direct gebruik van piekversnellingen aan maaiveld.

Hierna volgt voor de te hanteren methoden en modellen een samenvatting van de relevante uitgangspunten.

Seismische responsberekening. De responsberekening bestaat uit twee stappen:

1 Van een diepte van 350 m tot bovenkant Peelo formatie: 1D berekening met de *Total Stress, Equivalent Linear* rekenmethode. *Total Stress* wil zeggen dat het constitutieve model niet zelf de generatie van waterspanningen voorspelt (in tegenstelling tot *Effective Stress*).
2 Van bovenkant Peelo formatie tot maaiveld: 2D berekening met dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses.

Het gebruik van de *Total Stress, Equivalent Linear* rekenmethode is in overeenstemming met de aanbevelingen van de expertgroepen:

- Expertbijeenkomst juli 2015: het versnellingssignaal ter plaatse van het dijklichaam en het cyclisch schuifspanningsverloop over de diepte dient te worden bepaald met 1D *Total Stress* responsberekeningen

- Expertbijeenkomst 12 en 13 mei 2016: een verwekingsanalyse volgens Boulanger & Idriss (2014) moet om consistentieredenen worden gecombineerd met een schuifspannings-verloop dat is bepaald met de *equivalent linear* methode.

De *equivalent linear* methode behelst een analyse in het frequentiedomein. Dit geeft de mogelijkheid om zowel van basis naar maaiveld te rekenen (convolutie), als ook andersom (deconvolutie). De niet-lineaire stijfheid en demping als functie van schuifrek worden op benaderende wijze in rekening gebracht door iteratieve aanpassing van de waarde die geldt voor de hele berekening. Vanwege deze aanpak zal deze software in het algemeen echter te veel demping introduceren bij hogere frequenties in combinatie met schuifrekniveaus vanaf 0,4 %. In die gevallen is voor het berekenen van de versnelling in principe een *Nonlinear* analyse in het tijdsdomein nodig.

Een alternatieve *Nonlinear* analyse zou worden uitgevoerd het tijdsdomein (bijvoorbeeld met de Deepsoil software). Dit biedt de mogelijkheid om per tijdstap een andere waarde voor demping en stijfheid te gebruiken. De Deepsoil software gebruikt daarbij dezelfde materiaalkarakterisering als voor een analyse in het frequentiedomein. In een “nonlinear” berekening met Deepsoil is elke laag in feite een element waarbinnen de schuifrekken en schuifspanningen als constant worden beschouwd. De versnellingen worden berekend op de randen van de elementen. De elementafmetingen moeten. handmatig worden beperkt om de beweging van schuifgolven te kunnen volgen, zoals beschreven in de Deepsoil handleiding (Hashash, 2015).

Bij verkennende berekeningen met de specifieke frequentieinhoud van de aardbevingssignalen voor Eemshaven-Delfzijl (Deltares, 2016c) bleek de equivalent linear methode echter altijd het meest conservatief, ook bij schuifrekniveaus boven 0,4 %. Daarom is gebruik van de *equivalent linear* methode in dit geval voldoende voor zowel de bepaling van het schuifspanningsverloop als ook voor de bepaling van de versnellingen van het dijklichaam.

Volgens NPR 9998 moeten in de responsberekening als belasting minimaal zeven verschillende aardbevingssignalen worden aangebracht. Overeenkomstig het review advies van prof. Kramer zijn elf verschillende aardbevingssignalen toegepast.

Jongejan et al. (2017) geeft de partiële factor die moet worden toegepast op de signalen aan de basis van de 2D modellen.

Vervormingsberekening tijdens en na de aardbeving. Conform het advies uit de expert workshop van november 2016 (bijlage A) wordt de kruindaling berekend met dynamische gekoppelde effectieve spanningsberekeningen.

Voorgestelde uitgangspunten voor primaire keringen:

2 De responsberekening bestaat uit twee stappen:
   1 Van een diepte van 350 m tot bovenkant Peelo formatie: 1D berekening met de *Total Stress, Equivalent Linear* rekenmethode.
   2 Van bovenkant Peelo formatie tot maaiveld: 2D berekening met dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses.
3 De voor waterveiligheid significante vervormingen tijdens en na de aardbeving worden bepaald met dynamische gekoppelde effectieve spanningsberekeningen.

3.3 Veiligheidsfilosofie

De binnen een semi-probabilistisch ontwerp te hanteren terugkeertijd voor de aardbevingsbelasting volgt uit de faalkanseis voor een bepaald mechanisme in een doorsnede, in combinatie met een zogenaamde invloedsfactor voor de aardbevingsbelasting. De faalkanseis in de doorsnede is weer afhankelijk van de norm, de faalkansbegroting en het in rekening te brengen lengte-effect. Door middel van een reststerkte-aanname kan ten slotte rekening worden gehouden met de kans op overstroming gedurende de herstelperiode. Hierna wordt kort toegelicht wat deze begrippen en parameters betekenen en welke uitgangspunten op dat gebied worden voorgesteld. De uitgangspunten zijn eerst bijgesteld en daarna vastgesteld in overleg met een nationale expertgroep die is bijeengekomen op 9 december 2015 en op 17 februari 2016. De veiligheidsfilosofie wordt nader beschreven en onderbouwd in Jongejan et al. (2017).

Vooraf wordt hier al gemeld dat toepassing van de voorgestelde uitgangspunten voor macrostabiliteit (afschuiven) op traject 6_7 resulteert in een terugkeertijd van ongeveer 2300 jaar en op traject 6_6 in een terugkeertijd van ongeveer 1100 (Jongejan et al., 2017, paragraaf 8.1).

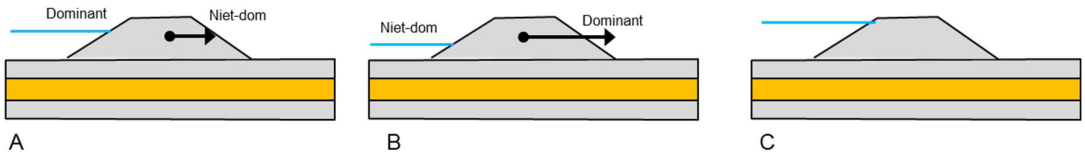
Mechanismen. Een aardbeving kan hoogteverlies en andere schade (losgeraakte bekleding, scheuren) veroorzaken. Daarbij is het van belang dat zich onder invloed van de cyclische aardbevingsbelasting in losgepakt zand tijdelijk een grote verwekingsgraad kan opbouwen, door wateroverspanning. Volledig verweekt zand gedraagt zich als drijfzand. Hoogteverlies en schade worden dus zowel veroorzaakt door macro-instabiliteit (taludinstabiliteit en verlies van horizontaal evenwicht) als door eerst wegpersen en daarna compacteren van verweekt zand. De gebeurtenissen kunnen gelijktijdig voorkomen, maar dat hoeft niet. Grote afschuiving en kruindaling zal vooral ontstaan wanneer ondiepe losgepakte zandlagen door de cyclische belasting verweken, zonder dat er vervormingsbeperkende maatregelen zijn genomen.

Figuur 3.1 Macroinstabiliteit en kruindaling door aardbeving, onder invloed van verweking

Ontwerpstappen. Ter beoordeling van de aardbevingsbestendigheid moeten de volgende drie stappen worden doorlopen:

1 Bepaal de in rekening te brengen versnellingssignalen tussen 350 m diepte en bovenkant Peelo formatie met hulp van 1D *Equivalent Linear* responsberekeningen. Maak hierbij gebruik van gegeven versnellingssignalen aan de basis, afgeleid uit PSHA versie 2 “op maat” (zie paragraaf 3.1).
2 Bereken de versnellingssignalen tussen de bovenkant van de Peelo formatie en het dijklichaam uit 2D dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses.
3 Bepaal het benodigde ontwerp om te voldoen aan de eis aan de kruindaling van de dijk tijdens en direct na de aardbeving. Dit dient te gebeuren met dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses onder invloed van de versnellingssignalen. De ontwerpmaatregelen kunnen bestaan uit (een combinatie van) extra berm, drainage, stabiliteitsscherm en verbetering van losgepakt zand.

Semi-probabilistisch ontwerp. Het voorgeschreven ontwerpinstrumentarium 2014 (OI2014) gaat uit van een semi-probabilistisch ontwerp per mechanisme en doorsnede. Door middel van rekenwaarden voor sterkte en belasting(en) wordt er voor gezorgd dat de faalkans beneden de normwaarde blijft. Daarbij wordt rekening gehouden met de onwaarschijnlijkheid dat extreme waarden voor sterkte en belasting(en) tegelijk zullen voorkomen. Daarop aansluitend dient een dominante aardbevingsbelasting (met hoge terugkeertijd) te worden gecombineerd met een niet-dominante hydraulische belasting (met minder hoge terugkeertijd) en omgekeerd (CUR, 1997). Daarnaast moet ook het klassieke geval met alleen maatgevend hoogwater worden beschouwd. Vervolgens wordt ontworpen op het meest ongunstige geval binnen deze drie belastinggevallen. Voor de niet-dominante hydraulische belasting wordt het 1-jaars maximum aangehouden, op basis van het advies uit de expertbijeenkomst van 9 december 2015. De drie te beschouwen gevallen worden getoond in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Schematische weergave van de semi-probabilistisch te toetsen belastinggevallen: In geval A is de hydraulische belasting dominant, in geval B is de aardbevingsbelasting dominant en in geval C is er alleen sprake van een maatgevend hoogwater.

Invloedsfactor. Voor het bepalen van de terugkeertijd voor een dominante en niet-dominante belasting is een waarde nodig voor de zogenaamde invloedsfactor $\alpha_{belasting}$ (CUR, 1997; ISO, 2013). Deze factor geeft aan hoe groot de invloed van de onzekerheid in de belasting is op de faalkans. Hoe groter de $\alpha_{belasting}$, hoe groter de terugkeertijd van de rekenwaarde voor de belasting. Volgens ISO is $\alpha_{belasting}$ = 0.7 een veilige waarde voor een dominante belasting en is $\alpha_{belasting}$ = $0.4 \cdot 0.7$ een veilige waarde voor de daarmee te combineren niet-dominante belasting. Door het ExpertiseNetwerk Waterkeren (ENW) wordt voor aardbevingsbelasting echter de hogere waarde α_{PGA} = 0.9 geadviseerd (ENW, 2014a). Dit is bevestigd door de probabilistische FORM analyses in Jongejan et al. (2017).

Norm. De norm op de waterkering legt wettelijk vast wat de maximaal toelaatbare kans is op verlies van de kerende functie voor een bepaald dijktraject. Hoe groter de norm, hoe groter de terugkeertijd van de rekenwaarde voor de belasting (en dus hoe kleiner de maximaal toelaatbare faalkans). Voor Eemshaven-Delfzijl is in het OI2014 versie 3 een maximaal toelaatbare faalkans (afkeurgrens) vastgelegd voor de faalkans per dijktraject. Deze afkeurgrens bedraagt 1/1000 per jaar voor dijktraject 6_6 en 1/3000 per jaar voor dijktraject 6_7.

Faalkansbudget. In het OI2014 is verder ook een “standaard” faalkansbegroting vastgelegd. Deze legt vast welk deel van de normwaarde beschikbaar is voor dat mechanisme. Hoe kleiner het budget, hoe groter de terugkeertijd van de rekenwaarde voor de belasting. Volgens de standaard begroting is het budget 4% voor macrostabiliteit en 24% voor ontoelaatbare overloop en golfoverslag. Het OI2014 staat het toe om de budgetverdeling voor een heel dijktraject aan te passen. In het geval van Eemshaven-Delfzijl heeft het waterschap er als uitgangspunt voor gekozen om het budget voor macrostabiliteit te verhogen tot 24 %, door middel van een lager budget voor piping (van 24 % naar 4 %). Zo wordt meer ruimte gegeven voor het mechanisme dat bij aardbevingen een verhoogde kans van optreden heeft.

Lengte-effect. Het OI2014 beschrijft hoe de faalkanseis per mechanisme moet worden doorvertaald van de trajectlengte naar de lengte van onafhankelijke doorsneden (lengte-effect). Het lengte-effect brengt tot uitdrukking dat de faalkans voor een lange dijk groter is dan de faalkans voor een korte dijk. Hoe groter het lengte-effect, hoe groter de terugkeertijd. In eerste instantie is op basis van het advies uit de expertbijeenkomst van 9 december 2015 ervoor gekozen om deze parameters niet aan te passen in het geval van een dominante aardbevingsbelasting. Nadere beschouwing van het lengte-effect (Jongejan et al., 2017) heeft geleid tot aanpassing van de parameters. De parameters waarmee het lengte-effect wordt beschreven zijn a = 0,033 en b = 200 m. Op traject 6_7 resulteert dit in een terugkeertijd van ongeveer 2300 jaar en op traject 6_6 in een terugkeertijd van ongeveer 1100 jaar.

Reststerkte. Als uitgangspunt voor het ontwerp van Eemshaven-Delfzijl is een reststerkte-aanname geïntroduceerd bij grote vervormingen door een dominante aardbeving. Dat is gedaan omdat grote vervormingen door een dominante aardbeving niet zullen samenvallen met extreem hoogwater. In analogie met de gangbare praktijk voor buitenwaartse instabiliteit (bij laag water) is de reststerkte uitgedrukt in een voorwaardelijke kans op overstroming na het optreden van schade. Hoe groter de voorwaardelijke kans, hoe groter de terugkeertijd. De voorwaardelijke kans is geschat op 1/10, overeenkomstig de waarde die in de Leidraad Ontwerpen Rivieren wordt aangehouden in het vergelijkbare geval van schade zonder hoogwater door extreme regenval (TAW, 1985; TAW, 1989). Dit wil zeggen dat de terugkeertijd waaronder geen grote vervormingen van de dijk mogen optreden tien keer kleiner wordt aangenomen dan de terugkeertijd waaronder geen overstroming mag optreden.

Stabiliteitscriterium. Er is geen expliciet criterium geformuleerd voor stabiliteit tijdens en direct na de aardbeving. Indien de stabiliteit niet voldoende is zal dit leiden tot grote vervormingen en grote kruindaling, en zal niet worden voldaan aan het kruindalingscriterium. Daarom is de enige toets die plaatsvindt, die van de kruindaling.

Kruindalingscriterium. Uit representatieve overslagberekeningen is gebleken dat bij de voorwaardelijke kans van 1/10 een kruindalingscriterium van 3 m kan worden gehanteerd, indien wordt uitgegaan van een hersteltijd van 3 maanden (Deltares, 2016b, appendix I.2).

Onzekerheid berekeningen. Jongejan et al. (2017) beschrijft de procedure voor semi-probabilistisch ontwerp en de daarin toe te passen partiële veiligheidsfactoren voor alle van belang zijnde stochastische variabelen.

Voorgestelde uitgangspunten voor primaire keringen:

4 Het aardbevingsbestendig ontwerp vindt plaats op basis van een semi-probabilistische procedure. Door middel van rekenwaarden voor sterkte en belasting(en) wordt ervoor gezorgd dat de faalkans beneden de normwaarde (een op basis van de norm bepaalde toelaatbare waarde) blijft. Daarbij wordt rekening gehouden met de onwaarschijnlijkheid dat extreme waarden voor sterkte en belasting(en) tegelijk zullen voorkomen. Daarop aansluitend dient een dominante aardbevingsbelasting (met hoge terugkeertijd) te worden gecombineerd met een niet-dominante hydraulische belasting (met minder hoge terugkeertijd) en omgekeerd. Daarnaast moet ook het klassieke geval met alleen maatgevend hoogwater worden beschouwd. Bij elke te onderscheiden belastingcombinatie moet de kering voldoen aan de eis.

5 De invloedsfactor voor een dominante aardbevingsbelasting is 0,9. De invloedsfactor voor een dominante hydraulische belasting is 0,7.

6 Het faalkansbudget voor macrostabiliteit wordt verhoogd van 4 naar 24 %. Het faalkansbudget voor piping wordt dienovereenkomstig verlaagd van 24 naar 4 %.

7 Bij aardbevingen wordt het lengte-effect in rekening gebracht zoals beschreven in Jongejan et al. (2017). De parameters waarmee het lengte-effect wordt beschreven zijn a = 0,033 en b = 200 m.

8 Na significante vervormingen van de dijk als gevolg van een aardbevingsbelasting wordt gedurende de hersteltijd een voorwaardelijke kans van 1/10 op overstroming aangenomen.

9 Een voorwaardelijke overstromingskans van 1/10 leidt op grond van representatieve overslagberekeningen gedurende een hersteltijd van 3 maanden tot een maximaal toelaatbare kruindaling van 3 m.

10 Jongejan et al. (2017) beschrijft de procedure voor semi-probabilistisch ontwerp en de daarin toe te passen partiële veiligheidsfactoren voor alle van belang zijnde stochastische variabelen.

3.4 Weerstand tegen verweking van het zand

Classificatie van zandlagen. De *soil type behaviour index* I_c volgens (Robertson & Wride, 1998) wordt gebruikt voor het bepalen van de grondsoort die aan een CPT meting is gekoppeld en voor correlaties met de *fines content*. De index wordt uit de conusweerstand en de wrijving berekend. Voor I_c waarden kleiner dan 2,05 mag schoon zand worden verondersteld. Bij I_c waarden tussen 2,05 en 3 is waarschijnlijk sprake van zand/klei overgangen. Deze afzettingen blijken ook lage genormaliseerde conusweerstanden te hebben.

De correlatie tussen de klei fractie (percentage klei lagen) en de gemeten conusweerstand en *soil type behaviour index* I_c voor de Groningse gelaagde afzettingen is nader onderzocht om een grenswaarde vast te stellen tussen zand en klei (Deltares, 2016c). Uit de analyse blijkt dat

er een redelijk duidelijke correlatie bestaat tussen I_c en de klei fractie. Ook blijkt dat een I_c boven de 3 wijst op een pure kleilaag. Dit wijkt af van de waarde van 2,6 die in de meeste literatuur hiervoor wordt genoemd.

Correcties voor zand/klei overgangen en gelaagde afzettingen. Op de overgangen tussen zand en klei wordt de in zand gemeten conusweerstand beïnvloed door de kleilaag aan bovenzijde en onderzijde. De dikte van dergelijke overgangszones is maximaal 0,2 m (Deltares, 2016c). Om deze reden wordt een correctie op de conusweerstand toegepast.

In de LPI screening kan de dunne laag correctie op twee wijzen worden toegepast:

- Volgens de aanbevelingen van NCEER (1997) en Moss et al. (2006). De correctie wordt toegepast op alle potentieel als zand aangemerkte datapunten (met I_c waarden kleiner dan 2,6).
- Door in de eerste en laatste 0,2 m van de zandlaag een conusweerstand en een wrijvingsgetal te hanteren die overeenkomen met het gemiddelde van de volgende/vorige 0,2 m. De correctie wordt toegepast op alle potentieel als zand aangemerkte datapunten in overgangszones (met I_c waarden tussen 2,05 en 2,6).

Uit vergelijking van de gecorrigeerde conusweerstanden zijn geen significante verschillen gebleken die de LPI screening significant beinvloeden.

In de bepaling van de weerstand tegen verweking in de dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses wordt de dunne laag correctie toegepast volgens de aanbevelingen van NCEER (1997) en Moss et al. (2006).

Voor afzettingen van het *Tfsc* type, met regelmatige afwisseling van dunne zand en kleilaagjes, wordt de sterkte onder cyclische belasting niet afgeleid uit de conusweerstand maar uit laboratoriumproeven (Jongejan et al., 2017, appendix D).

Veiligheidsfactor tegen volledige verweking. Door de cyclische aardbevingsbelasting kan tijdelijke verweking ontstaan in losgepakte zandlagen. Verweekt zand gedraagt zich als drijfzand, dat het gewicht van de dijk niet meer kan dragen. De weerstand tegen verweking van het zand wordt bepaald:

- Uit de conusweerstand gemeten in sonderingen in afzettingen die bestaan uit zand of uit afwisselingen van zand met relatief dikke kleilagen, volgens Boulanger & Idriss (2014). Dit model is internationaal gangbaar. Het model is empirisch en gebaseerd op ervaringen met tektonische aardbevingen van verschillende magnitudes.
- Uit cyclische laboratoriumproeven op ongeroerde monsters uit afzettingen die bestaan uit een afwisseling van relatief dunne zand- en kleilaagjes, de zogenaamde gelamineerde wadzand afzettingen.

Representatieve waarde van de genormaliseerde conusweerstand. In de screening wordt de LPI bepaald op basis van alle data punten in de sondering met I_c kleiner dan 2,6.

De bepaling van de representatieve waarde van de conusweerstand en de weerstand tegen verweking voor de dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses gebeurt volgens Jongejan et al. (2017), appendix G.

***Fines* toeslag**. De *fines* toeslag volgens Boulanger and Idriss (2014) wordt toegepast op de conusweerstand, met *CFC* = 0.

Magnitude Scaling Factor. De magnitude scaling factor volgens Boulanger and Idriss (2014) wordt gebruikt.

Correctiefactoren voor de verticale spanning K_σ en statische schuifspanning K_α. De factor K_σ brengt in rekening dat de verwekingsgevoeligheid toeneemt bij een hogere effectieve verticale spanning, en dezelfde relatieve schuifspanningsamplitude CSR. De factor K_σ wordt bepaald volgens (Idriss & Boulanger, 2014).

De correctiefactor voor de statische schuifspanning K_α brengt het effect van de statische schuifspanning op de verwekingsgevoeligheid in rekening. Deze parameter is van belang voor zand in taluds. De LPI screening wordt uitgevoerd op basis van de sonderingen aan de zeezijde van de dijk, waarbij een horizontaal maaiveld wordt verondersteld (α=0). Om deze reden wordt een waarde K_α =1 gehanteerd.

Correctiefactor voor de leeftijd van de afzettingen K_{DR}. De gegevens in de database van Idriss & Boulanger hebben grotendeels betrekking op holoceen zand en jonge zandaanvullingen. Het is aannemelijk dat de bepaling van de $CRR_{7.5}$ vooral wordt bepaald door opgebracht zand met een leeftijd van minder dan 200 jaar. De leeftijd van het pleistocene Boxtel zand is 20.000 jaar en de leeftijd van het pleistocene Peelo zand is 425.000 jaar. De grotere weerstand tegen verweken bij dergelijke hoge leeftijden is in diverse onderzoeken aangetoond, maar is (nog) niet in normen of leidraden opgenomen. De relaties tussen leeftijd en relatieve verwekingsweerstand volgens (Arango & Migues, 1996), (Hayati & Andrus, 2009) en (Green, Maurer, Bradley, Wotherspoon, & Cubrinovski, 2013) zijn vergeleken in (Deltares, 2016c). De relaties volgens (Hayati & Andrus, 2009) en (Green, Maurer, Bradley, Wotherspoon, & Cubrinovski, 2013) zijn vrijwel aan elkaar gelijk. Indien de Green & Maurer functie wordt verschoven zodat de K_{DR} waarde bij een leeftijd van 200 jaar gelijk wordt aan 1, is de waarde bij een leeftijd van 20.000 jaar gelijk aan 1,3.

Voor de relatief jonge holocene afzettingen wordt dient K_{DR}=1 aangehouden.

Voorgestelde uitgangspunten voor primaire keringen:

11 Een CPT datapunt wordt als zand geclassificeerd als de *soil type behaviour index* I_c volgens (Robertson & Wride, 1998) kleiner of gelijk is aan 2,6.

12 Rond discrete overgangszones zand/klei wordt over 0,2 m de conuswaarde in de zandlaag gecorrigeerd.

13 De weerstand tegen verweking wordt berekend op basis van:
- correlaties met sonderingen volgens Boulanger & Idriss (2014) in afzettingen die bestaan uit zand, al dan niet afgewisseld met relatief dikke kleilagen, waarin de I_c waarde kleiner is dan 2,05.
- cyclische laboratoriumproeven op ongeroerde monsters in afzettingen die bestaan uit een afwisseling van relatief dunne zand- en kleilaagjes, waarin de de I_c waarden tussen 2,05 en 2,6 liggen (afzettingen van het *Tfsc* type).

14 In de screening wordt de LPI bepaald op basis van alle data punten in de sondering met Ic kleiner dan of gelijk aan 2,6. Appendix G van Jongejan (2017) beschrijft de bepaling van de representatieve waarde van de conusweerstand en de weerstand tegen verweking voor de dynamische gekoppelde effectieve spanningsanalyses.

15 Op de genormaliseerde conusweerstand wordt een *fines* toeslag toegepast om te corrigeren voor het gunstige effect van het gehalte fijne fractie volgens Boulanger and Idriss (2014), met $CFC = 0$.

16 De magnitude scaling factor wordt bepaald volgens Boulanger and Idriss (2014).

17 De correctiefactor voor de verticale spanning K_σ en de correctiefactor voor statische schuifspanning K_α voor zand in taluds worden bepaald volgens Boulanger & Idriss (2014). In de LPI screening op basis van de sonderingen aan de zeezijde van de dijk wordt gerekend met $K_\alpha = 1$.

18 Voor de correctiefactor voor de leeftijd van de afzettingen K_{DR} wordt voor de relatief jonge holocene afzettingen een waarde 1 aangehouden, voor het pleistocene zand een waarde van 1,3.

4 Referenties

Arango, I., & Migues, R. (1996). *Investigation of the seismic liquefaction of old sand deposits.* Rep. on Research, Bechtel Corporation, National Science Foundation Grant No. CMS-94-16169.

Bommer, J., & Bourne, S. (2015). *Seismic Hazard Analysis for the Eemshaven-Delfzijl Sea Levee, a report prepared for NAM.*

Boulanger, R., & Idriss, I. (2014). *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures.*

CUR. (1997). *Kansen in de Civiele Techniek, deel 1.* CUR.

Deltares. (2015e). *Aardbevingsbestendige waterkeringen, Opties voor een haalbaar en betaalbaar ontwerp, versie 3.* Deltares rapport nr. 1220173-002-GEO-0001-v3.

Deltares. (2016a). *Ontwerpuitgangspunten Hoogwaterbelasting Dijkversterking Eemshaven-Delfzijl.* Deltares rapport 1220173-005-GEO-0016.

Deltares. (2016b). *Seismisch Dijkontwerp, protocol voor Eemshaven-Delfzijl.* Deltares rapport nr. 1220173-024-GEO-0001.

Deltares. (2016c). *Vak 7 (km 30) - RT6500 - Comparison 1D and 2D analyses.* Deltares report 1220173-000-GEO-0014.

Deltares (2017). *LPI screening for the Eemshaven-Delfzijl levee*. Deltares report no. 1220173-024-GEO-0067, version 3.

ENW. (2014a, december 8). *Advies aardbevingsbestendige zeedijk Eemshaven – Delfzijl*. Kenmerk ENW-14-15. Retrieved from http://www.enwinfo.nl/images/pdf/adviezen-2014/ENW-14-15-Advies-WaterschapNoorderzijlvest-aardbevingsbestendige-zeedijk-Eemshaven-Delfzijl.pdf

Fugro (2017). *Evaluation of dynamic stability using code calibrated design parameters, Eemshaven-Delfzijl levee, The Netherlands*. 1 March 2017, contract no. 1016-0459-000, version 00.

Green, R. A., Maurer, B. W., Bradley, B. A., Wotherspoon, L., & Cubrinovski, M. (2013). *Implications from liquefaction observations in New Zealand for interpreting paleoliquefaction data in the central eastern United States.* U.S. Geological Society Final Technical Report Award No. G12AP20002.

Hashash, Y. M. (2015). *Deepsoil, Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns, version 6.1.* University of Illinois.

Hayati, H., & Andrus, R. (2009). *Updated Liquefaction Resistance Correction Factors for Aged Sands*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 135(11): 1683-1692.

ISO. (2013). *General principles on reliability for structures, stage 40.20.*

Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., and Yasuda, S. (1978). *A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan*. Proc., 2nd Int. Conf. on Microzonation, San Francisco, pp. 885−896.

Jongejan R.B., Chacko J., Giannakou A., Drosos V., Tasiopoulou P. (2017). *Code calibration for coupled, effective stress FEM-assessments of the primary flood defenses at Eemshaven-Delfzijl*. 28 February 2017.

KNMI. (2013). *Report on the expected PGV and PGA values for induced eartquakes in the Groningen area.*

KNMI. (2015, Oktober). *Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Induced Earthquakes in Groningen; Update 2015.*

Maurer, B., Green, R., Cubrinovski, M., & Bradley, B. (2014). *Assessment of aging correction factors for liquefaction resistance at sites of recurrent liquefaction.* Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering.

Moss, R.E.S, Seed, R.B., Kayen, R.E., Stewart, J.P., Der Kiureghian, A. (2006). *CPT-Based Probabilistic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Initiation*. Report no. 2005/15, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Richmond CA.

NAM. (2015). *Hazard and Risk Assessment for Induced Seismicity in Groningen, Interim Update November 2015.*

NCEER (1997). *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*.Technical Report No. NCEER-87-0022.

NEN. (2015). *NPR9998 - Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en afkeuren - Grondslagen voor aardbevingsbelastingen: Geïnduceerde aardbevingen.*

Robertson, P., & Wride, C. (1998). *Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 35, 442 - 459.

TAW. (1985). *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Deel 1 – Bovenrivierengebied.*

TAW. (1989). *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Deel 2 – Benedenrivierengebied.*

Kopie aan

Bert de Wolff (Waterschap Noorderzijlvest), Geeralt van den Ham (Deltares)

A Expert workshop seismisch ontwerp: expert advies

Schiphol, 17-18 november 2016

December 3, 2016

Ms. Edith van Dijk
Principal Project Manager
Shell Global Solutions International BV

Dear Ms. Van Dijk:

This report describes the recommendations of the liquefaction expert panel engaged to review proposed protocols for evaluating the seismic stability of levees between Eemshaven and Delfzijl (E-D) in the Groningen region of the Netherlands. The recommendations are based on our reviews of documents provided to us in advance of the 17-18 November 2016 workshop, discussions held at the workshop, and discussions among the panel members following the workshop. We appreciated the clear presentations and frank discussions among the workshop participants, as they helped us to better understand the protocols that were being proposed. This understanding has allowed us to make some clear comments on the proposed protocols and to recommend a path forward.

This document provides a review and general comments on alternative approaches to evaluate the seismic stability of the E-D levee, and a recommended path forward. It does not present detailed or specific comments on the various documents we reviewed; such comments, if desired, can be compiled in a separate report.

Background
The process for evaluation of the stability of levees between Eemshaven and Delfzijl has been underway for some time. A great deal of subsurface exploration has taken place and has defined the major soil units within, underlying, and adjacent to the levees. The subsurface investigation has included extensive field and laboratory testing, and specialized laboratory testing of some of the unusual soils encountered in the investigations.

The levees are underlain by five main geologic formations. The Naaldwijk Formation extends from the original ground surface to depths of about 15 m, and consists of young, tidal and flood plain deposits including thinly interlayered loose to dense fine sands and soft to stiff silts and clays. The Naaldwijk Formation is underlain by the Nieuwkoop Formation, which consists of 0.5 m to 5 m thick layers of peat. The Naaldwijk and Nieuwkoop Formations are of Holocene age, and are underlain by Pleistocene sediments. The Boxtel Formation, comprised primarily of fine sands and silts, underlies the Naaldwijk and Nieuwkoop Formations. The Boxtel Formation is several to tens of meters thick at Eemshaven and generally less than 5 m thick and laterally discontinuous at Delfzijl. At Eemshaven, the Boxtel Formation is underlain by 3-5 m of fine to coarse sand with marine shells and shell fragments known as the Eem Formation. The Boxtel and Eem Formations are underlain all along the levee alignment by the Peelo Formation, a thick fluvio-glacial clay with some sand characterized by high penetration resistance. From the standpoint of seismic stability, the loose and soft Naaldwijk and Nieuwkoop soils are of primary concern, and particular attention is required for characterization of the interlayered Naaldwijk soils.

The levee sections vary at different locations. Near Eemshaven (km 37-38.7) the levees feature an old clay core on the landside. A short section (km 29-29.5) near Delfzijl is comprised of only sand. The great majority of the E-D levee, however, has a clay core on the outboard seaside of the levee. Many portions of the levees along the entire length from Eemshaven to Delfzijl contain loose, saturated sand that may be susceptible to liquefaction. The continuity of these sand layers is not always clear between individual explorations. Relatively thin, discontinuous pockets generally do not result in large, liquefaction-induced deformations, so the focus should be on sand layers of significant lateral continuity.

Subsurface investigations consisted of extensive cone penetration test (CPTu) soundings with various geophysical testing including shear wave velocity measurement, and gamma-gamma testing. A large number of borings were advanced with different types of sampling attempted; continuous sampling was performed in 74 Ackermann borings. Undisturbed samples were taken for consolidation, (static and cyclic) triaxial, and cyclic simple shear testing. Disturbed materials were tested for grain size characteristics, Atterberg limits, density, and water content. A recent investigation focused on collecting larger-diameter piston samples and Begeman samples of the interlayered Naaldwijk soils. These samples were then used for cyclic testing to help characterize the liquefaction resistance of these soils. An additional campaign of gel-push sampling was completed, but laboratory test results on these samples are not yet available.

Deltares Protocol

Deltares proposed a protocol for evaluating levee stability and the design of remedial measures, with the protocol based on a few different simplified models. The protocol involved: (a) performing one-dimensional site response analyses of different levee profiles (crest, landside, seaside) with PSHA-based ground motions to obtain cyclic stress ratios, (b) characterizing the cyclic resistance from the volumes of CPT data available for a given unit over stretches of levee, (c) using the maximum cyclic stress ratios of the three locations considered and a characteristic cyclic resistance to compute factors of safety against triggering of liquefaction, (d) using the lowest computed factors of safety to estimate pore pressure ratios – typically assuming pore pressure ratios of 1.0 for soils with factors of safety less than or equal to 1.0 and estimating excess pore pressure ratios in soils that did not liquefy from a laboratory test-based relationship, and (e) using the effective stresses corresponding to the computed pore pressure ratios to perform levee stability and settlement analyses. The stability analyses were to be performed using a displacement-compatible pseudo-static acceleration obtained by means of Newmark rigid sliding block analyses. The simplified models were incorporated in a framework that was described as being “semi-probabilistic.” The expert panel had comments on a number of components of the protocol, which were expressed verbally at the workshop and are repeated herein:

1. The use of the CPT for estimation of the liquefaction resistance of the soils along the E-D levee is considered appropriate for primarily sand layers of recognizable thickness. However, the in-situ characterization of the interlayered tidal deposits and the older Pleistocene deposits is challenging, regardless of the technique used. In particular the CPT resistance of thin layers that are not easily detected may not provide representative cyclic resistance values of these thin layers. Note that undisturbed sampling and laboratory testing of these deposits provides information on the liquefaction response of these soils, but there are also limitations with that approach (e.g., sample disturbance, load path, etc.). Nevertheless, the laboratory data represents the behavior of the Groningen soils themselves rather than empiricism imported from elsewhere under different geologic and tectonic conditions; the laboratory test results should be carefully compared with empirical case history-based results to estimate

liquefaction resistance. The laboratory tests performed to date show that for most interlayered materials, the direct use of the CPT penetration resistance in these deposits is conservative (i.e., use of penetration resistance with no corrections applied for layering to estimate liquefaction triggering resistance and post-liquefaction shear strength, and ignoring effects of mixing, during large deformations appears to be conservative). By contrast, the CPT tip resistances in the primarily sand layers typically show higher cyclic resistance than the laboratory test results.

2. Interpretations described as being “conservative” were introduced at different stages of the protocol. For example, a thin-layer correction factor of 1.8 is recommended, even though the best estimate value appears to be on the order of 3.0-3.5; the 33rd percentile CPT resistance of a volume of data which may include transitions from clay to sand in excessively thin layers is used for sand layers; treating the entire thickness of the interlayered materials as a single layer; ignoring fines corrections on the tip resistances of sand sub-layers within the interlayered deposits; and treating the lowest factor of safety over the height of a particular soil layer as being representative of the entire layer. The basis for, and degree of, the conservatisms were not described/quantified, so it is impossible to determine the probability associated with each. There was no indication of a consistent approach for making the conservative interpretations, and thus the degree of conservatism in each must be considered to be both unknown and inconsistent.
3. The conservative interpretations were applied to components of the stability evaluation process that built upon each other; thus, the results from the protocol will be affected by a compounding of conservatisms that will likely induce a conservative bias of unknown degree. This is inconsistent with a probabilistic (or semi-probabilistic) approach to evaluating the levee stability. The protocol would appear to estimate uncertainties about a biased mean or median estimate. In some cases the averaging of properties and strata, or ignoring where CPT data are representative, can result in misleading conclusions regarding the liquefaction resistance of the unit, and subsequently, the potential for liquefaction-induced deformations.
4. The relationship proposed to predict excess pore pressures from factor of safety is dated and very approximate. It is expected to provide, at best, a crude estimate of induced pore pressure for soils that do not liquefy. Other procedures that yield more accurate predictions of pore pressure are available.We believe it is more appropriate to use modern coupled-effective stress approaches for realistic evaluations of stability.
5. The sliding block analysis, in which a potentially unstable mass of soil is assumed to exhibit rigid-perfectly plastic behavior, is not applicable to stability evaluations involving significant amounts of liquefiable soil. The behavior of liquefiable soils subjected to cyclic loading is extremely complex and very different than that assumed in sliding block analyses; consequently displacement predictions based on that method are unreliable. The inability of the sliding block model to capture the complex mobilization of shearing resistance in liquefiable soils and its inability to model the actual mechanism(s) causing permanent deformations of the Groningen levees are significant factors. Given these limitations, the use of such a procedure to assess a critical yield acceleration is unreliable.
6. The proposed stability analyses are performed using effective stress strength parameters for both coarse- and fine-grained soils, and use estimated effective stresses at the end of shaking to compute shear strengths. This approach ignores the contributions of dilatancy to the shear strength of coarse-grained soils, and implies that drained strengths will be used for both coarse- and fine-grained soils. The effective stress at the end of shaking in coarse-grained soils is not the effective stress that would exist at failure – depending on their state, coarse-grained soils will tend to dilate (or

contract, if very loose) as they are sheared which will lead to changes in effective stress and shear strength as shearing progresses. Fine-grained soils have very low permeability, and would almost certainly be loaded under undrained conditions during and shortly after earthquake shaking. Since they are not heavily overconsolidated, the clays at the Groningen levee site would be expected to generate positive pore pressures that would cause their shear strength to be lower than the strength implied by drained loading. These pore pressures are most easily accounted for by using total stress (undrained) strengths in the short-term, total stress stability analyses.

On the basis of these comments, the expert panel judged the proposed Deltares protocol to be unsuitable for evaluation of the seismic stability of the levees, and for design of remedial measures. Some elements of the protocol could, after modification, be useful as part of a screening analysis to identify portions of the levee where liquefaction effects are likely to be more severe.

Fugro Effective Stress Analyses

Fugro reported on their interpretation of field and laboratory tests and presented the results of an extensive series of nonlinear, effective stress, finite difference analyses of two levee sections – one near Eemshaven and the other near Delfzijl. The field and laboratory test results were clearly presented and discussed. The interpretation of the test results appeared to be generally appropriate, although several comments are noted below. They described their numerical models of the two levee sections and the results of their analyses of the sections when subjected to different input motions developed from a PSHA and deterministic site response analyses.

1. Properly performed, nonlinear, effective stress analyses are suitable, and in fact preferred, for critical projects such as evaluation of the seismic stability of the Groningen levees. Effective stress analyses allow consideration of site-specific geometry/material behavior and interaction of modeled sites with specific ground motions. They also allow the identification of realistic deformation mechanisms without the constraints associated with many simplified methods of analysis. They require good site characterization and validated constitutive models – validation should be based on ability to represent material behavior at the element level, observed in high-quality laboratory tests, and also system level behavior of sites observed in well-documented field case histories and physical model tests. The levee response will likely be highly nonlinear and can be sensitive to constitutive model characteristics and numerical integration schemes. Multiple, redundant analyses should be performed for critical projects – using as a minimum different constitutive models and, where necessary, different numerical codes.
2. Dynamic effective stress analyses have developed to the point where they can provide useful indications of the performance of systems affected by liquefiable soils. However, they are very time-consuming and should therefore be performed only on levee sections at locations deemed to have significant potential for liquefaction-related damage.
3. With well-calibrated and validated constitutive models embedded in reliable numerical tools, dynamic effective stress analyses using multiple input motions can provide an indication of the range of expected levels of performance. They also allow evaluation of the sensitivity of response to various input parameters and modeling assumptions. It will be important, however, to recognize potential uncertainties in constitutive models and numerical analyses. For critical projects, parallel analyses should be performed using different constitutive models and different numerical tools. FLAC with UBCsand and PM4sand are good, but these analyses should be supplemented by parallel check

analyses using a different computational tool, e.g., OpenSees with PDMY model or FLIP with cocktail glass model.

4. The results of the Fugro numerical analyses included sensitivity analyses that help identify the most influential variables affecting levee crest settlement. They do not, however, address the uncertainty in crest settlement, which is necessary in order to properly characterize stability hazards given the requirements of limiting failure to a probability related to the high-water flooding probability. Procedures for estimating the distribution of crest settlement are required.

General Comments

A number of general comments came up during discussions during and following the workshop. These comments relate to the seismic stability evaluation, but relate to broader issues than the approaches pursued by Deltares and Fugro.

1. Performance standards should be explicitly identified, on a location-specific basis if necessary. Various documents have described performance requirements in terms of crest settlement (using values ranging from 0.10 m to 1.0 m) and in terms of allowable flooding probabilities. The standards should be stated in clear, unambiguous terms so that they are clearly understood by everyone performing and reviewing the levee stability evaluation. We understand that the performance criteria are to be expressed probabilistically, i.e., relative to the probability of flooding under high-water conditions. This type of criterion requires characterization of uncertainty in the seismic performance evaluation.
2. The impacts of repair methods on normal operation of levees and on performance during other extreme loading conditions must be considered when evaluating the need for, or selecting between alternative retrofits. For example, the use of an impermeable structural wall (e.g., a sheet pile wall) on the landside of the levee could cause the water level within the levee to rise during storm events and potentially reduce the stability of the levee under these conditions. Similarly, the use of anchors between parallel rows of bulkheads may increase the risk of piping. Preparedness for emergency situations (quick restoration) is also important.
3. Empirical relationships based on data from many soils under many different conditions can be very useful for estimating soil properties and their variation with in-situ conditions. However, they may not account for site-specific conditions in the way that laboratory tests on undisturbed samples from the site of interest can. Careful attention should be paid to the integration of site-specific data with data from empirical relationships to ensure that pertinent site-specific soil characteristics are properly accounted for.
4. While the use of probabilistic methods often provides guidance and improved decision making, this is only the case where the available data and geotechnical analyses are sufficiently developed to meaningfully capture the uncertainties and the full range of scenarios can be properly analyzed. For example, soil samples from the same site and the same depth may exhibit different behaviors during laboratory tests but we do not definitively know whether the differences are random, due to sample disturbance, heterogeneity of in-situ ground, etc. The results of probabilistic approaches should be checked by deterministic evaluations using reliable analytical models and reasonably conservative design parameters.

Recommendations

The Groningen levees span a considerable distance with variable soil conditions over their length. A great deal of effort has been expended in field and laboratory investigations of the properties of the soils that underlie the levees, and a great deal of effort will be required to

identify seismically vulnerable portions of the levee, and to design remedial measures for those portions. In the interests of both cost and time, it will be necessary to adopt an efficient approach to the seismic stability evaluation. We recommend that the seismic stability evaluation consist of two phases, a preliminary screening phase and a detailed analysis phase.

1. In the first phase, simplified procedures based on available CPT data should be used to estimate the potential liquefaction severity at each point where CPT data is available. The actual, best-estimate CPT data (rather than a percentile value from data aggregated over a large volume) should be used in these analyses. In addition to evaluations of factors of safety at each CPT location, we recommend that liquefaction severity be characterized using the Liquefaction Potential Index (LPI). Where the initially estimated liquefaction severity is significant, careful evaluation of the data should be conducted to confirm if the basic CPT data are representative of the resistance of the unit, whether detailed investigation is warranted for the vulnerable layers, or whether alternative sources such as laboratory test data should be used to evaluate liquefaction triggering.
2. If the Phase 1 analyses show a significant risk of liquefaction-related damage, a secondary phase involving detailed, nonlinear, effective stress analysis of levee sections that do not pass the preliminary screening should be initiated. In such cases, we recommend an approach based on two-dimensional, nonlinear, effective stress response analyses. Analyses should use multiple codes with multiple constitutive models to represent model uncertainty. Sensitivity analyses should be performed to identify important variables and compute uncertainty in crest settlement using simple methods such as point estimation, FOSM, or FORM – these ultimately would predict the distribution of crest settlement conditional upon a ground motion level (Sa [T], PGA, $PGA_{7.5}$, etc.).

The results of these analyses can be presented in the form of crest settlement fragility curves, which could then be convolved with PGA or PGA7.5 hazard curves to obtain crest settlement hazard curves – the design of remedial measures could then be based on allowable crest settlement for some design return period. The crest settlement hazard curve could also be interpreted in terms of the mean annual probability of exceeding various levels of crest settlement.

An immediate action that will expedite the implementation of the two-phase protocol includes performing a detailed, nonlinear, effective stress analysis parametric study of the two levee sections that were already analyzed, using motions scaled to increasing amplitudes. The results of this parametric study will help determine the threshold LPI value for intolerable levee deformations. The study should also help confirm the selection of LPI as a screening tool and guide the selection of threshold LPI values for triggering more sophisticated analyses.

Summary
We appreciate the opportunity to collect our thoughts and impressions and present them in the form of comments and recommendations that represent the consensus of the liquefaction expert panel. We believe that the phased approach described in this report provides a logical, methodical, and efficient path toward evaluation of seismic stability of the levees and toward design of any required improvements to them. We would be happy to answer any questions that you or others have about the comments and recommendations presented herein.

Sincerely,

Jacob Chacko
Russell A. Green
Steven L. Kramer
Ikuo Towhata

B Review letter prof. Kramer

STEVEN L. KRAMER, PH.D.
Consulting Engineer

5141 189th Avenue NE
Sammamish, WA 98074
(425) 836-4754

March 1, 2017

Dr. Mattijs de Mooij
Advisor
Nationaal Coördinator Groningen
Paterswoldseweg 1, 9726 BA
Groningen, Postbus 3006
9701 DA Groningen

Dear Dr. de Mooij,

I am writing to present my conclusions regarding the reports regarding seismic stability evaluations for the Eemshaven-Delfzijl levees that I have reviewed in draft form over the past several weeks. My reviews included the report on liquefaction potential index (LPI) screening analyses prepared by Deltares and the code calibration report prepared by Fugro. The code calibration report made use of two-dimensional, nonlinear dynamic analyses that I also reviewed.

I found the Deltares report on the LPI screening analyses to present the results of the screening analyses clearly and accurately. The analyses were based on soil conditions interpreted reasonably from the results of an extensive subsurface investigation program, and on ground motion hazards characterized by a state-of-the-art probabilistic seismic hazard analysis. I believe that the LPI screening analyses have identified the locations along the levee that are most likely to experience significant crest settlements, and have flagged those locations for more detailed analyses.

The detailed analyses used in the code calibration process described in the Fugro report included two-dimensional, nonlinear effective stress site response analyses performed using the finite difference code, FLAC. These analyses appear to have been performed with a high level of care and detail, and their results have been used to characterize the relationship between crest settlement and the various loading, material, and geometric parameters that affect it. The Fugro team also performed innovative analyses that helped characterize the behavior of the complex interlayered soils of Unit 8, which were critical to the evaluation of seismic stability.
I also reviewed and commented upon various aspects of the code calibration portion of the Fugro report. Reliability analyses and the requirements of the Dutch codes are beyond my area of technical expertise so my comments related primarily to the clarity and consistency of the descriptions of those analyses.

It has been a pleasure to work with you and the other professionals investigating the seismic stability of the Eemshaven-Delfzijl levees. I trust that this letter provides the information you require at this time. Please do not hesitate to contact me if you have any questions.

Sincerely,

Steven L. Kramer
Consulting Engineer

C Review letter dr. Calle

E.O.F Calle
Adviseur Waterveiligheid
Nesciohove 26
2726BH Zoetermeer
mob.: 0650202068

Zoetermeer, 3 Maart 2017.

Aan de heer drs. Mattijs de Mooij,
Adviseur, Nationaal Coördinator Groningen
Postbus 3006,
9701DA Groningen

Betr. Review Deltares Rapport

Geachte heer De Mooij,

Hiermee deel ik u de bevindingen mee van mijn review van het rapport:

Code calibration for coupled, effective stress FEM-assessments of the primary flood defenses at Eemshaven-Delfzijl

Auteurs: Ruben Jongejan (Jongejan RMC), Jacob Chacko (Fugro), Amalia Giannaku (Fugro) en Vasileos Drossos (Fugro).

Het rapport bevat componenten op het gebied van seismische technieken voor dammen (en dijken) en componenten op het gebied van de probabilistische veiligheidsfilosofie van dijken (waterkeringen) in Nederland. Bij de review heb ik me hoofdzakelijk gericht op de veiligheidsfilosofie en hieraan gerelateerde probabilistische betrouwbaarheidsanalyses. Dit omdat seismiek niet tot mijn expertise behoort en ook omdat seismische aspecten door internationaal erkende vakspecialisten werden (en deels al waren) gereviewd. Hierbij heb ik alleen gekeken naar de helderheid en consistentie van de beschrijvingen.

Het hoofdprobleem in het rapport betreft het optuigen van een methode voor het afleiden van aan te houden rekenwaarden van belasting- en sterkteparameters bij het ontwerpen van aardbevingsbestendige dijken, met behulp van de door Fugro ontwikkelde methode, gebaseerd op dynamische numerieke-analyses om de stabiliteit en kruindaling van aarden dammen tijdens en na aardbevingen te berekenen. Die ontwerpen moeten zodanig zijn dat dijken voldoen aan de in de Nederlandse wet vastgelegde veiligheidsnormen, in termen van nog net acceptabel kleine overstromingskansen (doorbraakkansen) in de zogenoemde normtrajecten van de primaire waterkeringen.

De reeks interpretatie/vertaal-slagen die hiervoor doorlopen moet worden, namelijk van "trajectkansen" → "toelaatbare bijdragen door de verschillende potentiële faalmechanismen" → "toelaatbare doorbraakkansen per faalmechanisme per dwarsdoorsnede" en, ten slotte, de vertaling van de laatste naar een rekenvoorschrift (karakteristieke waarden en partiële veiligheidsfactoren voor de rekenmodellen waarmee de veiligheid tegen een falen door een aardbeving wordt geverifieerd, is in het document helder beschreven.

De gekozen opzetten bij de vertaalslagen zijn conform geaccepteerde inzichten en uitgangspunten op het gebied van de probabilistische veiligheidsfilosofie voor de hoogwaterbescherming in Nederland, zoals beschreven in de Leidraad Grondslagen voor Waterveiligheid en andere leidraden van het ENW (Expertise Netwerk Waterveiligheid). Bij de vertaalslagen is gezocht naar optimale, maar nog wel voldoende veilige, aannamen om onnodig conservatisme in de beoogde ontwerpregels te vermijden. De aanpak is “State of the Art”.

Gegeven de tijdsdruk op het project zijn voor de review conceptversies van het rapport van 15 en 24 februari 2017 gebruikt. In deze conceptversies is via kantlijnopmerkingen en “track changes” commentaar gegeven. In de versie van 28 februari is dit commentaar verwerkt; dit is wat mij betreft akkoord.

Mocht u nog vragen hebben, dan zal ik die graag, voor zover dat binnen mijn bereik ligt, beantwoorden.

Met vriendelijke groet,

Ed Calle

D Rapport ‘Code calibration for coupled, effective stress FEM-assessments of the primary flood defenses at Eemshaven-Delfzijl’ (Jongejan et al., 2017)

Code calibration for coupled, effective stress FEM-assessments of the primary flood defenses at Eemshaven-Delfzijl

Final report

28 February 2017

Authors:
Ruben Jongejan (RMC)
Jacob Chacko (Fugro)
Amalia Giannakou (Fugro)
Vasileios Drosos (Fugro)
Panagiota Tasiopoulou (Fugro)

Table of contents

1 Introduction 1

2 Flood protection standards and code calibration 2

3 Proposed code calibration procedure and action items 5

4 Action item 1: characterize uncertainties 7
4.1 Spectral acceleration (T=0.85s) at Top of Bedrock NSUB (SA_{NSUB}) 7
4.2 Spectral acceleration (T=0.85s) at Base of 2D Numerical Models (SA_{model_base}) 9
4.3 $CRR_{M=7.5}$ in sand deposits 11
4.4 $CRR_{M=5.0}$ in laminated deposits 11
4.5 Uncertainty related to residual strength ($\varepsilon_{Su/p'}$) 12
4.6 Model Uncertainty (ε_M) 13
4.7 Uncertainties related to motion characteristics 14
4.8 Overview of stochastic variables 15

5 Action item 2: FORM analyses using the simplified liquefaction procedure 17
5.1 Limit state function 17
5.2 Input of probabilistic analyses 18
5.3 Results of FORM-analyses 18
5.4 Discussion 19

6 Action item 3: FORM analyses using the 2D effective stress model 20
6.1 Limit state function 20
6.2 Input of probabilistic analyses 20
6.3 Results of FORM-analyses 21
6.4 Discussion 23

7 Action item 4: Revisiting the length effect 24
7.1 Introduction: cross-sectional and system-level reliability assessments 24
7.2 The length effect and cross-sectional target reliabilities 27
7.3 Characterizing the length effect: the parameter a 29
7.4 Characterizing the length effect: the parameter b 29
7.4.1 Theory 29
7.4.2 Sensitivity analyses 30
7.4.3 Comparison with earthquake damage observations to embankments 32
7.4.4 Proposed b-value 35
7.5 Updated cross-sectional target reliabilities 36

8 Action item 5: Synthesis 37
8.1 From calculated FORM-influence coefficients and target reliabilities to design values 37
8.2 Uncertainty related to motions 39
8.3 Uncertainty related to stratigraphy 39
8.4 Sea level (load combination) 39

References 40

Appendix A First Order Reliability Method (FORM) 42

Appendix B Design point values 45

Appendix C Uncertainty in site response analysis up to the model base 46

Appendix D Cyclic Resistance of Laminated Deposits 50

Appendix E Residual strength 66

Appendix F Model uncertainty 68

Appendix G Volume effects 71

Appendix H Uncertainty related to motions 79

Appendix I Results of FORM-analyses for the 2D finite elements model 84

Appendix J Sensitivity analyses on design sea water level 90

1 Introduction

This document concerns the derivation of design values for use with the assessment method developed by Fugro for the primary flood defenses at Eemshaven-Delfzijl (Fugro 2016a; Fugro 2016b). This method involves:

1. A fully coupled, dynamic, effective stress co-seismic analysis, in which displacements are calculated with dynamic FEM-calculations while excess pore pressures are being generated.
2. A static post-seismic analysis, in which residual displacements are calculated with the excess pore pressures and deformations at the end of shaking as a starting point.

This document presents the results of a code calibration study for the abovementioned numerical analyses. It also provides background information about the Dutch flood protection standards and code calibration studies in general. The code calibrated assessment procedure is summarized in chapter 8.

The code calibration assessment procedure has been developed for assessing the seismic stability of the Eemshaven-Delfzijl sea dikes. For other applications, such as for regional flood defenses, it is recommended to verify the applicability of the design values presented herein with probabilistic analyses.

2 Flood protection standards and code calibration

The Dutch flood protection standards are defined in terms of maximum allowable probabilities of flooding. The maximum allowable probabilities of flooding range from 1/100 per year to 1/100,000 per year. The Eemshaven-Delfzijl project covers parts of two different segments: segment 6-6 with a standard of 1/1,000 per year and segment 6-7 with a standard of 1/3,000 per year (Figure 1).

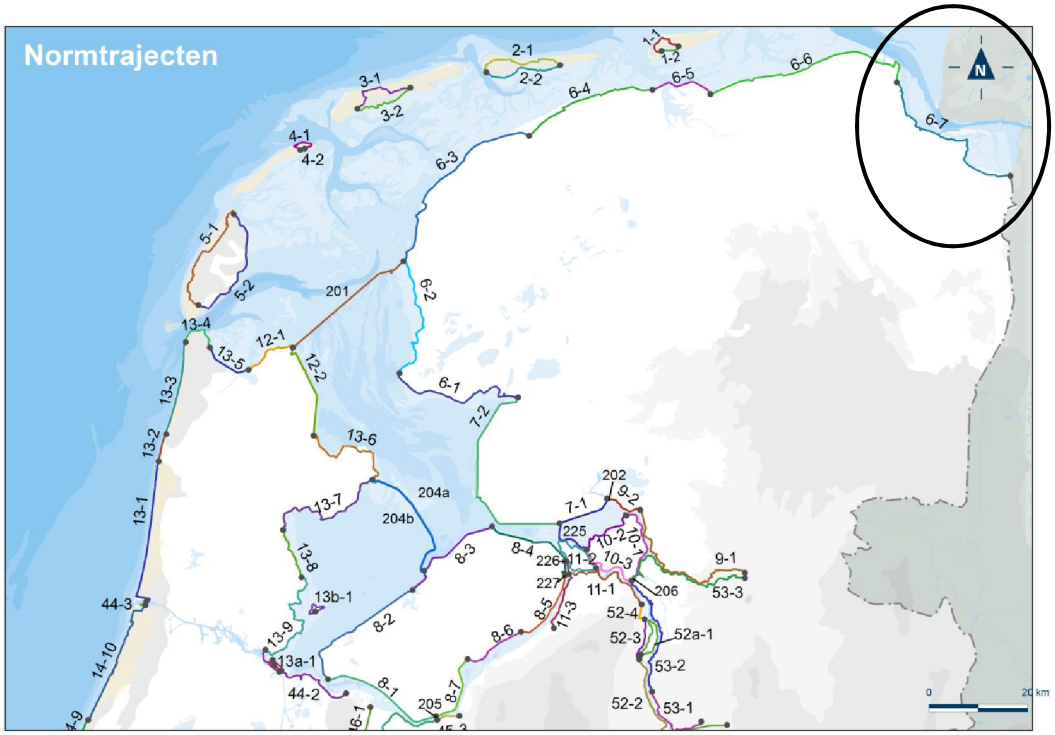


Figure 1. Overview of segments in the Flood Protection Act (in Dutch: Waterwet).

There are essentially two approaches for assessing whether a flood defense complies with a flood protection standard:

1. Probabilistic (using e.g. Monte Carlo, FORM)
2. Semi-probabilistic (design value or partial factor approach)

While the outcomes of probabilistic analyses can be compared directly to reliability requirements, most engineers are unfamiliar with probabilistic methods. Probabilistic analyses can also be prohibitively time consuming, which is the case for the model considered herein. A semi-probabilistic procedure is essentially an approximate procedure for evaluating whether a probability of flooding is smaller than required by law.

Probabilistic and semi-probabilistic safety assessments are closely related. Both rely on the same reliability requirements, the same limit state functions and the same probability distributions of stochastic variables. The only difference concerns the fact that a semi-probabilistic approach rests on a number of simplifications and approximations, giving it the appearance of a deterministic procedure.

In probabilistic safety assessments, analysts consider the probability that the ultimate limit state is exceeded, i.e. that load (S) exceeds resistance (R). The failure probability, P(S>R), should not exceed some maximum allowable or target probability of failure (P_T).

In semi-probabilistic assessments, analysts consider the difference between the design values of load (S_d) and strength (R_d): S_d should not exceed R_d. Design values are representative values such as 5^{th} or 95^{th} quantile values or 1/10.000 yr^{-1} water levels, factored with partial safety factors, see equations (1) and (2). Note that the

definitions from the Eurocode have been adopted here, similar terms may have different meanings in other codes.

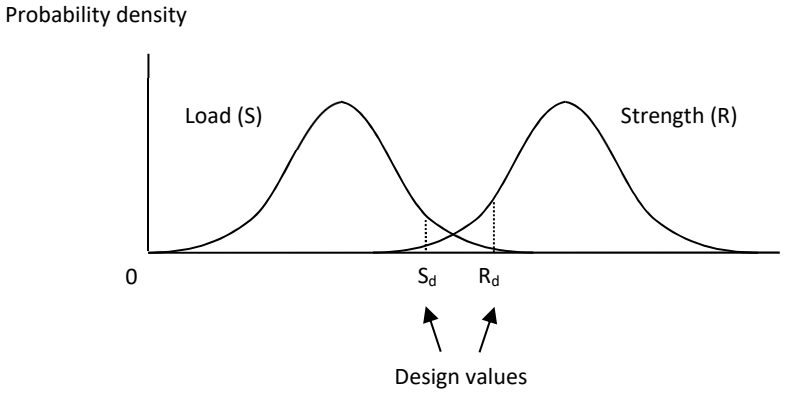
$$S_d = S_{rep} \cdot \gamma_S \quad (1)$$

$$R_d = R_{rep} / \gamma_R \quad (2)$$

Where:

S_d	Design value of uncertain load variable
R_d	Design value of uncertain resistance variable
γ_S, γ_R	Partial factors

Design values, and hence (partial) safety factors, should be defined in such a manner that $S_d \leq R_d$ implies that the probability of failure meets the reliability requirement: $P(S>R) \leq P_T$. The relationship between probabilistic and semi-probability safety assessments is illustrated in Figure 2.



Fully probabilistic assessment: evaluate whether $P(R<S) \leq P_T$
Semi-probabilistic assessment: evaluate whether $S_d \leq R_d$

Figure 2. The probability density functions of load (S) and strength (R), and the design values of load and strength (S_d) and (R_d).

A close link between probabilistic and semi-probabilistic assessments can be achieved by equating the design values of the different stochastic variables to their design point values (see Figure 3 for a graphical representation):

$$X_d = F_X^{-1}(\Phi(-\alpha_X \cdot \beta_T)) \quad (3)$$

Where:

$F_X^{-1}(\cdot)$	Inverse of the cumulative distribution function of stochastic variable X
X_d	Design value of stochastic variable X
β_T	Target reliability index, which equals $\Phi(1-P_T)$
α_X	Influence coefficient for stochastic variable X

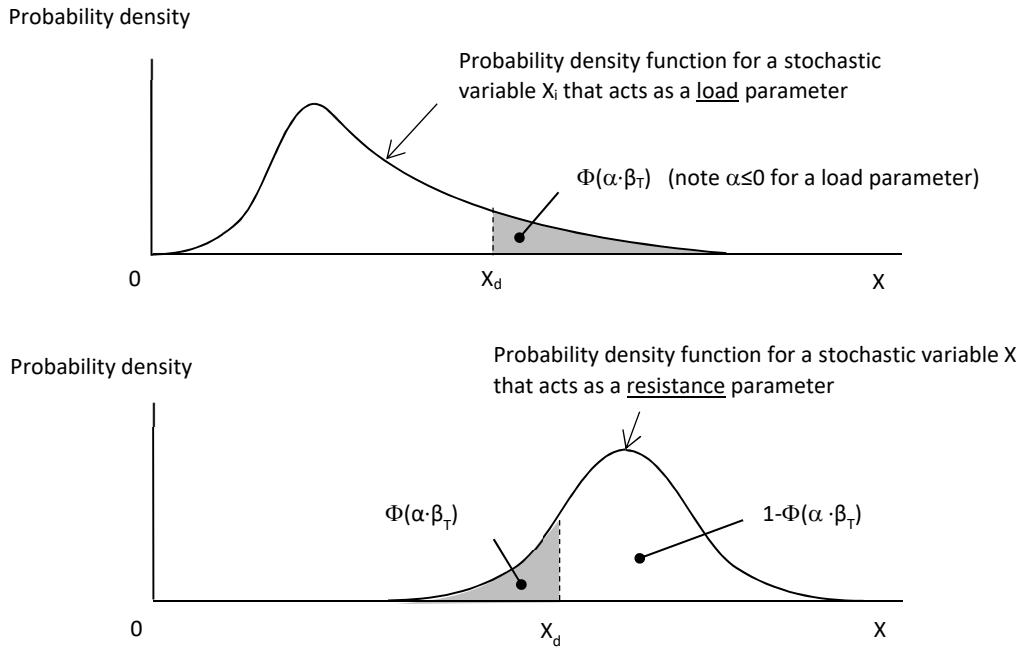


Figure 3. The design point values of stochastic load and resistance variables and their probabilities of exceedance.

For a normally distributed stochastic variable, equation (3) yields:

$$X_d = \mu_X - \alpha_X \cdot \beta_T \cdot \sigma_X \quad (4)$$

Where:

μ_X Mean value of the normally distributed variable X

σ_X Standard deviation of the normally distributed variable X

The above shows that a code calibration essentially revolves around:

1. the specification of appropriate target reliabilities and
2. the specification of appropriate influence coefficients.

NB1

In principle, there is no objection to extending the fully probabilistic PSHA to a fully probabilistic system-level reliability analysis. The reason for not doing so and opting for a semi-probabilistic approach is purely pragmatic.

NB2

The Dutch flood protection standards (2017 onwards) say nothing about the loads that primary flood defenses should be able to withstand. Without code calibration, appropriate design loads would remain unspecified. The same goes for resistance.

NB3

The terms “load” and “demand” are used as synonyms throughout this document. The same goes for “resistance” and “capacity”. While the terms “load” and “resistance” are commonly used in hydraulic engineering, the terms “demand” and “capacity” appear to be more common in earthquake engineering.

NB4

The fact that PSHAs are fully probabilistic and the fact that e.g. Boulanger & Idriss (2014) and Green et al. (2016) have characterized the uncertainties related to liquefaction triggering relationships by probability distributions shows that probabilistic concepts and techniques are already quite common in earthquake engineering. This has made it easier to relate earthquake models (for demand and capacity) to probabilistic standards.

3 Proposed code calibration procedure and action items

An overview of the steps taken to arrive at a calibrated semi-probabilistic assessment rule is given below.

Action item		Description	Objective
1	Characterize the uncertainties related to the input and output of the Fugro model (i.e. coupled, effective stress FEM)	1. Specify which variables should be treated as deterministic or stochastic 2. Specify distributions for the different stochastic variables 3. Describe the decay of spatial correlation for the different stochastic variables, or -as a first step- describe qualitatively what an (uncertain) realization of each individual stochastic variable could look like 4. Specify the meaning of the design values that are typically used in reliability analyses (e.g. the $CRR_{7,5,1atm}$-curve in B&I2014 rests on the 16% quantile value of an error term) On the basis of the results of the abovementioned steps, it will be possible to give an indication of the level of conservatism in the calculations presented by Fugro at the expert meeting and, hence, the direction of the outcomes of the code calibration exercise. This will be for useful decision making and/or for managing expectations.	Define the input of subsequent analyses Give an early impression of the level of conservatism in previous analyses
2	Derive (preliminary) estimates of design values from a probabilistic analysis using the simplified liquefaction procedure and the uncertainties specified by e.g. Green et al. (2016)	1. Specify the limit state function 2. Specify the uncertainties 3. Carry out a series of FORM analysis to “get a feel” for likely design point values. These can be used as input (starting point) for a FORM-analysis using the Fugro model (action item 3) and for informing the final choice of design values (action item 4). NB: Liquefaction triggering is a necessary but insufficient condition for failure of the Eemshaven-Delfzijl primary flood defense. This means that the limit state function considered here cannot be used as a basis for limit state design or safety assessments. This action item merely serves to put the results of more advanced analyses (action item 3) into perspective.	Get a feel for influence coefficients
3	FORM analysis using the Fugro model	1. Select start values for the first FORM iteration (design point estimate) 2. Compute partial derivatives 3. Normalize stochastic variables 4. Calculate estimate of the design point 5. Iterate (successive substitution)	Get a feel for influence coefficients
4	Revisit previous assumptions concerning the length effect	The cross sectional reliability requirement depends on (1) the flood protection standard, (2) the allowable contribution of slope instability to the probability of flooding, (3) a probability of flooding given severe earthquake damage and (4) a length effect factor. The length effect factor will be re-evaluated on the basis of (1) the results of the screening exercise and (2) a probabilistic analysis using the outcrossing method. The outcomes of the latter analysis depends on (1) the influence coefficients of the different stochastic variables and (2) their autocorrelation functions. This means there is a link with action items 1 to 3.	Define cross-sectional target reliabilities

5	Make an informed decision about design values	On the basis of the results of the abovementioned actions: decide on appropriate design values.	Establish design values on the basis of influence coefficients and target reliabilities (decision informed by results from action items above)

4 Action item 1: characterize uncertainties

The following stochastic variables were considered in the FORM-analyses with the FE-model:

1. The seismic demand at the base of the 2D numerical models (SA_{model_base}). The distribution of this stochastic variable rests on a convolution of the uncertainty related to the acceleration at the North Sea Upper Base and the uncertainty in the site response up to the base of the model.
2. The cyclic resistance ratio (CRR) of sand deposits
3. The cyclic resistance ratio of laminated deposits
4. The uncertainty related to residual strength ($\varepsilon_{Su/p'}$)
5. Model uncertainty (ε_M)

Two other important sources of uncertainty are:

1. The uncertainty related to stratification in the top 30 meters.
2. The uncertainty related to the characteristics of spectrally matched motions.

Each probabilistic analyses has been carried out for a given stratigraphy and a given motion. The uncertainty related to stratification can be dealt with by carrying out sensitivity analyses and (if needed) by combining the results of the assessments for the different stratifications with their probabilities (see ENW 2012). The same applies to the uncertainty related to motions, see section 4.7.

The five stochastic variables mentioned above are believed to be the most important ones in a probabilistic analysis for a given stratigraphy (top 30m) and a given motion. The fact that all other variables have been treated as deterministic is conservative within the present context. This is because this leads to a (slight) overestimation of the relative importance of the uncertainty related to the abovementioned stochastic variables, leading to more conservative design values for these variables.

4.1 Spectral acceleration (T=0.85s) at Top of Bedrock NSUB (SA_{NSUB})

The spectral period of 0.85 s has been selected as being representative of seismic demand in the FORM analyses with the FE model FE since:

a. it is near the fundamental period of the 1D soil column that extends from top of bedrock (at about -350 m depth) to the ground surface; and
b. it is near the fundamental period of the 2D numerical models.

The hazard curve of the spectral acceleration at the top of bedrock (NSUB) for a spectral period T=0.85s provided by KNMI has been approximated with a lognormal distribution (Figure 4 and Figure 5). Since the hazard curves at Eemshaven and Delfzijl locations are different, different lognormal distributions are used to approximate the hazard curves at top of bedrock for these locations.

Care was taken so that the fitted lognormal distribution is closest to the target curve around the design point. FORM analyses results indicate that the exceedance probability of the design point value of SA(0.85) is smaller than 1/1000 per year (i.e.: >1000 year return period). The difference of between the lognormal fit and the target curve at exceedance probabilities greater than 1/1000 per year (i.e. <1000 year return periods) does not influence results of the FORM-analysis.

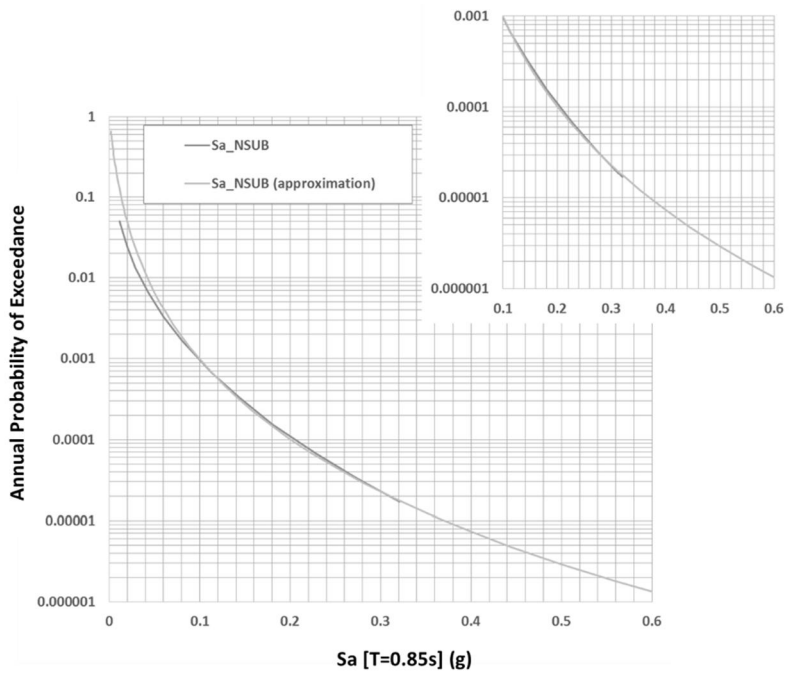


Figure 4. Spectral acceleration (T=0.85s) hazard curve at the top of bedrock at Eemshaven and approximation with a lognormal distribution [hazard curve provided by KNMI]. Lognormal distribution with $\mu_{ln(SA)}$ = -5.77 and $\sigma_{ln(SA)}$ = 1.12.

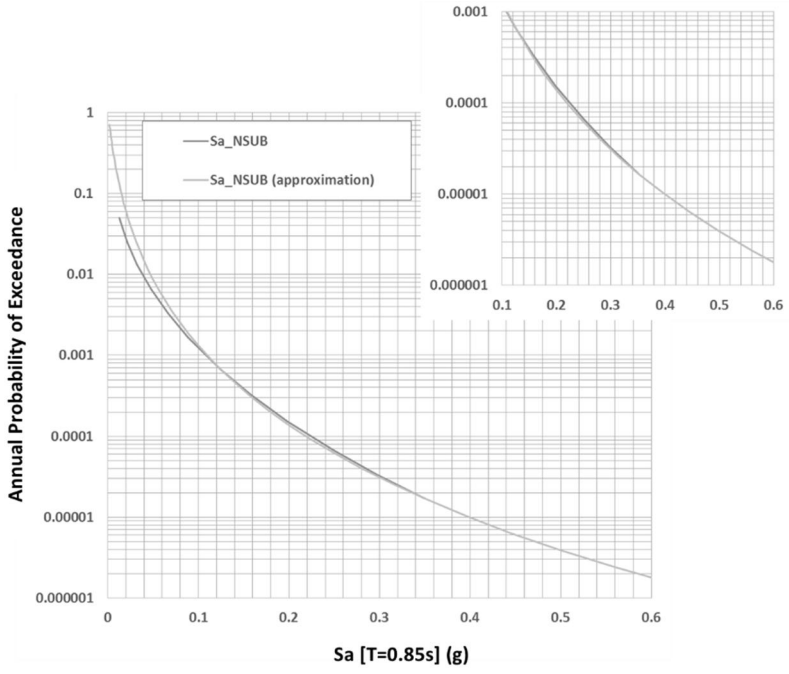


Figure 5. Spectral acceleration (T=0.85s) hazard curve at the top of bedrock at Delfzijl and approximation with a lognormal distribution [hazard curve provided by KNMI]. Lognormal distribution with $\mu_{ln(SA)}$ = -5.61 and $\sigma_{ln(SA)}$ = 1.10.

The mean and standard deviations of the lognormal distributions used to approximate the hazard curves at the top of bedrock are summarized in Table 1.

4.2 Spectral acceleration (T=0.85s) at Base of 2D Numerical Models (SA_{model_base})

The hazard curve of the spectral acceleration at base of the numerical model for a spectral period T=0.85s (i.e. NAP -30 m for Eemshaven and NAP-20m for Delfzijl, see Appendix C) is estimated following the procedure by Bazzurro and Cornell (2004) and Stewart et al. (2014) by a convolution of the hazard curve at top of bedrock (SA_{NSUB}) with the probability distribution of the site amplification factor described in Appendix C (Figure 6). Monte Carlo simulations were also performed for the convolution of the bedrock hazard curve and the site amplification probability distribution and similar results were obtained. The hazard curves of the spectral acceleration at the base of the numerical models (SA_{model_base}) for a spectral period T=0.85s was approximated with a lognormal distribution (Figure 7 and Figure 8). The mean and standard deviations of the lognormal distributions used to approximate the hazard curves at the base of the numerical models are summarized in Table 1.

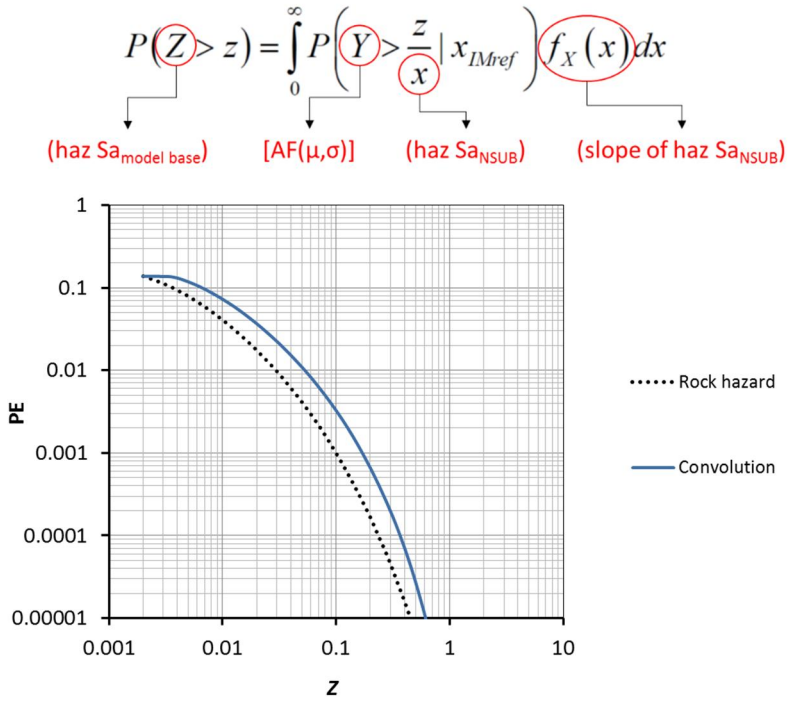


Figure 6. Example convolution results of rock hazard curve and probability distribution of site amplification factors (Stewart et al. 2014).

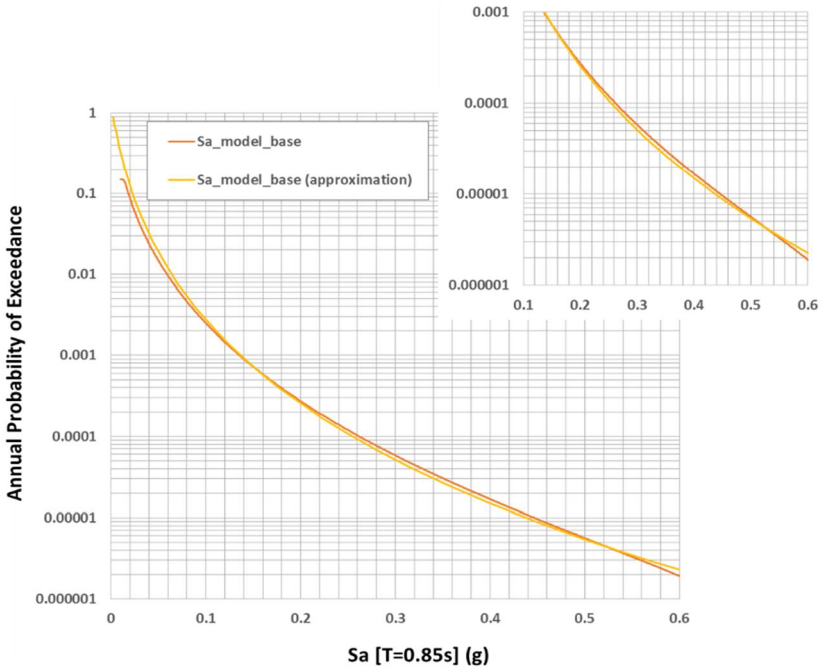


Figure 7. Convolved spectral acceleration (T=0.85s) hazard curve at the base of 2D model at Eemshaven and approximation with a lognormal distribution. Lognormal distribution with $\mu_{ln(SA)}$ = -5.05 and $\sigma_{ln(SA)}$ = 0.99.

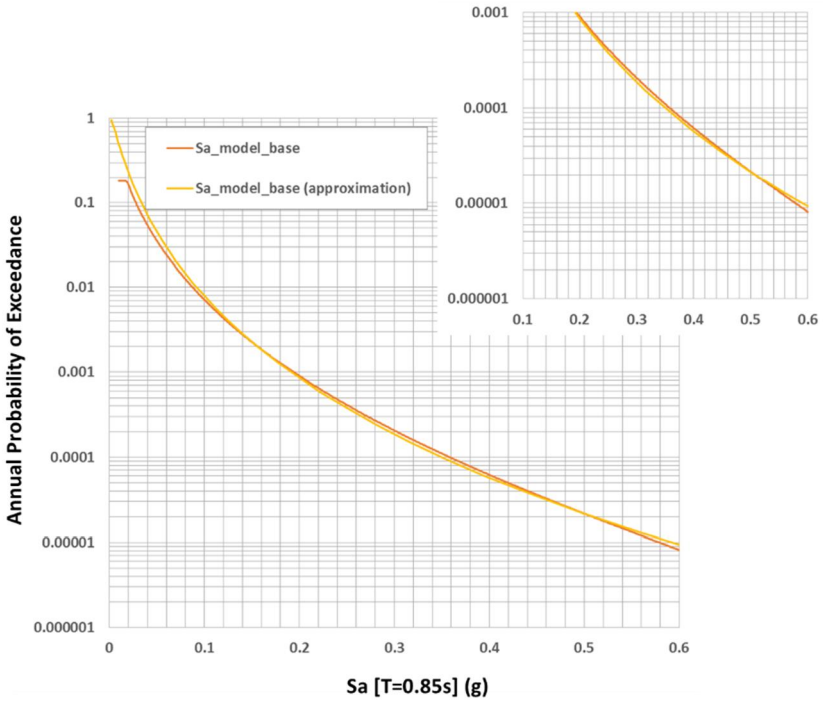


Figure 8. Convolved spectral acceleration (T=0.85s) hazard curve at the base of 2D model at Delfzijl and approximation with a lognormal distribution. Lognormal distribution with $\mu_{ln(SA)}$ = -4.62 and $\sigma_{ln(SA)}$ = 0.96.

4.3 $CRR_{M=7.5}$ in sand deposits

The probability distribution of the cyclic resistance at a reference magnitude M=7.5 (or 15 cycles) of sand layers with no clay laminations present at the Eemshaven area was estimated from the equation below proposed by Boulanger and Idriss (2014) using:

- the probability distribution of local q_{c1Ncs} values from CPT data that classified as Soil Behavior Type 6 per Robertson (1990) classification (Fugro 2016c). These q_{c1Ncs} values include thin layer correction and fines content correction (Fugro 2016c). In a uniform model, soil properties are assumed to be constant within an entire layer. This may lead to a significant overestimation of probabilities of failure when composite behavior is more accurately described by the spatial averages of individual data points (e.g. Vanmarcke 2011). A sensitivity study into such volume effects indicates that the use spatially distributed resistance values gives a result that is similar to the use of median resistance values in a uniform model, see Appendix G for further details. This is why the median of local q_{c1Ncs} values was selected for use with the Boulanger and Idriss (2014) relationship between q_{c1Ncs} and CRR.
- the model uncertainty term $\varepsilon_{\ln(R)}$ proposed by Boulanger and Idriss (2014) has a normal distribution with a mean value of 0 and a standard deviation of 0.2:

$$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1atm} = \exp\left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.60 + \varepsilon_{\ln(R)}\right)$$

On the basis of the above, a probability distribution of the $CRR_{M=7.5}$ has been derived, using the local median q_{c1Ncs} value and the $CRR_{M=7.5}$ curve of Boulanger and Idriss (2014).

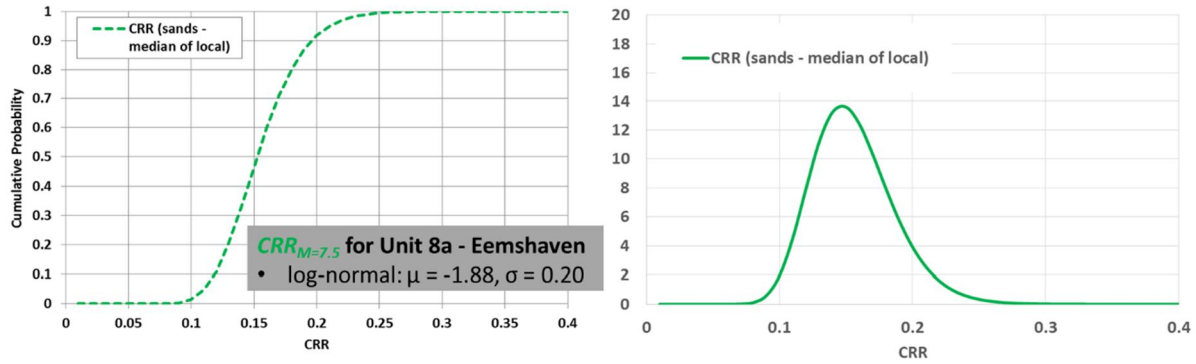


Figure 9. Probability distribution (left) and probability density function (right) of $CRR_{M=7.5}$ for sands at Eemshaven based on the median of local q_{c1Ncs} values.

4.4 $CRR_{M=5.0}$ in laminated deposits

The liquefaction triggering resistance from CPT measurements in laminated deposits appears to underestimate the triggering resistance of these deposits when compared to results from cyclic laboratory tests on laminated "undisturbed" samples (Fugro 2016c). This is most likely due to the significant influence of the clay layers on the CPT tip resistance measured within the thin "sandwiched" sand layers whose thickness is less than 10 to 20 cm.

Interpreted advanced cyclic laboratory tests on "undisturbed" laminated samples and numerical simulation results were used to develop a probability distribution of the cyclic resistance of laminated deposits at the Delfzijl side of the levee for locations were Unit 8 is present for use in FORM analyses as discussed in detail in Appendix D.

Cyclic resistance was defined at a reference magnitude M=5.0 (or 4 cycles) using the Boulanger and Idriss (2014) Magnitude Scaling Factor. It is noted that CRR for layered sands defined at 4 cycles (or for M=5.0) is used only as a reference to identify which triggering curve is used in the numerical analyses, since in the

constitutive models used in the numerical evaluations to simulate sand behavior, the complete liquefaction triggering curve is used rather than one value.

The probability distributions of the $CRR_{M=5}$ for laminated deposits after accounting for volume effects (spatial averaging, see Appendix G) are shown in Figure 10. Note: the means and standard deviations in Figure 10 concern the natural logarithms of the CRRs.

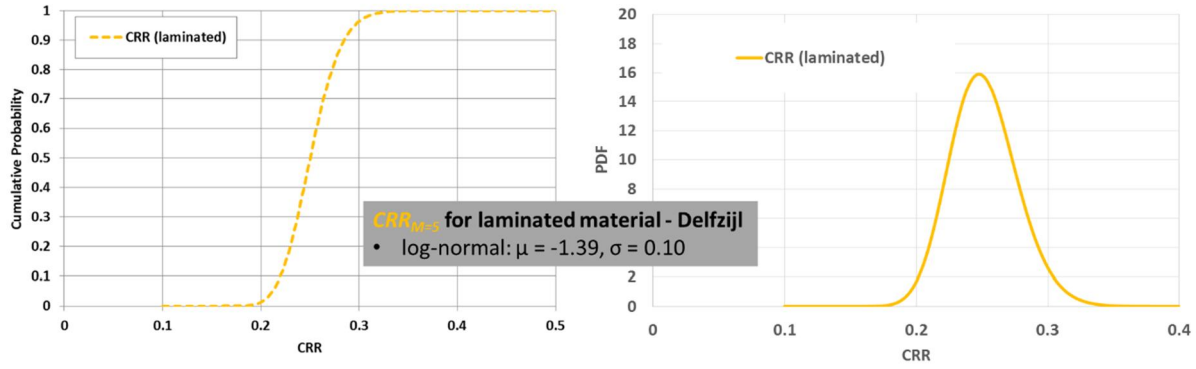


Figure 10. Probability distribution (left) and probability density function (right) of $CRR_{M=5}$ for laminated deposits at Delfzijl before and after accounting for volume effects.

The probability distribution of the CRR for laminated deposits shown above has been specified for a different magnitude than the non-laminated wadzand deposits encountered at Eemshaven. For the non-laminated wadzand deposits encountered at Eemshaven, the Boulanger and Idriss (2014) empirical correlation of $CRR_{M=7.5}$ (defined as CRR at 15 cycles) with q_{c1Ncs} was used for the estimation of liquefaction triggering resistance. For the laminated sand and clay layers within the wadzand deposits interpreted lab results were used to estimate liquefaction triggering resistance at 4 cycles ($CRR_{M=5.0}$), which is the estimated equivalent number of cycles for an M=5 earthquake (the primary contributor to the ground motion hazard for the return periods of interest) using the Boulanger and Idriss (2014) Magnitude Scaling Factor.

4.5 Uncertainty related to residual strength ($\varepsilon_{Su/p'}$)

Post-earthquake stability analyses were performed by assigning residual strength (i.e. defined as the ratio of residual undrained shear strength and in situ initial vertical effective stress, S_r/σ_{vc}') for areas where the maximum excess pore pressure during shaking exceeded a specified threshold indicative of liquefaction. The following distributions were considered:

- mean residual strength and standard deviation as proposed by Kramer and Wang (2015), which is about 0.37 for the range of conditions applicable (green lines in Figure 11 below). This is considered to be the preferred basis for probabilistic analyses since it includes an empirically based uncertainty term, without bias. The proposed relationship for mean residual strength by Kramer and Wang (2015) is a function of normalized SPT blowcounts (N_{160}). We have used Idriss and Boulanger (2008) correlation to convert N_{160} to q_{c1Ncs}. In order to account for the uncertainty in the conversion factor we have also considered a higher value for the standard deviation of 0.45 (red lines in Figure 11 below). We note that FORM analyses were performed considering both standard deviation values and results were found to be largely similar.
- residual strength proposed by Idriss and Boulanger (2008) assuming void redistribution effects are significant. A clear definition of the uncertainty in residual strength estimates is not available. An estimate of the uncertainty on residual shear strength was developed assuming that the proposed curve represents median values (despite a likely safe bias) and using engineering judgment to develop an estimate of the standard deviation on the assumed median residual strength curve. More details are provided in Appendix E. This residual strength distribution has been used to evaluate the sensitivity of the calculated FORM influence coefficients to different assumptions concerning residual strength.

A comparison of the two residual strength distributions considered is shown in Figure 11.

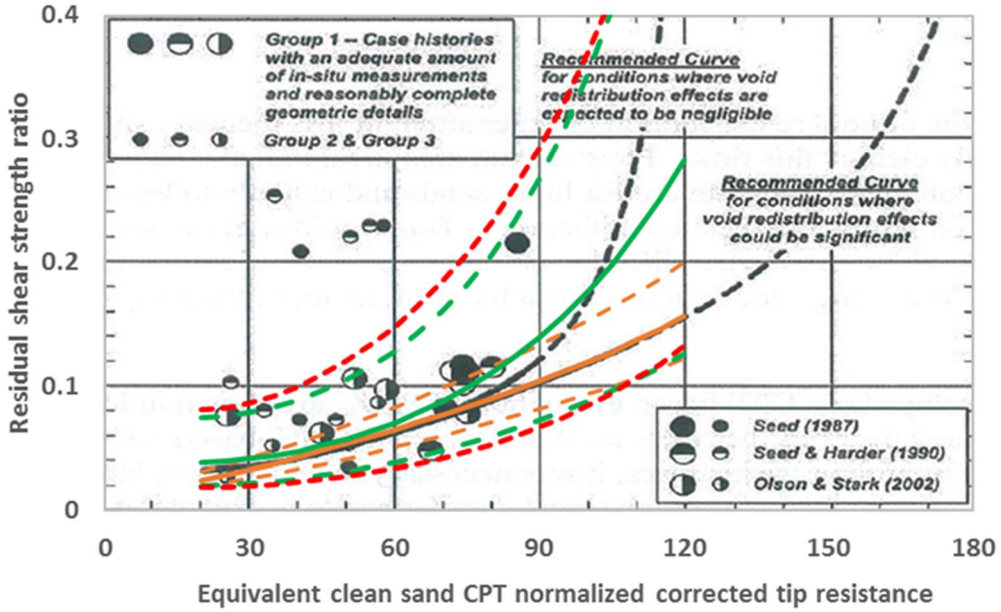


Figure 11. Uncertainty related to residual strength (95%-confidence interval) based on Kramer and Wang (2015) using the standard deviation proposed by the authors (green dashed curves) and an increased standard deviation of 0.45 (red dashed curves) to account for uncertainty in the conversion from $(N1)_{60}$ to q_{c1Ncs} , and Idriss and Boulanger (2008) assuming void redistribution and engineering judgment for the estimation of standard deviation (orange curves).

4.6 Model Uncertainty (ε_M)

This term accounts for the potential difference between numerical model prediction and observed levee response. The expert panel (2016) has recommended a comparison of constitutive models and their implementations for informing choices concerning model uncertainty. Various sensitivity studies have shown that the differences between the computed crest settlements with two different constitutive models (UBCsand and PM4sand) are relatively small (Fugro 2016a). A comparison of computed settlements with different computer codes (i.e. different implementations of these constitutive models) could not be carried out because of time constraints. In view of this the model uncertainty has conservatively been assumed to be considerable, even though the differences between different computer codes are expected to be significantly smaller than those between different constitutive models. A detailed discussion on the characterization of model uncertainty is included in Appendix F.

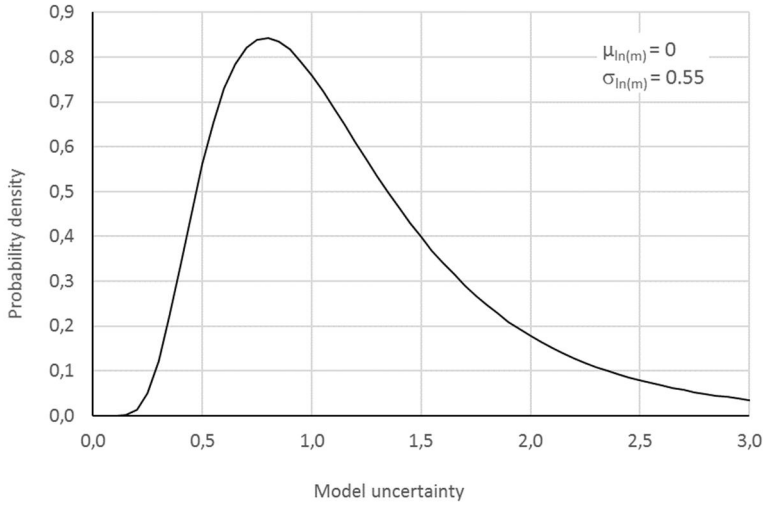


Figure 12. Model uncertainty.

4.7 Uncertainties related to motion characteristics

Ground motion characteristics mainly relate to amplitude, frequency content, and duration, but also to other characteristics of the ground motion that have to do with the details of the ground motion time history such as phasing, presence of velocity pulses that may create larger slope displacements, etc. The FE analyses have been conducted using motions that have been matched to a target spectral shape. Sensitivity analyses have been conducted to assess the variations in response for 7 different, two component motions (Fugro 2016a).

The effect of the uncertainties related to the characteristics of ground motion can be handled via scenarios. In that case, failure probabilities are first calculated for a set of motions and then combined, see Appendix H. For deriving design values for an assessment for an individual ground motion, FORM-analyses have been conducted using a single motion with a duration $D_{5\text{-}75}$ that is greater than the expected durations for 3000-6000 year return period ground motions in Groningen. Sensitivity analyses were also conducted with a shorter duration motion because the spectral acceleration at the design point has a significantly longer return period. In Groningen, duration and spectral acceleration are inversely correlated (Bommer et al. 2015). Longer return periods are associated with higher spectral accelerations and smaller duration motions.

4.8 Overview of stochastic variables

An overview of the stochastic variables, their distributions, autocorrelations and representative values is given in Table 1.

Table 1. Overview of stochastic variables.

Variable	Unit	Distribution type	Distribution parameters*	Mean (m) and standard deviation (sd)*	Motivation	Spatial correlation (also see section 7.4)
Spectral acceleration (T=0.85s) at NSUB (SA_{NSUB})**	g	Lognormal	Eemshaven μ = -5.77 σ = 1.12 Delfzijl μ = -5.61 σ = 1.10	Eemshaven m = 0.0058 g sd = 0.0092 g Delfzijl m = 0.0067 g sd = 0.0103 g	From KNMI hazard curves for Groningen	Strongly correlated over distances of several km
Spectral acceleration (T=0.85s) at base of model (SA_{model_base})	g	Lognormal	Eemshaven μ = -5.05 σ = 0.99 Delfzijl μ = -4.62 σ = 0.96	Eemshaven m = 0.0105 g sd = 0.0135 g Delfzijl m = 0.0156 g sd = 0.0135 g	Convolution of amplification factor distribution at base of 2D FE model and hazard curve at NSUB following Stewart et al (2014) procedure. The estimation of the amplification factor at base of FE models is described in Appendix C.	Strongly correlated over distances of several km
$CRR_{M=7.5}$ in sand deposits	-	Lognormal	μ = -1.88 σ = 0.20 (distribution of point values in the regional data set: μ = -1.80 σ = 0.30)	m = 0.16 sd = 0.03 (distribution of point values in the regional data set: m = 0.17 sd = 0.05)	Volume effects have been accounted for to obtain a distribution from a local data set of q_{c1Ncs}-values that can be used in a uniform model. For further details, , see Appendix G. The distribution of point values rests on a convolution of the model uncertainty term in the CRR-relationship by Boulanger & Idriss (2014), with μ = 0 and σ = 0.2, and the distribution of q_{c1Ncs} values in sand from a regional data set. This distribution has only been used for sensitivity analyses.	Strongly correlated over distances of several km for a given geological unit. Motivation: The $CRR_{M=7.5}$-values are derived from an empirical relationship that rests on back-calculations of historic events. Length effects are reflected in the individual historic observations. The above means that the uncertainty related to $CRR_{M=7.5}$ could be thought of as a model uncertainty which is typically assumed to be strongly spatially correlated.
$CRR_{M=5.0}$ in laminated deposits (from lab data)	-	Lognormal	μ = -1.39 σ = 0.10 (without spatial averaging: μ = -1.40 σ = 0.20)	m = 0.25 sd = 0.03 (without spatial averaging: m = 0.25 sd = 0.05)	Based on regressions of lab test results and numerical simulations (see Appendix D). Volume effects have been accounted for. For a discussion on volume effects, see Appendix G.	ρ_0 = 0 - 0.5 k = 100-150m (+ sensitivity analyses) A correlation distance (k) that is in line with the value used for material properties in slope stability analyses in the Netherlands seems justified. The variance is largely related to the variations in clay content (void ratio). For a given void ratio, the resistances are spatially correlated. A review of CPT-

Variable	Unit	Distribution type	Distribution parameters*	Mean (m) and standard deviation (sd)*	Motivation	Spatial correlation (also see section 7.4)
						data indicate that similar clay contents extend over distances of tens to hundreds of meters. A lower limit of the autocorrelation function (ρ_0) greater than zero seems reasonable because there is also an element of (spatially correlated) knowledge uncertainty related to the $CRR_{M=5.0}$ in layered deposits.
$\varepsilon_{Su/p'}$ (uncertainty related to Su/p' given median value of q_{c1Ncs})	-	Lognormal	$\mu = 0$ $\sigma = 0.45$ $\mu = 0$ $\sigma = 0.15$	m = 1.11 sd =0.52 m = 1.01 sd = 0.15	Su/p' from Kramer and Wang (2015). $Su/p' = f(q_{c1Ncs,50\%}) \cdot \varepsilon_{Su/p'}$ With $f(q_{c1Ncs,50\%})$ from Idriss & Boulanger (2008) with void ratio distribution. For further details, see Appendix E.	Strongly correlated over distances of several km (essentially model uncertainty)
Geometric parameters (crest height, width etc.)	m	Deterministic	-	-	Dimensions are well known	-
Model Uncertainty	-	Lognormal	$\mu = 0$ $\sigma = 0.55$	m = 1.16 sd = 0.69	Distribution based on engineering judgement, see Appendix F. The distribution corresponds to a probability of an error of at least a factor 2 of 10%.	Strongly correlated over distances of several km

* The values of μ and σ in this table are the means and standard deviations of the natural logarithms of the lognormally distributed variables. They are not the means and standard deviations of the lognormally distributed variables themselves, which have been indicated by m and sd respectively.

** This distribution will not play a role in the FORM-analyses. It is only mentioned here to be able to calculate the difference between the design value of the Spectral acceleration (T=0.85s) with and without a design value for the uncertainty in the response analysis.

5 Action item 2: FORM analyses using the simplified liquefaction procedure

The objective of this action item is to "get a feel" for the relative importance of the various uncertainties from probabilistic analyses with the simplified liquefaction procedure. The usefulness of this action item rests on the premise that the relative importance of stochastic variables that determine liquefaction triggering is broadly similar within a simplified liquefaction triggering analysis (the basis of the screening method) and more advanced FEM deformation analyses. The results presented below have been used for selecting the start values for the FORM-analyses with the FEM model, to reduce the required number of iterations. They have also been used for quality assurance, to make it easier to spot errors.

5.1 Limit state function

The simplified liquefaction procedure involves an evaluation of a "factor of safety" (FS_{liq}) against liquefaction (see Idriss & Boulanger 2008; Boulanger & Idriss 2014; Green et al. 2016). Note that FS_{liq} is a stochastic variable and not a partial factor.

$$FS_{liq} = CRR_{7,5,1atm} / CSR_{7,5,1atm} \quad (5)$$

$$CSR_{7,5,1atm} = 0{,}65 \cdot \sigma_v/\sigma'_v \cdot PGA/g \cdot r_d \cdot 1/MSF \cdot 1/ K_\sigma \quad (6)$$

$$CSR_{7,5,1atm} = c \cdot PGA \quad (7)$$

$$CRR_{7,5,1atm} = \exp[q_{c1Ncs}/113 + (q_{c1Ncs}/1000)^2 - (q_{c1Ncs}/140)^3 + (q_{c1Ncs}/137)^4 - C_o + \varepsilon_{ln(CRR)}] \quad (8)$$

Since $FS_{liq}<1$ implies liquefaction, the limit state function for liquefaction triggering can be written as follows:

$$Z = 1 - CRR_{7,5,1atm} / CSR_{7,5,1atm} \quad (9)$$

or (similar to Boulanger & Idriss 2014):

$$Z=\ln(CRR_{7,5,1atm}) - \ln(CSR_{7,5,1atm}) \quad (10)$$

or:

$$Z=\ln(CRR_{7,5,1atm}) - \ln(c \cdot PGA) \quad (11)$$

Where:

$CRR_{7,5,1atm}$	Cyclic resistance ratio (-)
$CSR_{7,5,1atm}$	Cyclic stress ratio (-)
PGA	Peak ground acceleration at the surface of the soil profile (m/s^2)
g	Gravitational acceleration (m/s^2)
σ_v	Total effective stress (kPa)
σ'_v	Effective vertical stress (kPa)
r_d	Depth reduction factor (-)
$\varepsilon_{ln(CRR)}$	Uncertainty term
MSF	Magnitude scaling factor (-)
K_σ	Overburden correction factor (-)
c	Constant (-)
q_{c1Ncs}	Equivalent, normalized cone resistance for clean sand (-)
C_0	Constant (-)

A PSHA has been carried out to estimate the seismic hazard at the top of North Sea Upper Base (NSUB) at a depth of about 350m by KNMI. For the estimation of PGA at the ground surface, amplification factors or functions (AF) have been estimated as a function of the spectral acceleration at NSUB by Bommer et al. (2015).

For every location and period, the parameter values of the following equation can be found in "V2_Site Response Zonations_date.xlsx":

$$\ln(AF) = f_1 + f_2 (PGA_{NSUB} + f_3) / f_3 + u \cdot \sigma_{lnAF} \quad (12)$$

Where:

AF Amplification factor (-)

f_1, f_2, f_3 Constants (-)

PGA_{NSUB} Peak ground acceleration at North Sea Upper Base (g)

u Standard normal variable (-)

σ_{lnAF} Standard deviation of the natural logarithm of the uncertainty related to the amplification function (-)

5.2 Input of probabilistic analyses

An overview of the stochastic variables and their distributions is given in Table 2.

Table 2. Overview of stochastic variables.

Variable	Unit	Distribution type	Distribution parameters	Mean (m) and standard deviation (sd)*	Motivation
PGA	g	Lognormal	μ = -3.95 σ = 0.61	m = 0.0232 g sd = 0.0156 g	The PGA hazard curve was estimated following the procedure by Bazzurro and Cornell (2004) and Stewart et al. (2014) by a convolution of the hazard curve at top of bedrock (PGA_{NSUB}) with the probability distribution of the site amplification factor by Bommer et al (2015) for Eemshaven (i.e. zone number 1035). Monte Carlo simulations were also performed for the convolution of the bedrock hazard curve and the site amplification probability distribution and similar results were obtained. The hazard curve of PGA at the ground surface was approximated with a lognormal distribution.
$CRR_{M=7.5}$ in sand deposits	-	Lognormal	μ = -1.88 σ = 0.20	m = 0.16 sd = 0.03	Based on a convolution of the model uncertainty term in the CRR-relationship by Boulanger & Idriss (2014), with μ = 0 and σ = 0.2, and the median of local q_{c1Ncs}-values in sand, see Appendix G for further details.

5.3 Results of FORM-analyses

The squared influence coefficients per stochastic variable are shown in Figure 13 below. The influence coefficients are identical for different values of the constant c (see equation (7)), and thus the same for different (target) reliabilities. For more information about FORM, see Appendix A.

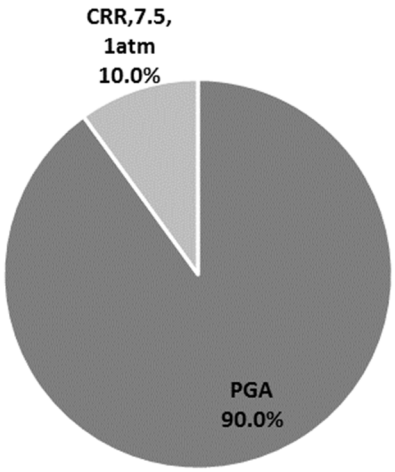


Figure 13. FORM-results for a simplified liquefaction triggering analysis.

For a range of c-values (see equation (7)) that seem reasonable for Eemshaven, the calculated reliability indices range from about 2.2 to 3.2.

5.4 Discussion

The results shown above are in line with:

1. the fact that the return period of the earthquake load is widely regarded as an all-important parameter,
2. the fact that a widely used “deterministic” triggering relationship corresponds to merely a 16%-quantile for model uncertainty (Boulanger & Idriss 2014).

6 Action item 3: FORM analyses using the 2D effective stress model

The objective of this action item is to "get a feel" for the relative importance of the various uncertainties from probabilistic analyses with the Fugro model. For more information about FORM, see Appendix A.

6.1 Limit state function

The limit state function is:

$$Z = c_{crit} - m \cdot C \quad (13)$$

Where

c_{crit} Critical crest settlement (m); c_{crit} = 3 m
C Computed crest settlement (m)
m Model uncertainty factor (-)

Crest settlements are calculated with dynamic effective stress FEM-analyses. For further details on the calculation procedure, the reader is referred to the guideline prepared by Fugro (2016b).

6.2 Input of probabilistic analyses

For an overview of the stochastic variables and their distributions, the reader is referred to Table 1 in chapter 4. The stratigraphies for the Eemshaven and Delfzijl levees that have been considered in FORM-analyses are given in Figure 14 and Figure 15 below. Conservative stratigraphies have deliberately been selected to minimize the gap between reliability indices close to target reliability indices. Additional stratigraphies have been considered in Fugro (2016a) as a part of sensitivity analyses.

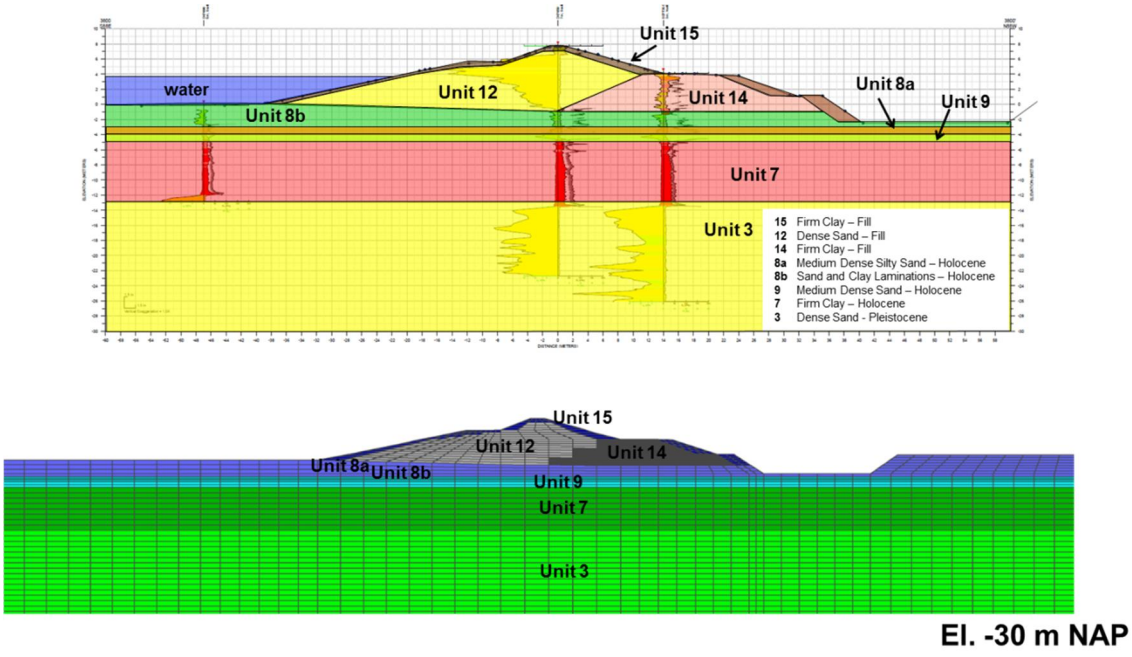


Figure 14. The stratigraphy for the Eemshaven cross-section considered in the FORM-analysis.

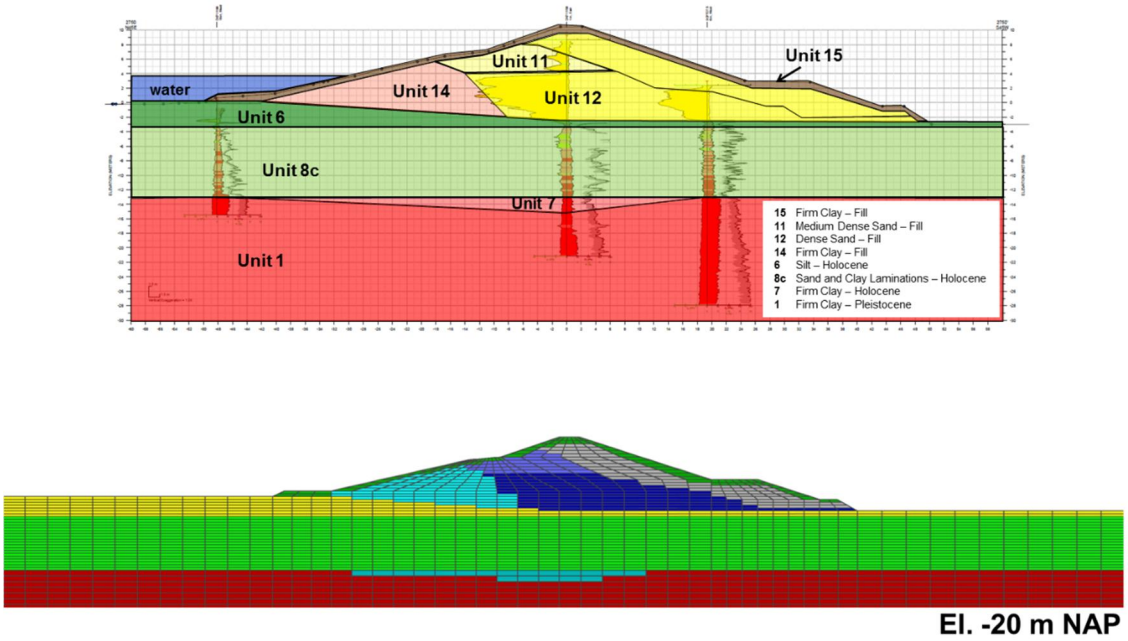


Figure 15. The stratigraphy for the Delfzijl cross-section considered in the FORM-analysis.

6.3 Results of FORM-analyses

The results of the FORM analyses using the 2D FEM results are presented in this section. The following cases were examined:

Base case

A. Eemshaven cross-section; Su/p' according to Kramer & Wang (2015); ground motion 4; using the median of local q_{c1Ncs}-values.
B. Delfzijl cross-section; Su/p' according to Kramer & Wang (2015); ground motion 4; using the median of local q_{c1Ncs}-values.

Sensitivity analyses

1. Eemshaven cross-section; Su/p' according to Kramer & Wang (2015); ground motion 6; using the median of local q_{c1Ncs}-values.
2. Delfzijl cross-section; Su/p' according to Kramer & Wang (2015); ground motion 6; using the median of local q_{c1Ncs}-values.
3. Eemshaven cross-section; Su/p' according to Idriss & Boulanger (2008); ground motion 4; using a regional data set of q_{c1Ncs}-values without spatial averaging.
4. Delfzijl cross-section; Su/p' according to Idriss & Boulanger (2008); ground motion 4; using a regional data set of q_{c1Ncs}-values without spatial averaging.

All FORM-analyses have been performed using a response surface. For both base cases, the design point (crest settlement and partial derivatives) has been verified using targeted FE-analyses (usually a set of 9 FE-analyses). The same applies to sensitivity analyses no. 3 and 4. For sensitivity analyses no. 1 and 2, only the crest settlement in the design point has been verified with a single, targeted FE-analysis.

The squared influence coefficients per stochastic variable are shown in Figure 16 to Figure 18 below for the cases examined. The calculated reliability indices are also shown on the figure for every case.

For a detailed overview of the results of the FORM-analyses, the reader is referred to Appendix I.

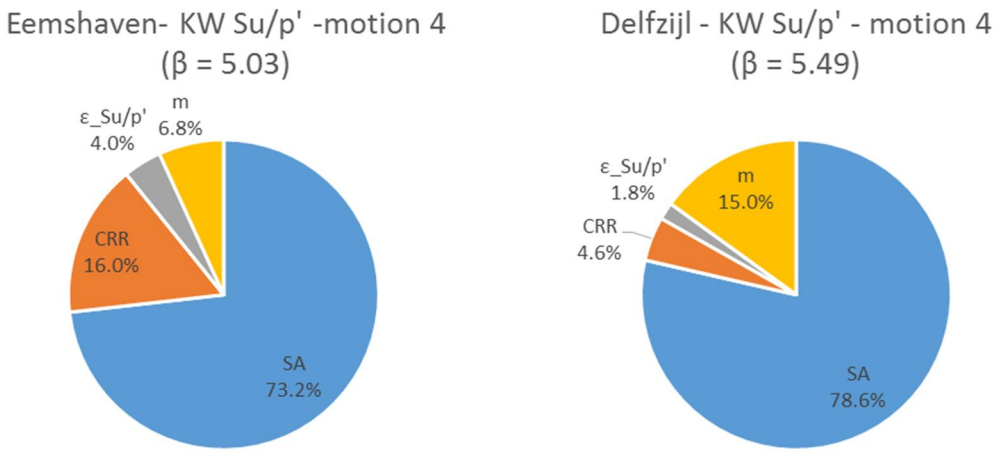


Figure 16. Base case A (left) and B (right): squared influence coefficients and reliability indices from FORM-analyses with the 2D FE model with Su/p' according to Kramer & Wang (2015) and the median of local qc1Ncs-values, for ground motion 4.

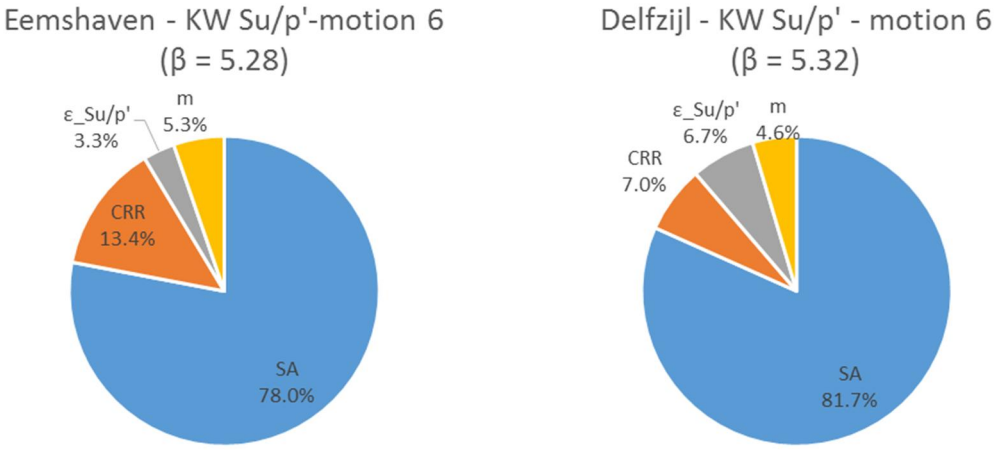


Figure 17. Sensitivity analyses 1 (left) and 2 (right): squared influence coefficients and reliability indices from FORM-analyses with the 2D FE model with Su/p' according to Kramer & Wang (2015) and the median of local qc1Ncs-values, for ground motion 6.

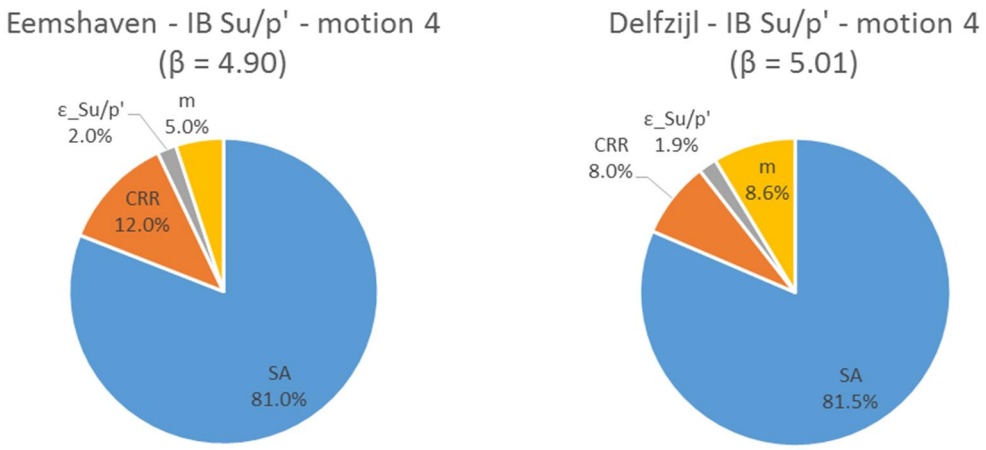


Figure 18. Sensitivity analyses 3 (left) and 4 (right): squared influence coefficients and reliability indices from FORM-analyses with the 2D FE model with Su/p' according to Idriss & Boulanger (2008), using a regional data set of q_{c1Ncs}-values without spatial averaging, for ground motion 4.

6.4 Discussion

The calculated influence coefficients for Eemshaven and Delfzijl appear broadly similar. The uncertainty related to the spectral acceleration is relatively important. This is in line with the results of the FORM-analyses for liquefaction triggering with the simplified liquefaction procedure (see chapter 5). It is also in line with the observation that the return period of the seismic action is widely considered to be an all-important parameter.

The calculated reliability indices are high, even though conservative assumptions have been made concerning stratigraphy: a reliability index of 5 corresponds to a probability of failure of about 1/3.500.000 per year ($2{,}9.10^{-7}$ per year). The calculated reliability indices are significantly greater than the ones calculated for liquefaction triggering in chapter 5. This is consistent with the fact that the FORM-analysis in chapter 5 concerns the probability that $FSl_{iq}<1$ somewhere. This is not the same as actual failure.

Analyses were conducted for two different residual strength distributions. As was to be expected on the basis of the similarities between the relationships presented in Figure 11 for lower values of q_{cN1cs}, the calculated reliability indices and influence coefficients are broadly similar.

A sensitivity analysis with a shorter duration motion shows a higher reliability index. The influence coefficient of ground motion is somewhat reduced.

The calculated influence coefficients are broadly similar across all cases.

7 Action item 4: Revisiting the length effect

7.1 Introduction: cross-sectional and system-level reliability assessments

The Dutch flood protection standards are defined in terms of maximum allowable probabilities of flooding. These standards are system-level reliability requirements: they apply to segments of about 5 to over 40 kilometers in length. The probability of flooding is the probability that a segment fails somewhere, for whatever reason, leading to the flooding of the hinterland (Figure 19).

A **segment** can be decomposed into sections. **Sections** are defined here as continuous lengths in which load and resistance properties are statistically homogeneous. The term "**uniform length**" is used here to refer to a length in which the spatial variability of demand and capacity along the dike can be ignored when evaluating a limit state function.[1] A reliability analysis for a uniform length is commonly referred to as a cross-sectional analysis. Segments may consist of numerous sections, and sections of numerous uniform lengths, see also Figure 20.

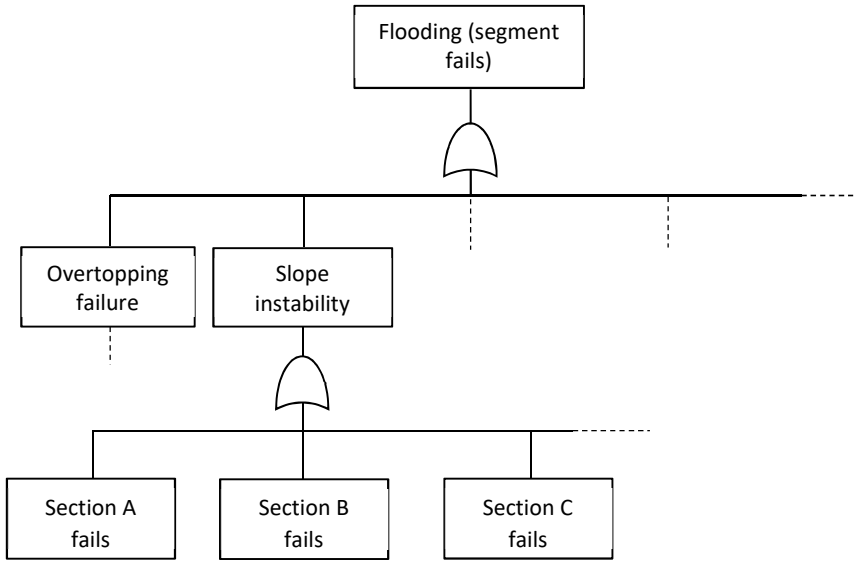


Figure 19. Fault tree for a segment.

Note that different terms and definitions are sometimes used for similar concepts. For instance, the USACE (2013): I-5) says: "A levee reach is defined for the purpose of risk analysis as a continuous length of levee exhibiting homogeneity of construction, geotechnical conditions, hydrologic and hydraulic loading conditions, consequences of failure, and possibly other features relevant to performance and risk". The main differences with a "section", as defined above, concerns the fact that only features related to performance are considered here and that a "section" could also be a dune or a structure. Jongejan & Maaskant (2015) used the term "cross-section" instead of "uniform length". Kwak et al. (forthcoming) use the term "reach" for "section" and "segment" for "uniform length".

[1] Demand and capacity may concern point values or spatial averages, depending on the limit state function.

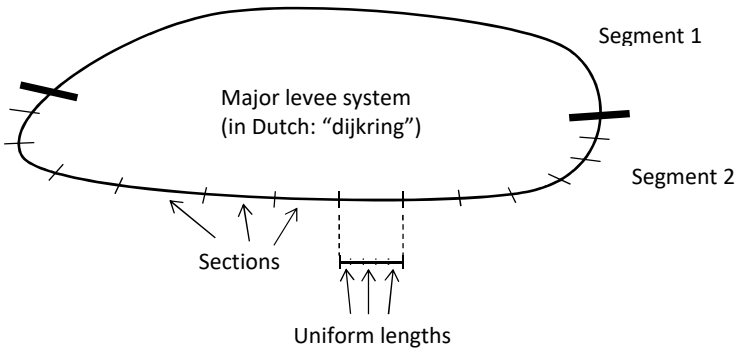


Figure 20. Major levee system, segments, sections and cross-sections.

The failure probability for a uniform length, $P(F_i)$, is the probability that the limit state function is smaller than zero in a 2-dimensional or cross-sectional analysis:

$$P(F_i) = P(Z_i<0) \quad (14)$$

Where
Z_i Limit state function of uniform length i (i=1..n); $Z_i<0$ indicates failure

A segment can be thought of as a series system consisting of numerous uniform lengths (grouped into sections). A segment's failure probability, $P(F_{system})$, follows from[2]:

$$P(F_{system}) = P(Z_1<0 \cup Z_2<0 \cup \ldots \cup Z_n<0) \quad (15)$$

The failure probability of a series system lies between the following bounds:

$$P(F_{system}) = \max(P(Z_i)<0) \quad \text{Lower bound (perfectly correlated limit state functions)} \quad (16)$$

$$P(F_{system}) = 1 - \Pi_{i=1\ldots n}(1 - P(Z_i<0)) \quad \text{Upper bound (independent limit state functions)} \quad (17)$$

For sufficiently small failure probabilities, the upper bound can be approximated by:

$$P(F_{system}) \approx \Sigma(P(Z_i<0)) \quad (18)$$

When the limit state functions of the different uniform lengths are strongly correlated, the system failure probability tends to the lower bound. When the limit state functions are weakly correlated, the system failure probability tends to the upper bound. The difference between expressions (16) and (17) is also strongly influenced by variations in cross-sectional failure probabilities. A single weak spot may strongly influence a series-system reliability, regardless of spatial correlations.

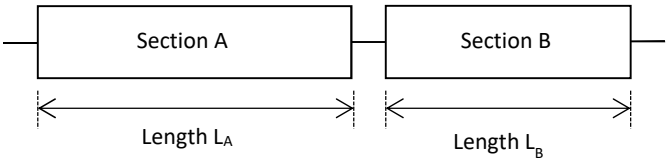
The system failure probability for a particular failure mechanism can be calculated on the basis of:
1. cross-sectional failure probabilities (identical throughout each section),
2. the effect of spatial correlations within each section and
3. the correlations between sections.

This is illustrated by Figure 21. Note that uniform lengths could be treated like sections when calculating a segment's failure probability. A distinction is made here because the homogeneity within sections allows for the use of relatively efficient computational techniques to calculate the failure probability of a section. A section is essentially a series system of uniform lengths, i.e. a system of correlated components. It can also be modelled as a series system of independent equivalent lengths. These independent equivalent lengths depend on the correlations between uniform lengths. With such an independent equivalent length, the failure

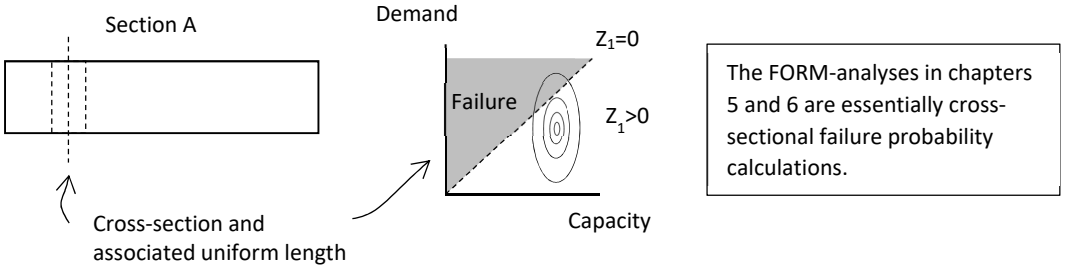
[2] For reasons of simplicity, only a single failure mechanism is considered here.

probability for a single uniform length can be scaled directly to the failure probability of an entire section (see e.g. Vrouwenvelder 2006).

Consider a series system (segment) that consists of two components (sections)

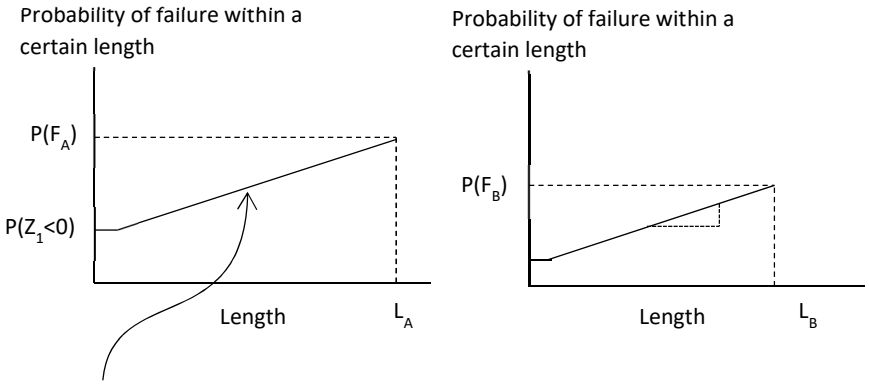


1. Calculate cross-sectional failure probabilities
(example for section A only)



The FORM-analyses in chapters 5 and 6 are essentially cross-sectional failure probability calculations.

2. Calculate each section's failure probability, based on spatial correlations and cross-sectional reliabilities

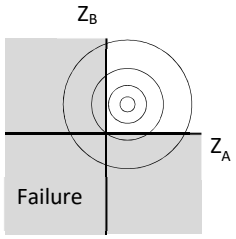


The steepness of this line depends on the (spatial) autocorrelation function of the limit state function Z_1

3. Combine the sections, taking their correlations and varying reliabilities into account

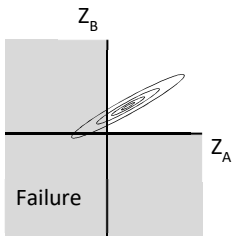
$P(F_{system}) = P(F_A \cup F_B) = P(Z_A<0 \cup Z_B<0)$

No correlation ($\rho_{Z_AZ_B}= 0$)



$P(Z_A<0 \cup Z_B<0) \approx P(Z_A<0) + P(Z_B<0)$

Strong correlation ($\rho_{Z_AZ_B} \approx 1$)



$P(Z_A<0 \cup Z_B<0) \approx \max(P(Z_A<0) , P(Z_B<0))$

Figure 21. Schematic overview of a system reliability analysis.

When engineers evaluate the reliability of e.g. a dike section using a semi-probabilistic or deterministic method, they carry out a 2-dimensional analysis. To be able to evaluate an individual cross-section without having to carry out a full system-level reliability analysis, the system-level reliability requirement has to be transformed into a cross-sectional reliability requirement.

7.2 The length effect and cross-sectional target reliabilities

When the limit state functions of different uniform lengths are not perfectly correlated, the system failure probability increases with the number of uniform lengths (Figure 22). This means that the system failure probability increases with length. This phenomenon is called the length effect.

The above can be understood as follows. When capacity is uncertain *and* spatially variable, it is uncertain (1) which spot is actually the weakest and (2) how weak this weakest spot actually is. This also explains why people that inspect levees during high waters do not stand still: the probability that they observe a sign of weakness increases with every step they take. Note that the spatial variability of demand can also lead to a length effect: the probability of observing a particular seismic demand *somewhere* in Groningen is higher than the probability that it is observed *at any specific location* in Groningen.

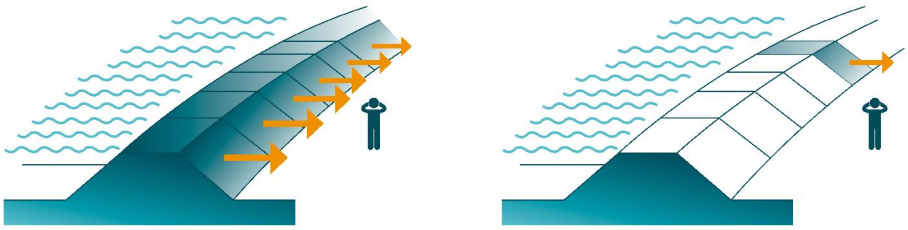


Figure 22. The length effect: the greater the number of uniform lengths that could fail independently, the greater the probability of flooding.

The Dutch flood protection standards are defined in terms of maximum allowable probabilities of flooding per segment ("dijktraject"). Cross-sectional target reliabilities for evaluating the probability of severe earthquake damage can be derived from these standards with the following expression:

$$P_T = P_{max} \cdot f / P_{F|D} / N \quad (19)$$

with:

$$N = a \cdot L / b \quad (20)$$

Where

P_T	Cross-sectional target failure probability for a seismic stability assessment (per year)
P_{max}	Maximum allowable probability of flooding (per year)
f	Maximum allowable contribution of instability to the probability of flooding (-)
$P_{F\|D}$	Probability of flooding given severe earthquake damage, defined as a crest settlement ≥3m (-)
N	Length effect factor for severe earthquake damage (-)
L	Length of segment (m)
a	Fraction of the total length of the segment that dominates the probability of failure of the segment for the failure mechanism under consideration (-)
b	Independent equivalent lengths within the abovementioned part of the segment (m)

The parameters a and b model a segment that consists of different sections with different characteristics in a simplified, equivalent manner, as shown in Figure 23. The failure probability of a segment is usually determined by a relatively short distance over which the probabilities of failure are relatively high, which is expressed by the a-value. Note that failure probabilities are usually plotted on a log-scale because they easily vary of orders

of magnitude; combining failure probabilities of e.g. 1/1000 and 1/100.000 gives a system failure probability close to 1/1000. Within the "critical length" (i.e. "a · L"), the effect of decay of spatial correlation can be modelled by means of "independent equivalent lengths". This is reflected by the b-value.

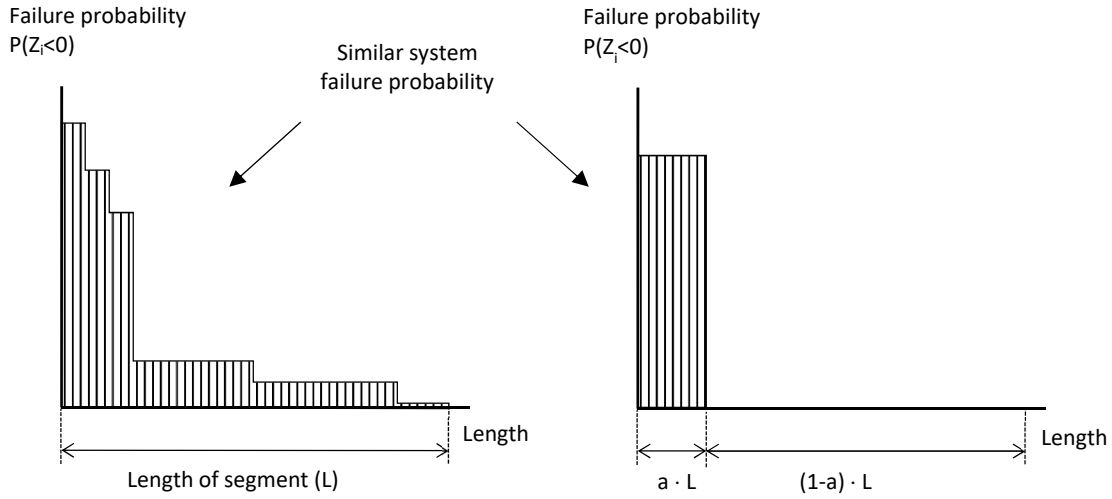


Figure 23. A simplified, equivalent way of describing a segment's reliability (the widths of the bars are independent equivalent lengths, or b-values).

The parameter values that have been assumed so far are shown in Table 3, together with the resulting target reliabilities.

Table 3. From standard of protection to cross-sectional target reliabilities for seismic stability assessments. Original values.

Variable	**Unit**	**Segment**	
		6_6 (includes Eemshaven)	**6_7 (includes Delfzijl)**
P_{max}	**per year**	**1/1,000**	**1/3,000**
f	-	0.24	0.24
$P_{F\|D}$	-	0.1	0.1
$P_{T,segment}$	**per year**	**0.0024**	**0.0008**
L	m	46100	38600
a	-	0.033	0.033
b	m	50	50
N	-	31.4	26.5
P_T	**Per year**	**7.64E-05**	**3.02E-05**
β_T	**-**	**3.79**	**4.01**

The values of parameters a and b in Table 3 were selected at a meeting held in December 2015. Back then, it was proposed to hold on to the values that are more commonly used in slope stability assessments in the Netherlands, i.e. a=0.033 (=1/30) and b=50m.[3] This was expected to be somewhat conservative, but little was known at the time about the seismic stability of the Eemshaven-Delfzijl levees. It was therefore proposed to revisit the length effect when the results of the first seismic stability assessments would come available (Figure 24). This action item could be viewed as a follow-up on the abovementioned proposal. It draws upon the results of the LPI-screening (Deltares 2017) and the FORM-analyses presented in chapter Figure 24 to re-evaluate the length effect.

[3] The value a=0.033 stems from an old study for the Alblasserwaard (one of the Dutch major levee systems) in which 10% of the levee system was found to be sensitive to slope instability. This value of 10% was divided in 3 following discussions over the effects of spatial correlations. The value has found its way into Dutch guidelines and is now widely used in slope stability assessments. The background of b=50m will be discussed in section 7.4. It rests on probabilistic analyses and is in line with the lengths of slope failures.

Aanwezig: Ton Vrouwenvelder (TNO), Ruben Jongejan (RMC), Matthijs Kok (TUD/HKV), Han Vrijling (Horvat), Ed Calle (Deltares), Marcel Visschedijk (Deltares, namens Noorderzijlvest), Bert de Wolff (namens Noorderzijlvest), Sjoerd de Wit (NAM), Geeralt van den Ham (notulist), Vincent Mures (NCG), Ate Wijnstra (Noorderzijlvest)

(page 1)

Met welk lengte-effect moet worden gerekend voor macrostabiliteit en hoogte, bij het bepalen van de maximaal toelaatbare faalkans in een doorsnede?

De correlatielengte voor aardbevingsbelasting is kleiner dan voor waterstandsbelasting en de invloedsfactor van de aardbevingsbelasting groter (0.9). Gegeven bovenstaande wordt voorgesteld om bij macrostabiliteit vast te houden aan de vertaling van eis per traject naar eis per doorsnede voor de situatie zonder aardbeving (conform OI2014, met a=0.033 en b=50 m). Dit lijkt enigszins conservatief, maar de gegevens ontbreken voor een betere inschatting en verwacht wordt dat het effect gering zal zijn.

(page 3)

- Voorgesteld wordt een nieuwe sessie te plannen zodra ontwerpprotocol D-E klaar is, met nieuwe verdeling pga (versie 2) en daarop gebaseerde nieuwe $\alpha_{aardbeving}$. Ook als de eerste ontwerpervaringen zijn opgedaan, is het verstandig om nog een keer samen te komen omdat dan de consequenties van keuzes beter bekend zullen zijn.

(page 7)

Figure 24. Quotes from the minutes of the meeting of December 2015 on the length effect (in Dutch).

7.3 Characterizing the length effect: the parameter a

The parameter a is defined as the fraction of the total length of the segment that dominates the probability of failure of a segment for the failure mechanism under consideration. Based on an LPI-screening for 11.5 km, 3 to 5 profiles have been selected for a detailed assessment to be able to give conclusions concerning the reliability of the entire stretch (Deltares 2017). These profiles are representative for a combined length of several hundred meters. Because of e.g. variations in stratigraphy, these four profiles are also unlikely to have identical failure probabilities. Considering this, there seems to be no obvious reason to move away from a=0.033.

7.4 Characterizing the length effect: the parameter b

7.4.1 Theory

The following theory forms the basis of the b=50m mentioned in section 7.2 that underlies the cross-sectional reliability requirements for slope stability assessments in the Netherlands (Calle & Barends 1990; Vrouwenvelder & Calle 2003). A levee could be thought of as a series system of statistically homogenous lengths. The failure probability of such a statistically homogeneous length L_{hom} can be approximated by (see e.g. Jongejan 2012 for a derivation):

$$P(F_{Lhom}) = 1-(1-P(F_{cross})) \cdot \exp(- L_{hom} /(2\pi) * \text{sqrt}(-d^2\rho_Z(0)/d\Delta^2) \cdot \exp(-\beta_{cross}^2/2)) \quad (21)$$

Where:
$P(F_{Lhom})$ Failure probability of a statistically homogeneous length (per year)
$P(F_{cross})$ Cross-sectional probability of failure (per year)
β_{cross} Cross-sectional reliability index (-)

The statistically homogenous length (L_{hom}) could be thought of, approximately, as a series system of independent, characteristics lengths (b):

$$b = P(F_{cross}) \cdot 2\pi / \text{sqrt}(-d^2\rho_Z(0)/d\Delta^2) \cdot \exp(\beta_{cross}^2/2) \quad (22)$$

which may be approximated as follows if β_{cross}, is positive and not very small, e.g. $\beta_{cross}>2$ (Vrouwenvelder 2006):

$$b = \mathrm{sqrt}(2\pi) \,/\, (\mathrm{sqrt}(-d^2\rho_Z(0)/d\Delta^2) \cdot \beta_{cross}) \quad (23)$$

The autocorrelation function of the limit state function can be approximated by the weighted sum of the autocorrelation functions for capacity and demand, with their weights being the squared influence coefficients:

$$\rho_Z(\Delta) = \Sigma\alpha_X^2 \, \rho_X(\Delta) \quad (24)$$

Where

$\rho_Z(\Delta)$ Value of the autocorrelation function of the limit state function, evaluated at lag Δ (-)

$\rho_X(\Delta)$ Value of the autocorrelation function of stochastic variable X, evaluated at lag Δ (-)

The different stochastic variables have different autocorrelation functions. The type of autocorrelation function that is widely used in stability analyses in the Netherlands has the following function form (Van Balen et al. 2016):

$$\rho_X(\Delta) = (1-\rho_0) \cdot \exp(-(\Delta/k)^2) + \rho_0 \quad (25)$$

Where:

ρ_0 Lower bound of the autocorrelation function (-)

k Spatial correlation length parameter (m)

Δ Distance/lag (m)

Examples of autocorrelation functions are given in Figure 25. A lower limit of the autocorrelation function greater than zero implies that part of the uncertainty related to a variable is (spatially correlated) epistemic uncertainty.

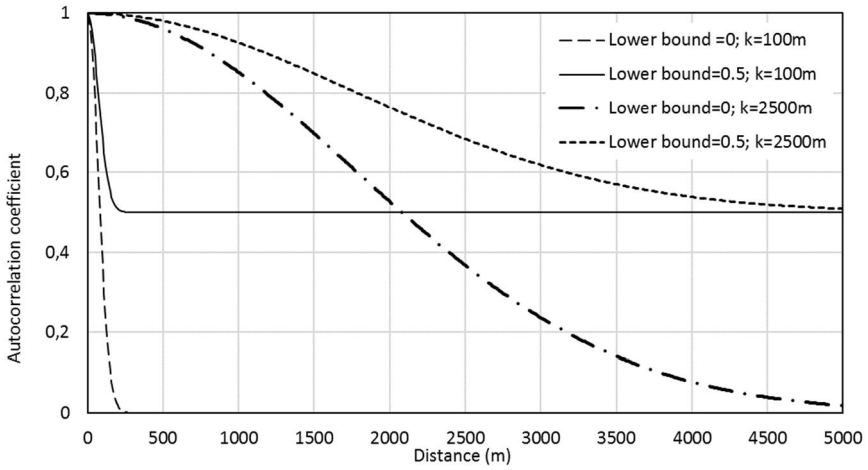


Figure 25. Examples of autocorrelation functions.

7.4.2 Sensitivity analyses

To inform a decision concerning the length effect, various sensitivity analyses have been performed. To simplify these analyses, the various stochastic variables from Table 1 have been grouped/combined into a stochastic variable that is strongly spatially correlated (named “demand” hereafter) and one that is not (named “capacity”). Treating the underlying variables separately does not change the results as long as each of these variables has the same autocorrelation function, see equation (24).

Not all variables are equally spatially variable. The ground motion, for instance, is strongly spatially correlated. The cyclic resistance ratio for layered deposits, on the other hand, is relatively weakly spatially correlated[4]. The influence coefficient from the FORM-analyses has been used as a reference for the influence coefficient of capacity, i.e. $\alpha_C^2 \approx 0.06$. The influence coefficient of capacity has also been increased to show the influence of e.g. treating the uncertainty related to $\varepsilon_{Su/p'}$ as equally spatially variable as the uncertainty related to the CRR in layered deposits (doing so would lead to $\alpha_C^2 \approx 0.08$; a higher value of 0.1 has been used instead). Similarly, it has been decreased ($\alpha_C^2 \approx 0.2$), which could be a reasonable approximation for cases without layered deposits. This is because the CRR for sand is based on an empirical relationship that rests on back-calculations of case histories (see also section 7.4.3). The influence coefficient for demand has been calculated by adding the squared influence coefficients of the remaining stochastic variables.

The results of the sensitivity analyses are shown in Table 4. The reported b-values stem from equation (22).

Table 4. Sensitivity analyses related to the length effect.

Case no.	β_{cross}	Capacity			Demand			b (m)
		α_C^2	$\rho_{0,C}$	k_C (m)	α_D^2	$\rho_{0,D}$	k_D (m)	
1	3	0,06	0,5	100	0,94	0	5000	310
2	4	0,06	0,5	100	0,94	0	5000	240
3	4	0,06	0,5	100	0,94	1	-	242
4	4	0,06	0,5	100	0,94	0	5000	240
5	4	0,06	0	150	0,94	0	5000	255
6	4	0,06	0,5	150	0,94	0	5000	357
7	4	0,1	0,5	100	0,9	0	5000	187
8	4	0,02	0,5	150	0,98	0	5000	600
9	4	0,5	0	100	0,5	1	-	59
10	4	0,5	0,5	100	0,5	1	-	84
11	4	0,5	0	150	0,5	1	-	89

Table 4 illustrates the following:

1. As shown by cases 1 and 2, the length effect increases with increasing reliability indices (as it should). A reliability index of 4 is close to the target reliability (slightly conservative). This is why this reliability index has been considered in the remaining case studies.
2. As shown by cases 2 and 3, the precise autocorrelation function for demand is largely irrelevant to the length effect, as long as this variable is much more strongly spatially correlated than capacity. The length effect is most strongly influenced by (1) the relative importance of the uncertainty related to capacity and (2) the autocorrelation function of capacity.
3. As shown by cases 3, 4 and 5, the length-effect depends on the autocorrelation function of the most weakly spatially correlated variables.
4. As shown by cases 6 and 7, the length effect increases (i.e. b decreases) when the relative importance of the uncertainty related to the spatially variable stochastic variables increases (i.e. α_C^2 increases, α_D^2 decreases).
5. As shown by cases 7 and 8, the length effect decreases (i.e. b increases) when the relative importance of the uncertainty related to the strongly spatially correlated stochastic variables increases (e.i. α_D^2 increases, α_C^2 decreases).
6. Cases 9 to 11 (bottom rows) show that the same procedure leads to b=50m-100m for inputs that are more common in slope stability assessments with a dominant hydraulic load (no earthquake). These analyses illustrate why b=50m is used as a basis for cross-sectional stability assessments in the WBI (the WBI is the instrument provided by the Minister for safety assessments).

The b-values in Table 4 for seismic stability are high compared to the b-value of 50m that underlies the Dutch technical guidelines for slope stability assessments (TAW 2001). This stems from the fact that the uncertainties related to strongly spatially variable stochastic variables are more important in seismic stability analyses than in high water stability analyses, making the limit state function fluctuate more slowly along the length of the dike.

[4] The CRR referred to here concerns a local average, see also Appendix G. Correlation distances for point values are considerably shorter.

7.4.3 Comparison with earthquake damage observations to embankments

Abstract
To verify whether the use of b-values of 200m to 350 m rather than 50m is justified for deriving cross-sectional reliability requirements for seismic stability assessments, the calculated b-values have been compared to damage observations from Japan and related academic research into spatial correlations. These comparisons show that embankment failures can indeed lead to significant damages that extend over hundreds of meters. The comparisons point to even higher b-values than those shown in Table 4. The conditions underlying the Japanese case histories and the conditions in Groningen differ markedly however. Hence, while the b-values in Table 4 still appear low in the light of damage observations, the use of higher values purely on the basis of damage observations is not considered prudent.

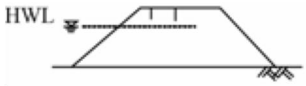
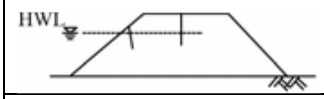
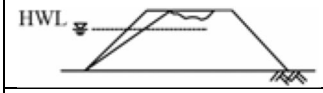
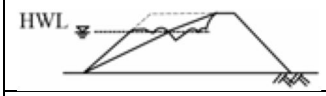
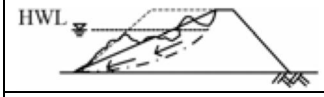
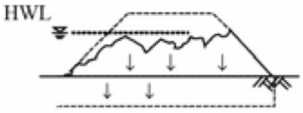
Interpreting independent, equivalent length as expected failure lengths
An independent equivalent length is often interpreted as the expected length of failures. This may not be correct, however, when the distributions of stochastic variables rest on back-analyses of case histories. Length effects are inherent to historical observations. When, for instance, liquefaction was not observed in a particular earthquake, it was not observed *anywhere* in the affected region. When distributions rest on back-calculations of case histories, the computed b-value should be interpreted as the length in which a levee is expected to fail somewhere (with a particular probability). In such cases, the computed b-value should be greater than the expected length of failures.

The distribution of the cyclic resistance ratio of sand deposits rests on an empirical relationship that originates from back-analyses of case histories. Hence, for Eemshaven, where sand deposits are critical, the computed b-value should be greater than the expected length of failures. This is different for Delfzijl. Here, laminated deposits are critical. The distribution of the cyclic resistance ratio of laminated deposits rests on laboratory tests, not back-analyses. Hence, at Delfzijl, the computed b-values should be interpretable as the expected lengths of slope failures.

The independent, equivalent length and damage observations
Sasaki and Tamura (2007) present an overview of earthquake damages to embankments in Japan from 1993 onwards (the original reports are in Japanese). Data from their publication has been summarized in Table 5 below.

The average damaged lengths in Table 5 have been calculated by dividing the total damaged lengths by the number of places where damages occurred. The severity of the damages associated with the total damaged lengths is often unclear. This is unfortunate since the length of damage depends on the (definition of the) damage state (see also Kwak et al. 2016). The average length of total collapse caused by liquefaction of the foundation in the Niigata-ken earthquake, which seems to be closest to the failure mechanism considered here, is 957 m. This clearly shows that liquefaction can lead to significant damage over considerable distances. Without accounting for the type/severity of damage, the average damaged lengths range from 317m to 1,732m.

Table 5. Overview of damages reported by Sasaki and Tamura (2007). Figures and quotes from Table 1 and Figure 2 in Sasaki and Tamura (2007).

Year	Earthquake	Severity of damage	Total damaged length (m)	No. of damaged stretches	Average damage length (m)
1993	Kushiro-oki (M=7.8)	Not clearly described ("liquefaction inside embankments, 3-d response of dike"); Kushiro river	10,100	28	361
		Not clearly described ("liquefaction inside embankments, 3-d response of dike"); Tokachi river	9,200	20	460
1993	Hokkaido Nansei-oki (M=7.8)	Not clearly described ("crest cave-in along diagonal slip plane")	6,600	18	367
1995	Hyogo-ken Nanbu (M=7.2)	Not clearly described ("separation into blocks, submerged into liquefied subsoil layer")	5,700	18	317
2000	Tottori-ken Seibu (M=7.3)	Not clearly described ("Bend of dike bottom, transverse cracks at a curvilinear part"	20,700	32	647
2003	Miyagi-ken Hokubu (M=6.4)	Not clearly described ("flow-like deformation")	Not available	66	Not available
2003	Tokachi-oki (M=8.0)	Not clearly described ("elongation of sluice gate length")	16,000	26	615
2004	Niigata-ken Chuetsu (M=6.8)	"Longitudinal cracks (shallower than H.W.L.)" 	6,997	8	875
		"Longitudinal cracks (deeper than H.W.L.)" 	449	1	449
		"Transverse cracks (shallower than H.W.L.)" 	-	-	-
		"Transverse cracks (deeper than H.W.L.)" 	-	-	-
		"Slide of slope (failure of crest)" 	8,659	5	1,732
		"Total collapse of crest, no original shape remaining (liquefaction of foundation)" 	2,871	3	957

More details on the damages caused by the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake can be found in Matsuo (1996). According to Matsuo (1996), the Torishima dike along the Yodo-gawa was strongly impacted by the earthquake. A continuous crest settlements of 2-3 meters was observed over a distance of about 1.4 kilometers see Figure 26. This amount of crest settlement is broadly in line with the definition of the limit state considered here.

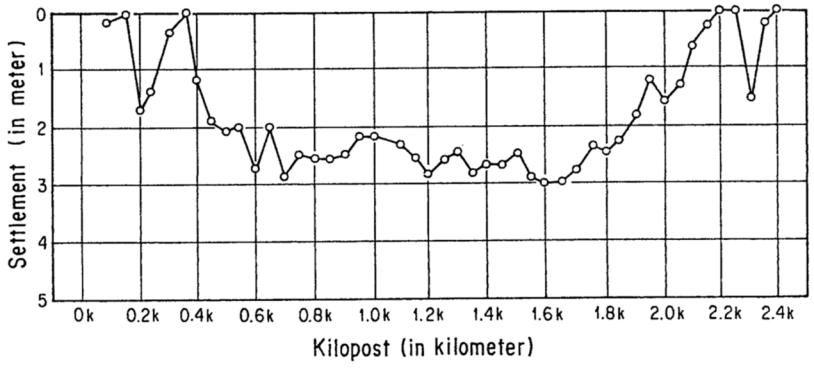


Fig. 1. Settlement of the Torishima Dike

Figure 26. Damages caused by the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake and a profile of observed crest settlement of the Torishima dike along the Yodo-gawa (from: Matsuo 1996).

The Japanese damage records indicate that liquefaction can lead to significant damage or collapse over lengths of a kilometer or more. It also appears that damages, irrespective of their severity, can easily extend over hundreds of meters. All average damage lengths in Table 5 far exceed 50m.

Damage observations and empirical autocorrelation functions

Observed damage lengths are influenced by the difference between capacity and demand: when design loads are strongly exceeded, damaged lengths are likely to much higher than when design loads are barely or not at all exceeded. To correct for this effect, back-analyses of the spatial pattern of damage states were performed by Kwak et al. (2016) *conditional on the seismic demands that led to these damages*. Two different fragility curves were used in these back-analyses, conditional on ground water level. Empirical autocorrelations functions of capacity were derived from the damages observed in the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake and the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquakes.

The squared exponential autocorrelation functions for capacity and demand from Kwak et al. (forthcoming) are considered here. Using the distribution of capacity and the distribution of demand *conditional on the M6.6 event*, α_C^2 is around 0.75. Results of sensitivity analyses with these autocorrelation functions are shown in Table 6.

Table 6. The calculated b-values for a M=6.4 earthquake using the empirical autocorrelation function developed by Kwak et al. (2016).

Case no.	β_{cross}	Capacity			Demand			b (m)
		α^2	ρ_0	k (m)	α^2	ρ_0	k (m)	
1	3	0,75	0	2765	0,25	0	8000	1869
2	4	0,75	0	2765	0,25	0	8000	1402

The results shown in Table 6 are in reasonable agreement with the damage reports from Table 4: the b-values are broadly in line with the average length of severe damage/collapse.

The empirical autocorrelation function of capacity developed by Kwak et al. (2016) is a property of the capacity the levee system for which it has been derived. The autocorrelation function of demand could be different from earthquake to earthquake. Using the (modified) autocorrelation function for capacity by Kwak et al. (2016), the b-values have been recalculated for several cases from Table 4. Results are shown in Table 7.

Table 7. Sensitivity analysis using an empirical autocorrelation function developed by Kwak et al. (2016).

Case no.	β_{cross}	Capacity			Demand			b (m)
		α^2	ρ_0	k (m)	α^2	ρ_0	k (m)	
1	4	0,08	0	2765	0,92	0	5000	1780
2	4	0,1	0	2765	0,9	0	5000	1780
3	4	0,02	0	2765	0,98	0	5000	1990

The b-values from Table 7 are significantly greater than the ones from Table 4. This could be because the results shown in Table 4 are conservative. It could also be, however, that the variations in the reliability of the Japanese levee systems were underestimated in the back analyses with the use of only two different fragility curves. The empirical autocorrelation function then describes the combined effect of:

1. changes in the reliability of cross-sections along the entire length of levee due (not fully accounted for by the two fragility curves) and
2. variations in material properties within homogenous lengths.

If so, the empirical autocorrelation function should be used in combination with a relatively high a-value in equation (20), i.e. a>0.033. After all, if the two fragility curves underestimate the variations in cross-sectional reliabilities, there could still be important variations within the "critical length" (= a · L). Note that a=0.033 in combination with the b-values from Table 4 (about 200-400m) leads to broadly similar cross-sectional reliability requirements to a=0.3 with the b-values from Table 7. Taking the empirical autocorrelation by Kwak et al. (forthcoming) in combination with a=0.033 would lead to target failure probabilities that are about a factor 10 greater. This would translate into a significant reduction of return periods (amongst other). Given that this research is relatively recent and has not been previously applied in projects, such a reduction in demand is not considered prudent for an assessment of a critical infrastructure like the Eemshaven-Delfzijl sea dike.

Discussion

While it is difficult to base a decision on a particular b-value purely on Japanese damage records, these records do suggest that embankment failures can extend over hundreds of meters. It also seems that b=200-350m is more realistic than b=50m.

It is important to note that the earthquakes covered by Sasaki and Tamura (2007), Matsuo (1996) and Kwak et al. (2016) had considerably greater magnitudes (M>6) than the maximum magnitude of around 5 expected in Groningen (NAM 2016). Also, soil conditions and levee designs differ in Groningen and Japan. This means that damage observations from Japan may not be entirely representative for Groningen. This is also why damage observations have been used to put the results of the "bottom-up" sensitivity analyses (Table 4) into perspective rather than the other way round.

7.4.4 Proposed b-value

Based on the results of the sensitivity analyses in Table 4 and the discussion above, a b-value of 200-350 m seems justified. The use of the lowest value from this range is proposed, i.e. b=200m. Should this still turn out to be too optimistic, the assumed 3 month repair time seems too pessimistic. This is because this month repair rests on the premise that earthquake damages may occur over several kilometers (Figure 24).

> Schade zal wellicht optreden over enkele km's. Noodreparatie kan ook bestaan uit alleen herstellen bekleding buitentalud. Groot deel dijk heeft kleikern aan buitenzijde. Een hersteltijd van 1 jaar wordt als lang beoordeeld: noodreparatie moet sneller kunnen. Een hersteltijd van 3 maanden is aannemelijker. (page 7)

Figure 27. Quotes from the minutes of the meeting of December 2015 on the length effect (in Dutch).

A repair time shorter than 3 months leads to a smaller probability of flooding in case of significant earthquake damage (i.e. $P_{F|D}$<1/10). Taken together, b=200m and $P_{F|D}$=1/10 seem to be a prudent basis for cross-sectional seismic stability assessments of the Eemshaven-Delfzijl sea dikes.

7.5 Updated cross-sectional target reliabilities

The following parameter values are proposed to characterize the length effect:

1. a = 0.033 (same as before)
2. b = 200m (before: 50m)

The impact of increasing the b-value from 50 to 200m leads to changes in the cross-sectional target reliabilities for segments 6-6 and 6-7, as shown in Table 8.

Table 8. Updated cross-sectional target reliabilities for assessing seismic stability.

Segment	Standard of protection (per year)	Cross-sectional target reliability for a=0.033 and b=50m (original, see Table 3)		Cross-sectional target reliability for a=0.033 and b=200m (proposed)	
		P_T	β_T	P_T	**β_T**
6_6 (includes Eemshaven)	1/1,000	7.64-05	3.79	2.79E-04	**3.45**
6_7 (includes Delfzijl)	1/3,000	3.02-05	4.01	1.09E-04	**3.70**

The changes in cross-sectional target reliabilities lead to a reduction of the return periods of the design values of the spectral accelerations at NSUB by about a factor 3, see also chapter 8. The changes also affect the design values of the other stochastic variables, albeit to a lesser extent. This is because their influence coefficients are relatively small.

8 Action item 5: Synthesis

8.1 From calculated FORM-influence coefficients and target reliabilities to design values

Design values have been derived on the basis of:

1. the influence coefficients obtained from FORM-analyses with the FE-model and
2. the target reliabilities from Table 8 in section 7.5, i.e. $\beta_T = 3.45$ (segment 6-6, Eemshaven) and $\beta_T = 3.70$ (segment 6-7, Delfzijl).

Table 9 and Table 10 show the cumulative probabilities of the design values that seem reasonable on the basis of the calculated FORM-influence coefficients and target reliabilities. As discussed in chapter 2, a design value can be split into a representative value and a partial factor (last two columns).

The design values in Table 9 and Table 10 all rest on influence coefficients that are greater than those obtained from FORM-analyses. The sum of squared influence coefficients on which the design values are based is an indicator of the amount of conservatism in the semi-probabilistic rule. For Eemshaven and Delfzijl, these sums are about 1.1. Recommended design values, based on Table 9 and Table 10, are shown in Table 11.

Table 9. From calculated influence coefficients and target reliability to design values. Results for the Eemshaven base case (segment 6-6).

Stochastic variable	Calculated		Possible basis for assessment					
	α^2	α	α^2	α	β_T	Cumulative probability	Representative value, quantile	Partial factor
Spectral acceleration at model base	0.732	-0.856	-	-	-	-	-	-
Spectral acceleration at NSUB	0.725	-0.851	0.81	-0.9	3.45	9.991E-01 per year	1056 year return period	1.0
Uncertainty in site response	0.007	-0.086	0.01	-0.1	3.45	0.635	50%	1.04
CRRM=7.5 in sand deposits	0.160	0.400	0.18	0.42	3.45	0.074	15%	1.09
Uncertainty related to residual strength*	0.040	0.200	0.04	0.21	3.45	0.234	50%	1.39
Model Uncertainty	0.068	0.261	0.08	0.28	3.45	0.167	50%	1.70
Total	1	-	1.12	-	-	-	-	-

** For residual strengths according to Kramer and Wang (2015).*

Table 10. From calculated influence coefficients and target reliability to design values. Results for the Delfzijl base case (segment 6-7).

Stochastic variable	Calculated		Possible basis for assessment					
	α^2	α	α^2	α	β_T	Cumulative probability	Representative value, quantile	Partial factor
Spectral acceleration at model base	0.786	-0.887	-	-	-	-	-	-
Spectral acceleration at NSUB	0.778	-0.882	0.81	-0.9	3.70	9.996E-01 per year	2290 year return period	-

Uncertainty in site response	0.008	-0.089	0.01	-0.1	3.70	0.644	50%	1.04
$CRR_{M=5.0}$ of laminated deposit	0.046	0.214	0.09	0.3	3.70	0.133	15%	1.01
Uncertainty related to residual strength*	0.018	0.134	0.03	0.16	3.70	0.277	50%	1.31
Model Uncertainty	0.150	0.387	0.17	0.41	3.70	0.070	50%	2.30
Total	1	-	1.10	-	-	-	-	-

** For residual strengths according to Kramer and Wang (2015).*

Recommended design values

The following design values are recommended for use with the Guideline for conducting dynamic effective stress analyses (Fugro 2016b).

Table 11. Recommended design values.

Stochastic variable	Representative value	Partial factor segment 6-6	Partial factor segment 6-7
Spectral acceleration at NSUB	Segment 6-6: 1100 year return period Segment 6-7: 2300 year return period	1.0	1.0
Uncertainty in site response	Median, i.e. time history amplitudes at model base, calculated on the basis of median properties ("best estimate")	1.05	1.05
CRR in sand deposits	16% quantile value of the $CRR_{M=7.5}$ from the probabilistic Boulanger & Idriss (2014) relationship for the median of local q_{c1Ncs}-values Put differently: the $CRR_{M=7.5}$ according to the "deterministic" relationship proposed by Boulanger & Idriss (2014) for the median of local q_{c1Ncs}-values.	1.10*	1.10
CRR in laminated deposits	16% quantile of the distribution of the spatial average at four cycles (regional data set)	1.0	1.0
Uncertainty related to residual strength in sand deposits **	Median, i.e. $(\varepsilon_{lnSu/p'})_{rep} = 1$	1.4 on $(S_{u/p'})_{rep}$, see equation (26)	1.4 on $(S_{u/p'})_{rep}$, see equation (26)
Uncertainty related to residual strength in laminated deposits **	Median, i.e. $(\varepsilon_{lnSu/p'})_{rep} = 1$	1.3 on $(S_{u/p'})_{rep}$, see equation (26)	1.3 on $(S_{u/p'})_{rep}$, see equation (26)
Model Uncertainty	Median, i.e. the computed crest settlement from an unbiased model	1.7	2.3

* *This is broadly equivalent to the use of a 25% quantile of qc1Ncs together with the deterministic Boulanger & Idriss (2014) relationship between qc1Ncs and CRR, which is more conservative than the 33% quantile proposed by Boulanger & Montgomery (2016) for cases like these where the dimensions of relevant deformations far exceed the sale of fluctuation.*

** *For residual strengths according to Kramer and Wang (2015).*

The design value of residual strength can be calculated using:

$$\left(\frac{Su}{p'}\right)_d = \frac{exp\left(-8.444 + 0.109\,(N_1)_{60} + 5.379\,p'^{0.1}\right)}{\gamma_{res}\,p'} \quad (26)$$

with γ_{res}=1.4 (sand deposit) or γ_{res}=1.3 (laminated deposit) and $(N_1)_{60}$ according to Idriss & Boulanger (2008):

$$(N_1)_{60} = 46 \cdot (0.478\,q_{c1N}^{0.264} - 1.063)^2 \quad (27)$$

where:

$(Su/p')_d$ Design value of normalized residual strength (-)
p' Initial effective vertical stress (atm)
$(N_1)_{60}$ Normalized SPT blow count (-), median value
q_{c1N} Normalized cone tip resistance (-)

8.2 Uncertainty related to motions

The following procedure is recommended for dealing with the uncertainty related to motions (see also Appendix H):

1. Select 11 independent motions with appropriate seismological characteristics (e.g. amplitude, frequency content and duration).
2. Compute crest settlements for each motion using the design values from Table 11.
3. Analyze the results: outliers should be understood.
4. The (subjective) probability that the crest settlement for a randomly selected motion exceeds the limit state should be less than 25%. If, for instance, all 11 motions are considered to be equally likely, the limit state should not be exceeded for more than 2 motions.

Note that it might be incorrect to treat the 11 motions as equally likely or to assume that the 11 selected motions span the entire set of possible motions. In some cases, it might be reasonable to assign low subjective probabilities to particular motions or to treat the 11 motions as members of a subset of relatively pessimistic motions.

8.3 Uncertainty related to stratigraphy

The uncertainty related to stratigraphy can be dealt with as follows:

1. consider a conservative, realistic stratigraphy,
2. carry out sensitivity analyses,
3. make an informed judgment.

A more rigorous procedure for dealing with uncertainty related to stratigraphy is given by ENW (2012). It is summarized in Appendix H (for motions, not stratigraphies). This procedure is laborious, however, since it involves a large number of evaluations of the limit state function.

8.4 Sea level (load combination)

The combination of a severe earthquake and an extremely high or low sea level is unlikely because water levels and earthquakes are uncorrelated and because both types of events have relatively short durations. Note that a higher water level on the sea side need not be conservative. It is recommended to use as a design sea level, whichever of the following is the most conservative:

1. the water level that is expected to be exceeded once a year (1 year return period) or
2. the low tide.

References

Van Balen, W. et al., 2016. *Hydra-Ring 2.0, Probabilistics toolbox for the WTI2017, Technical Reference Manual*, Deltares, report no. 1230088-DSC-0072.

Bazzurro & Cornell, 2004. Nonlinear Soil-Site Effects in Probabilistic Seismic-Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6), pp.2110–2123.

Bommer, J.J. et al., 2015. *Development of Version 2 GMPEs for Response Spectral Accelerations and Significant Durations from Induced Earthquakes in the Groningen Field* November 2. J. Van Elk & D. Doornhof, eds., NAM.

Boulanger, R.W. & Idriss, I.M., 2014. *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*, Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering, College of Engineering, University of California at Davis.

Boulanger, R.W. & Montgomery, J., 2016. Nonlinear deformation analyses of an embankment dam on a spatially variable liquefiable deposit. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 91, pp.222–233. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026772611630104X.

Boulanger, R.W. & Montgomery, J., 2015. Nonlinear Deformation Analyses of an Embankment Dam on a Spatially Variable Liquefiable Deposit. In *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Christchurch, New Zealand.

Calle, E.O.F., 2007. Statistiek bij Regionale Proevenverzamelingen deel 1. *Geotechniek*, July.

Calle, E.O.F., 2008. Statistiek bij Regionale Proevenverzamelingen deel 2. *Geotechniek*, Januari.

Calle, E.O.F. & Barends, F.B.J., 1990. *PROSTAB een computerprogramma voor probabilistische analyse van stabiliteit van taluds*, Grondmechanica Delft, CO-266484/32.

Deltares, 2017. *LPI screening for the Eemshaven-Delfzijl levee*, Deltares report no. 1220173-024-GEO-0067, version 3.

ENW, 2012. *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken*, Expertisenetwerk Waterveiligheid.

Expert Panel, 2016. *Expert Panel Report*, 2 December 2016. Letter addressed to E. van Dijk by Chacko, J. Green, R.A. Kramer, S.L. Towhata, I.

Fugro, 2016a. *Evaluation of dynamic stability Eemshaven-Delfzijl levee, The Netherlands*, Fugro, 2 December 2016, contract no. 1016-0459-000.

Fugro, 2016b. *Guidelines for dynamic effective stress finite element analyses Eemshaven-Delfzijl levee Groningen, the Netherlands*, Fugro, 10 August 2016, 1st issue, Contract No. 1016-0459-000.

Fugro, 2016c. *Interpretive report, Delfzijl / Eemshaven Levee Project in Groningen, the Netherlands, prepared for Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.* November.,

Green, R. et al., 2016. *Unbiased Cyclic Resistance Ratio Relationships for Evaluating Liquefaction Potential in Groningen*,

Idriss, I.M. & Boulanger, R.W., 2008. *Soil liquefaction during earthquakes*, EERI monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute.

Itasca, 2011. *Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC2D)*, Version 6.0.

Jongejan, R.B., 2012. *Het lengte-effect in een statistisch homogeen vak*, Memorandum, 11 February 2012, Jongejan RMC.

Jongejan, R.B. & Maaskant, B., 2015. Quantifying Flood Risks in the Netherlands. *Risk Analysis*, 35(2), pp.252–264. Available at: http://doi.wiley.com/10.1111/risa.12285.

Kramer, S.L. & Wang, C.-H., 2015. Empirical Model for Estimation of the Residual Strength of Liquefied Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(9), p.4015038. Available at: http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0001317.

Kwak, D.Y. et al., Methods for Probabilistic Seismic Levee System Reliability Analysis. In *Georisk 2017*.

Kwak, D.Y. et al., 2016. Seismic Levee System Fragility Considering Spatial Correlation of Demands and Component Fragilities. *Earthquake Spectra*, 32(4), pp.2207–2228. Available at: http://earthquakespectra.org/doi/10.1193/083115EQS132M.

Matsuo, O., 1996. Damage to river dikes. *Soils and Foundations*, (Special issue, January 1996), pp.235–240.

Montgomery, J., 2015. *Issues in nonlinear deformation analysis of embankment dams affected by liquefaction*. University of California, Davis.

NAM, 2016. Toelichting resultaten Mmax-workshop.

Robertson, P.K., 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), pp.151–58.

Sasaki, Y. & Tamura, K., 2007. Failure mode of embankments due to recent earthquakes in Japan. In *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 25028, 2007*. Thessaloniki, Greece: Paper No.1479.

Stewart, J., Afshari, K. & Hashash, Y.M., 2014. *Guidelines for Performing Hazard-Consistent One-Dimensional Ground Response Analysis for Ground Motion*, Pacific Earthquake Engineering Research Center.

TAW, 1989. *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken deel 2 benedenrivierengebied*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

TAW, 2001. *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies; Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

USACE, 2013. *Engineering and design of I-Walls*, Washington, DC.

Vanmarcke, E., 2011. Risk of Limit-Equilibrium Failure of Long Earth Slopes: How It Depends on Length. In *Georisk 2011*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 1–24.

VanMarcke, E.., 1977. Reliability of Earth Slopes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(11), pp.1247–1265.

Vrouwenvelder, T., 2006. Spatial effects in reliability analysis of flood protection systems. In *Second IFED Forum*. Lake Louise, Canada.

Vrouwenvelder, T. & Calle, E., 2003. Measuring Spatial Correlation of Soil Properties. *Heron*, 48(4).

Appendix A First Order Reliability Method (FORM)

FORM is an efficient, approximate technique for computing probabilities of failure. In this appendix, a brief overview is given of the steps in a FORM analysis, together with an example.

FORM step by step
FORM is an iterative procedures that requires only few evaluations of a limit state function compared to e.g. Monte Carlo simulation. FORM calculation involves the following steps:

Step 1: Select start values
Select values for the stochastic variables for the evaluation of the limit state function (Z). Note: Z<0 implies failure, Z>0 implies the opposite.

Step 2: Calculate partial derivatives
Calculate the partial derivatives of the limit state function with respect to the different stochastic variables. This can be done by perturbing input values or by looking at the results of sensitivity analyses that have already been carried out.

Step 3: Transform all non-normally distributed variables to normally distributed variables.
This can be done on the basis of the following equations:

$$\sigma_{Xnorm,i} = \varphi\{ \Phi^{-1}(F_{X,i}(X_{i,0})) \} / f_{X,i}(X_{i,0}) \quad (28)$$

$$\mu_{Xnorm,i} = X_{i,0} - \Phi^{-1}(F_{X,i}(X_{i,0})) \cdot \sigma_{Xnorm,i} \quad (29)$$

Where:
$\sigma_{Xnorm,i}$ Standard deviation
$\mu_{Xnorm,i}$ Expected value
$\varphi(\cdot)$ Standard normal probability density function
$\Phi(\cdot)$ Standard normal distribution function
$F_{X,i}(X_{i,0})$ Cumulative distribution function of variable X_i, evaluated at $X_{i,0}$
$f_{X,i}(X_{i,0})$ Probability density function of variable X_i, evaluated at $X_{i,0}$

To check the end-result, the cumulative probabilities of $F_{X,i}(X_{i,0})$ and $\Phi(\sigma_{Xnorm,i}/\mu_{Xnorm,i})$ could be compared. These should be identical. The same should hold true for the probability densities.

Step 4: Calculate the standard deviation and expected value of the (normalized) limit state function
The standard deviation follows from:

$$\sigma_Z = (\Sigma (\partial Z/\partial X_i \cdot \sigma_{Xnorm,i})^2)^{1/2} \quad (30)$$

Where:
$\partial Z/\partial X_i$ Partial derivative of the limit state function with respect to stochastic variable X_i, evaluated at $X_{i,0}$.

The expected value follows from:

$$\mu_Z = Z(\underline{X_0}) + \Sigma\{\partial Z/\partial X_i \cdot (\mu_{Xnorm,i} - X_{i,0})\} \quad (31)$$

Where:
$\underline{X_0}$ Vector of the start values of all stochastic variables

Step 6: Calculate influence coefficients and reliability index
The influence coefficients follow from the product of the partial derivatives and the standard deviations from step 3.

$$\alpha_{Xi} = (\partial Z/\partial X_i \cdot \sigma_{Xnorm,i}) / \sigma_Z \quad (32)$$

The reliability index follows from:

$$\beta = \sigma_Z / \mu_Z \quad (33)$$

Step 6: Repeat steps 2-5, starting from the expected design point
The previous steps should be repeated until convergences is obtained. This can be done through successive substitution, i.e. by using the quantile values corresponding to the computed β and α-values as the start values for the next FORM iteration. The resulting reliability index is related to the probability of failure as follows:

$$P(F) = \Phi(-\beta) \quad (34)$$

The accuracy of a FORM computation can be checked by e.g. a Monte Carlo simulation. For a linear limit state function with independent, normally distributed variables, FORM yields the exact same result as MC or numerical integration.

Example
The following code could be run in e.g. Matlab or Octave. It concerns a simple, hypothetical limit state function with two lognormally distributed variables: demand and capacity. Note: the lognormally distributed variables are given here by the normal distributions of their natural logarithms. This is why normalization does not play a role here.

```
function [ Z ] = Z(x1,x2)

Z = exp(x2) - exp(x1);

endfunction
```

```
function [ ] = FORM(n)
% n = Number of FORM iterations, e.g. n=50 (increase until convergence is reached)

fun = "Z";      % here: Z = C - D

%% Distributions of stochastic variables
median_D    = 50;           % D = Demand
mu_lnD      = log(median_D);
sd_lnD      = 0.4;

median_C    = 200;        %C = Capacity
mu_lnC      = log(median_C);
sd_lnC      = 0.40;

%% Rename
mu1         = mu_lnD;
sd1         = sd_lnD;
mu2         = mu_lnC;
sd2         = sd_lnC;

%% Select start values for FORM iterations
x1(1)  = mu1;
x2(1)  = mu2;
```

```
%% Select parameter values for FORM iterations
r  = 0.8;            % relaxation factor: this factor helps to arrive at the design point in a more gentle manner
dx = 0.001;          % perturbation for computing partial derivatives

%% FORM iterations
for i = 2:n;
    dZ_dx1(i)     = ( feval( "Z", x1(i-1)+dx , x2(i-1) ) - feval( "Z", x1(i-1) , x2(i-1)) ) / dx;
    dZ_dx2(i)     = ( feval( "Z", x1(i-1) , x2(i-1)+dx ) - feval( "Z", x1(i-1) , x2(i-1)) ) / dx;

    mu_Z(i)  = feval(fun,x1(i-1),x2(i-1)) + ( dZ_dx1(i)*(mu1-x1(i-1)) + dZ_dx2(i)*(mu2-x2(i-1)) );

    sd_Z(i)   = sqrt( (dZ_dx1(i) * sd1)^2 + (dZ_dx2(i) * sd2)^2 );

    Beta(i)   = mu_Z(i)/sd_Z(i);

    a1(i)     = - dZ_dx1(i) * sd1 / sd_Z(i);
    a2(i)     = - dZ_dx2(i) * sd2 / sd_Z(i);

    x1d(i)    = mu1 + a1(i)*Beta(i)*sd1;
    x2d(i)    = mu2 + a2(i)*Beta(i)*sd2;

    x1(i)     = r*x1(i-1)+(1-r)*x1d(i);
    x2(i)     = r*x2(i-1)+(1-r)*x2d(i);
endfor

Beta   = Beta(n)
Pf     = normcdf(-Beta)

alpha_D = a1(n)
alpha_C = a2(n)


%% Check FORM results
% The limit state function should be equal to zero in the design point:
Z = feval( "Z", x1(n),x2(n))

% The probability of failure can also be computed using Monte Carlo simulation:
Pf_MC   = sum( exp(normrnd(mu1,sd1,1e7,1)) > exp(normrnd(mu2,sd2,1e7,1)) ) /1e7
```

In this case, FORM gives a failure probability of 0.0071. Monte Carlo gives practically the same result. The number of evaluations of the limit state function is several orders of magnitude smaller when using FORM, however.

For normalizing a Weibull distributed variable:

```
pdf_x = wblpdf( x, scale , shape );
cdf_x = wblcdf( x, scale , shape );

sd = normpdf( norminv( cdf_x ) ) / pdf_x;
mu = x - norminv( cdf_x ) * sd;
```

Indices have to be added to the x-values when this piece of code is placed within the FORM-loop shown above.

Appendix B Design point values

An overview of the **cumulative probabilities** of the design point values of capacity variables (α>0) is given below, together with the *exceedance probabilities* of demand variables (α<0), for a range of reliability indices.

α	**Reliability index β**								
	3	**3,2**	**3,4**	**3,6**	**3,8**	**4**	**4,2**	**4,4**	**4,6**
1,00	**1,35E-03**	**6,87E-04**	**3,37E-04**	**1,59E-04**	**7,23E-05**	**3,17E-05**	**1,33E-05**	**5,41E-06**	**2,11E-06**
0,95	**2,19E-03**	**1,18E-03**	**6,19E-04**	**3,13E-04**	**1,53E-04**	**7,23E-05**	**3,30E-05**	**1,46E-05**	**6,21E-06**
0,90	**3,47E-03**	**1,99E-03**	**1,11E-03**	**5,98E-04**	**3,13E-04**	**1,59E-04**	**7,84E-05**	**3,75E-05**	**1,74E-05**
0,85	**5,39E-03**	**3,26E-03**	**1,93E-03**	**1,11E-03**	**6,19E-04**	**3,37E-04**	**1,78E-04**	**9,20E-05**	**4,61E-05**
0,80	**8,20E-03**	**5,23E-03**	**3,26E-03**	**1,99E-03**	**1,18E-03**	**6,87E-04**	**3,90E-04**	**2,16E-04**	**1,17E-04**
0,75	**1,22E-02**	**8,20E-03**	**5,39E-03**	**3,47E-03**	**2,19E-03**	**1,35E-03**	**8,16E-04**	**4,83E-04**	**2,80E-04**
0,70	**1,79E-02**	**1,25E-02**	**8,66E-03**	**5,87E-03**	**3,91E-03**	**2,56E-03**	**1,64E-03**	**1,04E-03**	**6,41E-04**
0,65	**2,56E-02**	**1,88E-02**	**1,36E-02**	**9,64E-03**	**6,76E-03**	**4,66E-03**	**3,17E-03**	**2,12E-03**	**1,39E-03**
0,60	**3,59E-02**	**2,74E-02**	**2,07E-02**	**1,54E-02**	**1,13E-02**	**8,20E-03**	**5,87E-03**	**4,15E-03**	**2,89E-03**
0,55	**4,95E-02**	**3,92E-02**	**3,07E-02**	**2,39E-02**	**1,83E-02**	**1,39E-02**	**1,04E-02**	**7,76E-03**	**5,70E-03**
0,50	**6,68E-02**	**5,48E-02**	**4,46E-02**	**3,59E-02**	**2,87E-02**	**2,28E-02**	**1,79E-02**	**1,39E-02**	**1,07E-02**
0,45	**8,85E-02**	**7,49E-02**	**6,30E-02**	**5,26E-02**	**4,36E-02**	**3,59E-02**	**2,94E-02**	**2,39E-02**	**1,92E-02**
0,40	**1,15E-01**	**1,00E-01**	**8,69E-02**	**7,49E-02**	**6,43E-02**	**5,48E-02**	**4,65E-02**	**3,92E-02**	**3,29E-02**
0,35	**1,47E-01**	**1,31E-01**	**1,17E-01**	**1,04E-01**	**9,18E-02**	**8,08E-02**	**7,08E-02**	**6,18E-02**	**5,37E-02**
0,30	**1,84E-01**	**1,69E-01**	**1,54E-01**	**1,40E-01**	**1,27E-01**	**1,15E-01**	**1,04E-01**	**9,34E-02**	**8,38E-02**
0,25	**2,27E-01**	**2,12E-01**	**1,98E-01**	**1,84E-01**	**1,71E-01**	**1,59E-01**	**1,47E-01**	**1,36E-01**	**1,25E-01**
0,20	**2,74E-01**	**2,61E-01**	**2,48E-01**	**2,36E-01**	**2,24E-01**	**2,12E-01**	**2,00E-01**	**1,89E-01**	**1,79E-01**
0,15	**3,26E-01**	**3,16E-01**	**3,05E-01**	**2,95E-01**	**2,84E-01**	**2,74E-01**	**2,64E-01**	**2,55E-01**	**2,45E-01**
0,10	**3,82E-01**	**3,74E-01**	**3,67E-01**	**3,59E-01**	**3,52E-01**	**3,45E-01**	**3,37E-01**	**3,30E-01**	**3,23E-01**
0,05	**4,40E-01**	**4,36E-01**	**4,33E-01**	**4,29E-01**	**4,25E-01**	**4,21E-01**	**4,17E-01**	**4,13E-01**	**4,09E-01**
0,00	**5,00E-01**	**5,00E-01**	**5,00E-01**	**5,00E-01**	**5,00E-01**	**5,00E-01**	**5,00E-01**	**5,00E-01**	**5,00E-01**
-0,05	*4,40E-01*	*4,36E-01*	*4,33E-01*	*4,29E-01*	*4,25E-01*	*4,21E-01*	*4,17E-01*	*4,13E-01*	*4,09E-01*
-0,10	*3,82E-01*	*3,74E-01*	*3,67E-01*	*3,59E-01*	*3,52E-01*	*3,45E-01*	*3,37E-01*	*3,30E-01*	*3,23E-01*
-0,15	*3,26E-01*	*3,16E-01*	*3,05E-01*	*2,95E-01*	*2,84E-01*	*2,74E-01*	*2,64E-01*	*2,55E-01*	*2,45E-01*
-0,20	*2,74E-01*	*2,61E-01*	*2,48E-01*	*2,36E-01*	*2,24E-01*	*2,12E-01*	*2,00E-01*	*1,89E-01*	*1,79E-01*
-0,25	*2,27E-01*	*2,12E-01*	*1,98E-01*	*1,84E-01*	*1,71E-01*	*1,59E-01*	*1,47E-01*	*1,36E-01*	*1,25E-01*
-0,30	*1,84E-01*	*1,69E-01*	*1,54E-01*	*1,40E-01*	*1,27E-01*	*1,15E-01*	*1,04E-01*	*9,34E-02*	*8,38E-02*
-0,35	*1,47E-01*	*1,31E-01*	*1,17E-01*	*1,04E-01*	*9,18E-02*	*8,08E-02*	*7,08E-02*	*6,18E-02*	*5,37E-02*
-0,40	*1,15E-01*	*1,00E-01*	*8,69E-02*	*7,49E-02*	*6,43E-02*	*5,48E-02*	*4,65E-02*	*3,92E-02*	*3,29E-02*
-0,45	*8,85E-02*	*7,49E-02*	*6,30E-02*	*5,26E-02*	*4,36E-02*	*3,59E-02*	*2,94E-02*	*2,39E-02*	*1,92E-02*
-0,50	*6,68E-02*	*5,48E-02*	*4,46E-02*	*3,59E-02*	*2,87E-02*	*2,28E-02*	*1,79E-02*	*1,39E-02*	*1,07E-02*
-0,55	*4,95E-02*	*3,92E-02*	*3,07E-02*	*2,39E-02*	*1,83E-02*	*1,39E-02*	*1,04E-02*	*7,76E-03*	*5,70E-03*
-0,60	*3,59E-02*	*2,74E-02*	*2,07E-02*	*1,54E-02*	*1,13E-02*	*8,20E-03*	*5,87E-03*	*4,15E-03*	*2,89E-03*
-0,65	*2,56E-02*	*1,88E-02*	*1,36E-02*	*9,64E-03*	*6,76E-03*	*4,66E-03*	*3,17E-03*	*2,12E-03*	*1,39E-03*
-0,70	*1,79E-02*	*1,25E-02*	*8,66E-03*	*5,87E-03*	*3,91E-03*	*2,56E-03*	*1,64E-03*	*1,04E-03*	*6,41E-04*
-0,75	*1,22E-02*	*8,20E-03*	*5,39E-03*	*3,47E-03*	*2,19E-03*	*1,35E-03*	*8,16E-04*	*4,83E-04*	*2,80E-04*
-0,80	*8,20E-03*	*5,23E-03*	*3,26E-03*	*1,99E-03*	*1,18E-03*	*6,87E-04*	*3,90E-04*	*2,16E-04*	*1,17E-04*
-0,85	*5,39E-03*	*3,26E-03*	*1,93E-03*	*1,11E-03*	*6,19E-04*	*3,37E-04*	*1,78E-04*	*9,20E-05*	*4,61E-05*
-0,90	*3,47E-03*	*1,99E-03*	*1,11E-03*	*5,98E-04*	*3,13E-04*	*1,59E-04*	*7,84E-05*	*3,75E-05*	*1,74E-05*
-0,95	*2,19E-03*	*1,18E-03*	*6,19E-04*	*3,13E-04*	*1,53E-04*	*7,23E-05*	*3,30E-05*	*1,46E-05*	*6,21E-06*
-1,00	*1,35E-03*	*6,87E-04*	*3,37E-04*	*1,59E-04*	*7,23E-05*	*3,17E-05*	*1,33E-05*	*5,41E-06*	*2,11E-06*

Appendix C Uncertainty in site response analysis up to the model base

The following memo has been reviewed by J. Bommer and A. Rodriguez Marek.

To: **Julian Bommer and Adrian Rodriguez-Marek**

Copy: **Sjoerd de Wit, Jan Van Elk, Edith Van Dijk; NAM**

From: **Amalia Giannakou, Panagiotis Georgarakos and Jacob Chacko; Fugro**

Subject: Estimation of Amplification Factor from top of Bedrock to Base of 2D Finite Element Models of Eemshaven-Delfzijl Levee, Groningen, The Netherlands

---

Introduction and Background

Gas-extraction-induced earthquakes occur in the Groningen area. Consequently earthquake effects are to be considered in the levee reconstruction program for the Eemshaven-Delfzijl levee. In particular the presence of potentially liquefiable Holocene tidal deposits (i.e. the so-called "wadzand" deposits) underlying parts of the Eemshaven-Delfzijl levee have raised the issue of liquefaction-induced instability. Since the effect of liquefaction on structures and liquefaction-induced deformations cannot easily be assessed using simplified techniques, the dynamic stability of the levee at two locations was evaluated by Fugro using advanced numerical procedures. The 2D dynamic analyses were conducted using nonlinear, fully coupled, effective stress models (Fugro 2016). The 2D FE models extend from the top of levee to El. -30 m NAP at the Eemshaven area and to El. -20m NAP at the Delfzijl area (Figure 1). The results of the analyses were presented at the Liquefaction Expert Panel during the Workshop in Amsterdam (November 17th-18th 2016).

An effort is currently underway to:

- Characterize the uncertainties related to the input and output of the 2D FE dynamic analyses model (i.e. coupled, effective stress FEM)
- Perform FORM analysis using the 2D FE dynamic analyses model; and
- Make an informed decision about design values including length effects that contribute to the design return period.

For Step 1 above it is necessary to specify distributions for the different stochastic variables that affect the problem. The main stochastic variables associated with the seismic demand that is used as input in the 2D FE model include:

- the spectral acceleration at NSUB and
- the Amplification Factor from top of rock (NSUB) to the base of the 2D FE models (currently at El. -30 m and -20 m NAP).

Design spectra provided by KNMI were used to define the seismic demand at the top of NSUB for the design return period. For the estimation of the distribution of spectral acceleration values at top of NSUB, the seismic hazard curve for T=0.85sec at the top of NSUB is used. The seismic hazard curve is approximated with a logarithmic probability density function and this distribution is used in the FORM analyses.

In addition to the spectral acceleration at the top of bedrock (NSUB) the amplification of the ground motion from the top of bedrock to the base of the 2D FE models (i.e. NAP -30 m and -20 m) needs to also be considered. In the V2 Groningen report (Bommer et al 2015), only the Amplification Factor from top of rock to the ground surface is provided (Equations ES.15 and Es.16).

This project memorandum presents a methodology to derive estimates of amplification factor from top of rock (NSUB) to the base of the FE models (NAP -30 m and -20 m) following the procedure of Stewart et al (2014).

Proposed Approach

For the estimation of the amplification factor at the base of the 2D FE models we have followed the approach of Stewart et al (2014) for fitting ground response analysis results to a site amplification function.

1D equivalent linear site response analyses were performed at select locations along the levee to propagate the motion from the top of NSUB to the base of the 2D FE model. The deep shear wave velocity profiles provided by Professor Rodriguez-Marek in an email dated October 4th 2016 were used (Vs_profiles_levee_csv_mod_with corrected u0_20160902_GdL_ARM.xlsx).

Equivalent linear site response analyses were performed for different amplitudes of input motions. Results of the site response analyses were regressed using the following functional form:

$$\ln \overline{Y}(f) = f_1 + f_2 \ln\left(\frac{x_{IMref} + f_3}{f_3}\right)$$

and constraining f_3 to a value of 0.5, the same value used in Bommer et al (2015). Regression of the site response analyses results was performed to estimate f_1 and f_2 factors. For the estimation of f_1 (which represents weak-motion (linear) amplification) site response analyses were performed for an input PGA amplitude of 0.01g. The amplification factor at the base of the FE models was defined as the ratio of the outcrop motion at NAP -20 m (or -30m) to the outcrop motion at the top of NSUB.

Estimation of Amplification Factor from NSUB to Base of 2D FE Model

This section presents example results for the Delfzijl area using the approach described above. Site response analyses were performed at the Delfzijl side of the levee using 7 ground motions with 2 horizontal components matched to the normalized target spectrum at top of NSUB. Ground motions were scaled to PGA values of 0.01g, 0.1g, 0.16g, 0.2g, 0.3g 0.4g, and 0.5g to obtain amplification factors at multiple hazard levels. The estimated V_{s30} value below -20m NAP is 288 m/s. Figure 2 presents regression results of the amplification factor using $f_1 = 0.67$, $f_2 = -0.49$ and $f_3 = 0.5$.

Figure 2 presents the mean amplification factor between top of NSUB and El – 20 m. No site specific geotechnical data are available below NAP -20 m and the deep velocity profiles at the Delfzijl side (i.e. between NAP -20m to top of NSUB) are almost the same. Much of the site to site variability is thus expected to be related to the soils above NAP -20 meters. The minimum value of the standard deviation for site-to-site variability for amplification ratios between NSUB and the ground surface is constrained to 0.2 in Bommer et al (2015). When we compare the variation in amplification ratios between NSUB and the ground surface from 9 different profiles in the Delfzijl area, we estimate a standard deviation of 0.2, which is associated largely with variability above El. -20 meters. Therefore we propose to reduce the standard deviation for site-to-site variability in amplification ratios between top of NSUB and the base of the FE models to 0.1 (in natural log units).

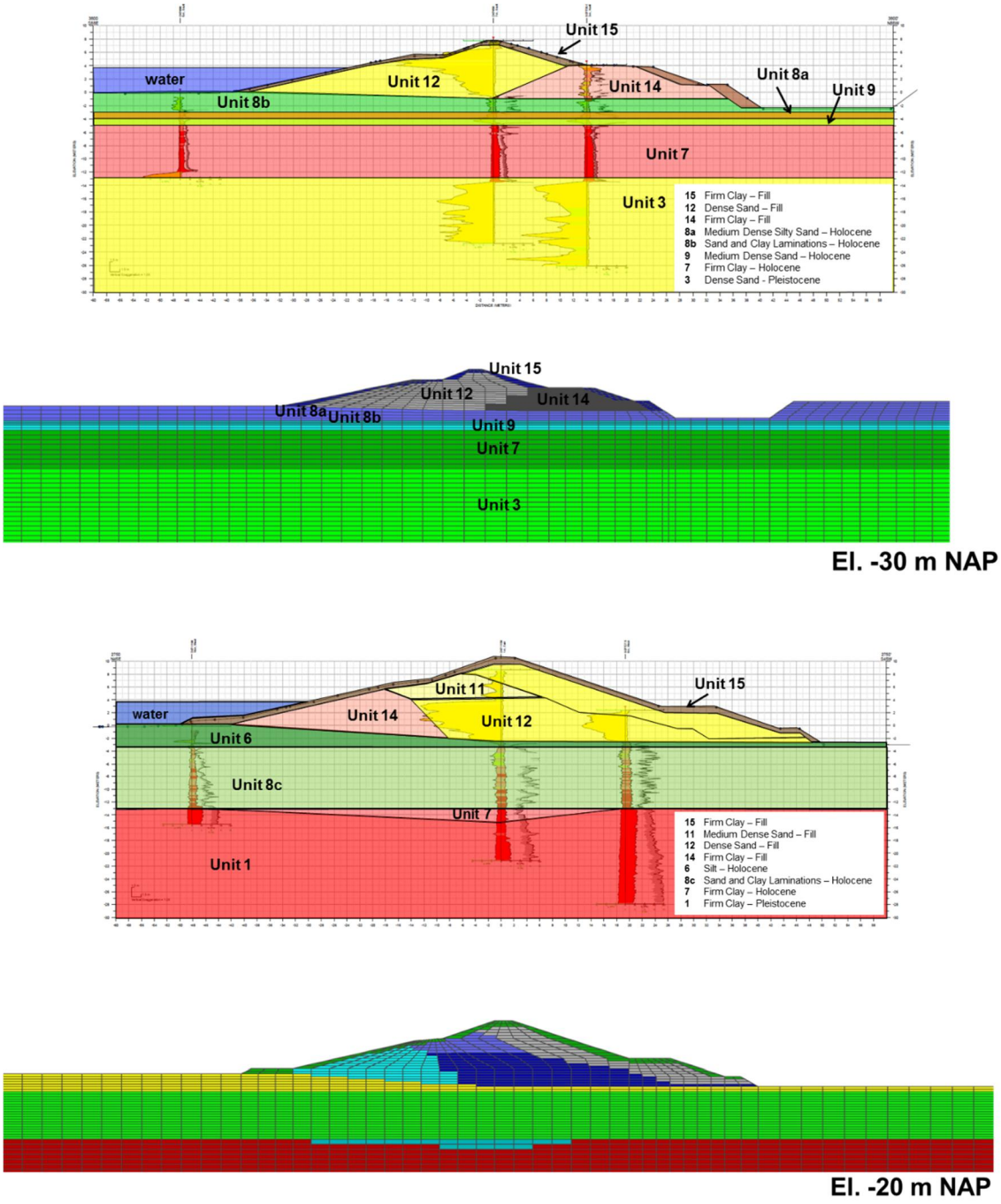


Figure 1. FE models at Eemshaven (upper illustration) and Delfzijl (lower illustration) side of the levee.

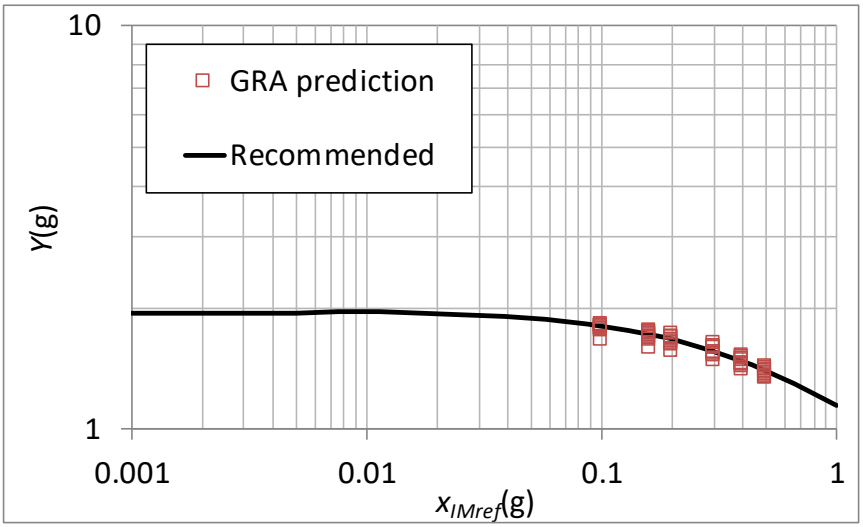


Figure 2. Mean amplification values for Sa (0.85 sec) from GRA and mean fit using equation above with f_3 fixed at 0.5.

The resulting equation for the mean amplification factor from top of NSUB to NAP-20 m is shown below:

$$\ln(AF) = 0.67 - 0.49\ln[(SaNU_B, g + 0.5)/0.5]$$

The proposed standard deviation of the amplification function is 0.1 (ln units).

References

Bommer, J.J., Dost B., Edwards B., Kruiver P.P., Meijers P., Ntinalexis M., Polidoro B., Rodriguez-Marek A. and Stafford P.J. (2015) "Development of Version 2 GMPEs for Response Spectral Accelerations and Significant Durations from Induced Earthquakes in the Groningen Field", Report Groningen Seismic Hazard and Risk Assessment Model.

Fugro (2016) "Evaluation of Dynamic Stability Eemshaven-Delfzijl Levee, the Netherlands", prepared for NAM, December 2016

Stewart J.P and Hashash, Y. M. A. (2014). "Guidelines for Performing Hazard-Consistent One-Dimensional Ground Response Analysis for Ground Motion Prediction," PEER Report 2014/16, October 2014.

Note: The coefficients for Eemshaven are f_1 = 0.37, f_2 = -0.32, f_3 = 0.5 and ϕ = 0.1.

Appendix D Cyclic Resistance of Laminated Deposits

The following memo has been prepared by Fugro on January 31st 2017 and has been revised on February 10th to address comments by Professor S. Kramer

INTRODUCTION AND BACKGROUND

Gas-extraction-induced earthquakes occur in the Groningen area. Consequently earthquake effects are to be considered in the levee reconstruction program for the Eemshaven-Delfzijl levee. In particular the presence of potentially liquefiable Holocene tidal deposits (i.e. the so-called "wadzand" deposits) underlying parts of the Eemshaven-Delfzijl levee have raised the issue of liquefaction-induced instability.

In order to estimate the liquefaction triggering resistance of these deposits empirical procedures based on measured CPT tip resistance were used (i.e. Boulanger and Idriss 2014) as well as a series of advanced cyclic laboratory tests on "undisturbed" samples (Fugro 2016a). As discussed in Fugro (2016b) although liquefaction triggering resistance from CPT measurements in uniform sand deposits compared reasonably well with cyclic laboratory test results on "undisturbed" samples from uniform sands (differences in results were mainly attributed to effects of sample disturbance resulting to loosening of samples tested in the lab), liquefaction triggering resistance from CPT measurements in laminated deposits appear to underestimate the triggering resistance of these deposits when compared to results from cyclic laboratory tests on laminated "undisturbed" samples. This is most likely due to the significant influence of the clay layers on the CPT tip resistance measured within the thin "sandwiched" sand layers whose thickness is less than 10 to 20 cm in thickness.

Laminated deposits are mostly present between km 27.2 to 28.5 (Section L) and around km 29.5 (Section K) at the Delfzijl side as well as around km 36.0 (Section D) at the Eemhaven side.

In order evaluate the cyclic resistance of laminated deposits the following were considered:

1. CDSS and CTX test results on laminated deposits. Five (5) CDSS and seven (7) CTX cyclic tests were performed on laminated "undisturbed" samples obtained with Piston and Begemann samplers (Fugro 2016a). Additionally, three (3) CDSS and seven (7) CTX were performed on laminated "undisturbed" samples (without static bias) obtained with the Gel Push sampler. The results of these additional tests have been interpreted and are plotted together with the interpreted lab results presented in Fugro 2016b.
2. Numerical simulations of cyclic response of laminated samples performed to evaluate the conversion factor between Cyclic Simple Shear and Cyclic Triaxial tests on laminated samples
3. Numerical simulations of the response of laminated samples under cyclic simple shear loading conditions to develop liquefaction triggering curves for samples with different percentages of clay laminations

This project memorandum presents interpreted laboratory test results on laminated samples and results of numerical evaluations of the cyclic behavior of laminated soils and provides recommendations for the cyclic resistance of laminated deposits.

EVALUATION OF LIQUEFACTION TRIGGERING FROM CYCLIC LABORATORY TESTS

A series of stress controlled Cyclic Direct Simple Shear (CDSS) and Cyclic Triaxial (CTX) tests was performed on "undisturbed" samples (i.e. obtained with Piston and Begemann samplers) from "wadzand" deposits (Fugro 2016a).

Five (5) CDSS tests were performed on samples that included clay laminations and seven (7) CTX tests were performed on laminated/stratified coarse- and fine-grained materials. Interpretations of these test results in the form of liquefaction triggering curves were presented in Fugro (2016b).

Fugro performed an additional site investigation campaign in October 2016 using the Gel Push sampler to collect high quality "undisturbed" samples from the tidal deposits at the same locations where Piston and Begemann samples were collected. Xrays and MSCL scanning was performed on select Gel Push Tubes. Review of Xray and MSCL results indicated less disturbance (i.e. higher quality samples) effects on Gel Push samples compared to Piston and Begemann samples.

Additional cyclic tests were performed on select Gel Push samples. Three (3) CDSS tests and seven (7) CTX tests were performed on laminated Gel Push samples. In addition, six (6) CDSS tests were performed on uniform sand samples. These additional cyclic test results on Gel Push samples together with Xray and MSCL scans of the Gel Push Tubes will be included in an Addendum to the Factual Report, currently under preparation.

A summary of the tests performed on uniform and laminated tidal deposits without bias is presented in Table 1. The reported void ratios on Table 1 are the initial void ratios of the overall sample consisting of either sand only (Unit 8a) or sand/clay laminations (Units 8b and 8c).

Table 1. Summary of Cyclic Tests on Laminated and Uniform Samples (no bias)

Unit	**Initial void ratio, e_0**	**Description**	**CPT classification zone - I_c**	**Tests**
8a	~ 0.62 – 0.76	mainly sand (non-laminated, not seen in Delfzijl)	CPT classification zone 6 (Robertson) I_c < ~2.05	CSS03 (B), CSS05 (B), CSS15R (P), CSS08 (GP), CSS22R (GP), CSS23(GP), CSS27(GP), CSS28(GP), CSS25(GP)
8b	~ 0.79 – 0.92 (lower end of the void ratio range for laminated deposits, primarily from Eemshaven boreholes)	laminated, with higher percentages of sands	CPT classification zone 5 (Robertson) ~2.05< I_c <~2.6	CSS13 (P), CSS17(P), CSS18 (P), CSS19 (GP), CSS20 (GP), CSS21 (GP) CTX06 (P), CTX07 (P), CTX08 (GP), CTX12 (GP)
8c	~ 0.99 – 1.25 (higher end of the void ratio range for laminated deposits, from Delfzijl boreholes)	laminated, with lower percentages of sands and higher percentages of clay	CPT classification zones 5 and 4 (Robertson) 5 : ~2.05< I_c <~2.6 4 : 2.6< I_c <2.95 (screened out in simplified method)	CTX01 (P), CTX02 (P), CTX03R (P), CTX17(GP), CTX10 (GP), CTX14 (GP), CTX16 (GP), CTX15 (GP)

Unit	Initial void ratio, e_0	Description	CPT classification zone - I_c	Tests
9a	~ 0.63 – 0.75	Grey or dark grey fine sand	CPT classification zone 6 (Robertson) I_c < ~2.05	CCS01 (P), CCS07R (P), CCS11 (P)
9b, 9c	~ 0.95, 1.18	Grey or dark grey fine sand with thin laminae of dark clay and silt.	CPT classification zones 5 and 4 (Robertson) 5 : ~2.05< I_c <~2.6 4 : 2.6< I_c <2.95	CTX04 (P), CTX05 (P)

Figure 1 presents the Cyclic Stress Ratio (CSR) as a function of the number of cycles to liquefaction from the CDSS and CTX tests performed on Piston, Begemann and Gel Push samples from tidal deposits without static bias. For the CDSS tests without bias, liquefaction was considered to have triggered at 3.0 percent Single Amplitude shear strain. For the CTX tests without bias liquefaction was considered to have triggered at 1.5-2 percent Single Amplitude axial strain. We note that the CSRs of the CTX tests on laminated samples plotted on Figure 1 have been multiplied by a factor of 0.8 to convert to equivalent cyclic simple shear loading conditions based on results of numerical simulations as discussed in the following section.

As discussed in Fugro (2016b) due to the variable nature of the inter-tidal deposits, it is near impossible to identify identical samples with the same void ratio (relative density or percentage clay layers) for cyclic testing at multiple cyclic stress ratios. Therefore, it was not possible to characterize laminated samples in terms of relative density since the direct measurement of minimum/maximum density is not possible on each variable sample. In order to provide a basis for identifying similar samples and to develop reasonable cyclic resistance versus number of cycles relationships, the initial sample void ratio was used as an indicator and is plotted next to each test on Figure 1. These void ratio values provide an indication of absence of thin fine-grained layers within the sample (corresponding to void ratios less than about 0.76, Unit 8a, from uniform samples collected from Eemshaven boreholes) or presence of thin fine grained layers within the sample (void ratios of about 0.85, Unit 8b, from laminated samples primarily collected from Eemshaven boreholes and void ratios higher than 1 from laminated samples primarily collected from Delfzijl boreholes). As shown on this figure the samples tested all have different void ratios.

On Figure 1 liquefaction triggering curves are shown for:

- Relatively Uniform sand, Unit 8a (solid black line) present at Eemshaven explorations (i.e km 38.5, 38.0, 37.5 and 37.2). This unit is practically absent from Delfzijl explorations (i.e. it could only be identified in about 2% of the total CPT penetration length performed at Delfzijl side). The dashed black line is the interpreted liquefaction triggering curve for Unit 8a in Fugro 2016b that was also used in the effective stress dynamic levee stability evaluations (Fugro, 2016c).
- Laminated sand and clay deposits with higher percentages of sands, Unit 8b, (solid blue line) present primarily at Eemshaven explorations and to a lesser degree at Delfzijl explorations (i.e. only 2 of the 12 laminated samples tested from Delfzijl explorations had initial void ratios less than 1). The dashed blue line is the interpreted liquefaction triggering curve for Unit 8b in Fugro 2016b that was also used in the effective stress dynamic levee stability evaluations (Fugro, 2016c).
- Laminated sand and clay deposits with lower percentages of sands, Unit 8c, (solid purple line) present at Delfzijl explorations (i.e. only 10 of the 12 samples tested from Delfzijl explorations had initial void ratios larger than 1)

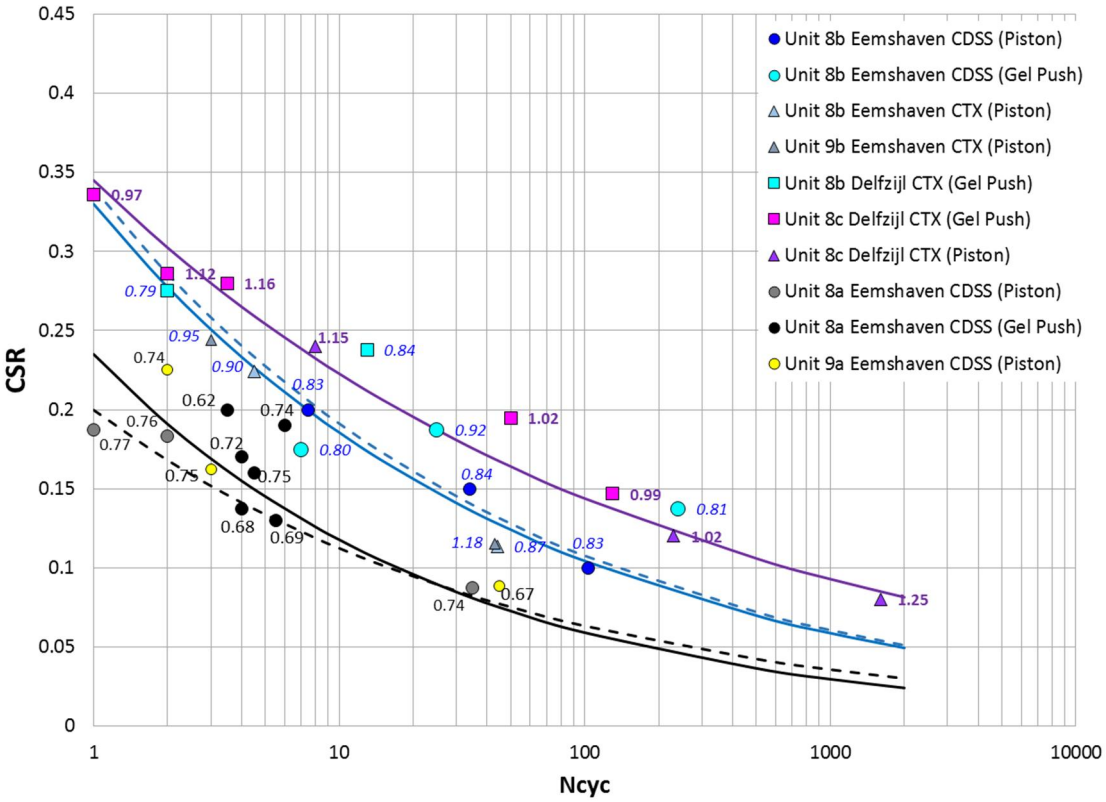


Figure 1. Liquefaction Triggering Resistance of Uniform (Unit 8a, Unit 9a) and Laminated Samples (Unit 8b, Unit 8c, Unit 9b) from Tidal Deposits (no static bias). The initial void ratio (before application of consolidation stress) is plotted next to each test.

NUMERICAL SIMULATIONS OF CYCLIC RESPONSE OF LAMINATED DEPOSITS

Evaluation of Conversion Factor from Cyclic Triaxial to Cyclic Simple Shear Loading

Two types of cyclic testing were used to assess the liquefaction triggering of the tidal deposits: i) CTX and ii) CDSS tests. Although CDSS tests provide more representative loading conditions, the small specimen height (i.e. 3 cm) in combination with the nature of the laminated deposits (i.e. clay lamination thicknesses on the order of 1-2 cm) necessitated the testing of taller specimens for the laminated samples. Therefore CTX tests were performed for most of the laminated samples although a number of CDSS tests were also performed on specimens with clay laminations.

In order to correlate the two cyclic testing types, Seed and Peacock (1971) recommended a conversion factor applied on the CSR_{TX} (i.e. cyclic stress ratio from triaxial testing) ranging from 0.6 to 0.7 for normally consolidated specimens based on data for clean sands. The recommended conversion factor depended on the value of the coefficient of earth pressure at rest, Ko.

For fine-grained samples, Donahue et al (2007) reported that:

- when studying the liquefaction susceptibility of a normally consolidated fine-grained soil deposit after the 1989 Loma Prieta earthquake, Boulanger et al. (1998) used a conversion factor of 0.7
- Sancio (2003) found a conversion factor of 0.85 when testing shallow, fine-grained soils from Adapazari with a PI < 12, at a mean effective stress of 100 kPa.

Donahue et al (2007) used a conversion factor of 0.84 based on results from CDSS and CTX tests on fine-grained samples reconstituted with the Slurry Deposition Method and tested at an effective confining pressure of 50 kPa.

In order to evaluate the conversion factor between CTX and CDSS tests on laminated deposits, numerical simulations were performed with the finite difference code FLAC2D (Itasca 2016).

As a first step, numerical simulations were performed to estimate the conversion factor between CTX and CDSS tests on a uniform sand sample (i.e. Unit 8a). PM4Sand constitutive model was used to model the cyclic behavior of a uniform sand sample under cyclic direct simple shear loading conditions. The model was calibrated to the liquefaction triggering curve for Unit 8a (black line) shown on Figure 1 (Fugro, 2016c).

Having simulated the CDSS test results on a uniform sand sample, numerical simulations of a uniform sand sample under cyclic plane strain compression loading conditions (Ko=1) were performed to approximate the CTX test. Figure 2 presents liquefaction triggering results from numerical simulations of a uniform sand sample under cyclic direct simple shear and plane strain compression (CPSC) loading conditions for different CSR. The resulting conversion factors range between 0.64 and 0.72 for a uniform sand sample which are in agreement with the range proposed by Seed and Peacock (1971) for uniform sands.

As a second step, numerical simulations were performed to estimate the conversion factor between CTX and CDSS tests on a laminated sample. First numerical simulations of test CTX07 (i.e. CSR=0.28, initial void ratio e0=0.9) on a laminated sample were performed. Figure 3 shows a photo of Sample CTX07, the X-ray section and the detailed 2D numerical model. The clay laminations were identified in the sample using the X-ray section, leading to the idealized numerical grid shown in the same Figure 3. The calibrated parameters for PM4Sand were used for the sand layers within the sample while the clay layers were modeled with a Mohr-Coulomb model. The deformed shape of the numerical model is compared with the cyclic triaxial sample on Figure 4, showing somewhat similar characteristics. Also, shown on Figure 5 is the development of cyclic strains versus cycles of loading. Both experiment and simulation suggest triggering (1.5% axial strain) at about 4 to 4.5 cycles. The cyclic responses are also compared in terms of stress-strain plots, and as stress paths. Again similar trends are noted in both experiment and simulation despite the idealization of the clay laminations and the differences in loading conditions (plane-strain versus triaxial).

Having simulated the cyclic behavior of a laminated sample under cyclic triaxial conditions reasonably, numerical simulations of the same laminated sample under cyclic simple shear conditions were performed. Figure 6 presents liquefaction triggering results from numerical simulations of a laminated sample under cyclic direct simple shear and plane strain compression loading conditions for different CSR. The resulting conversion factors range between 0.78 and 0.83 for a laminated sample which are higher than the conversion factors of uniform sand deposits, but in line with experimental findings on fine-grained samples discussed above.

Based on the above a conversion factor of 0.8 was applied on the CSRTX for the laminated samples.

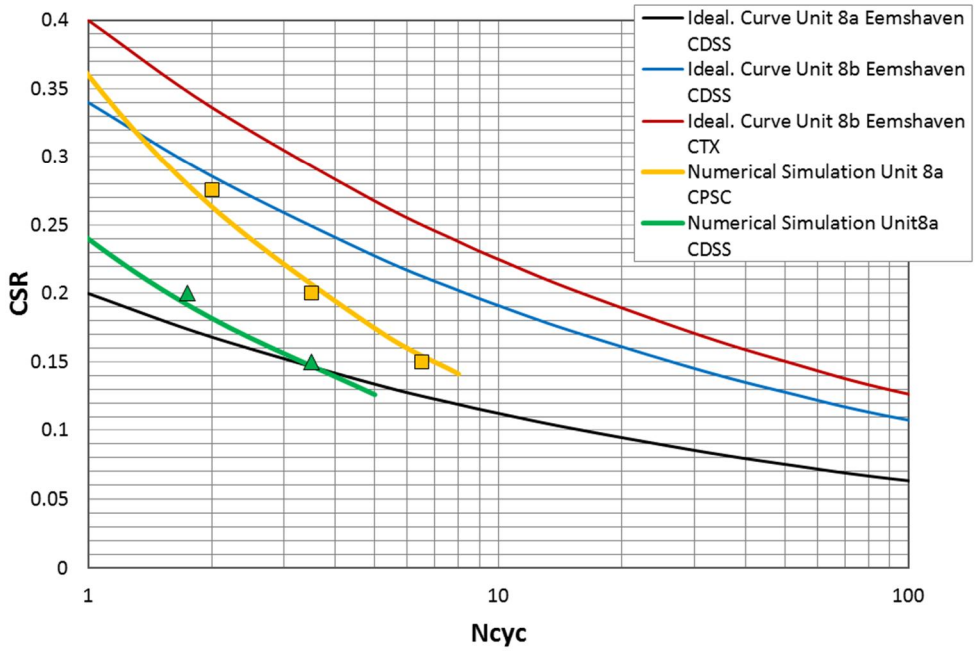


Figure 2. Liquefaction triggering curves obtained from numerical simulations of CDSS and CPSC loading conditions on uniform sand (Unit 8a).

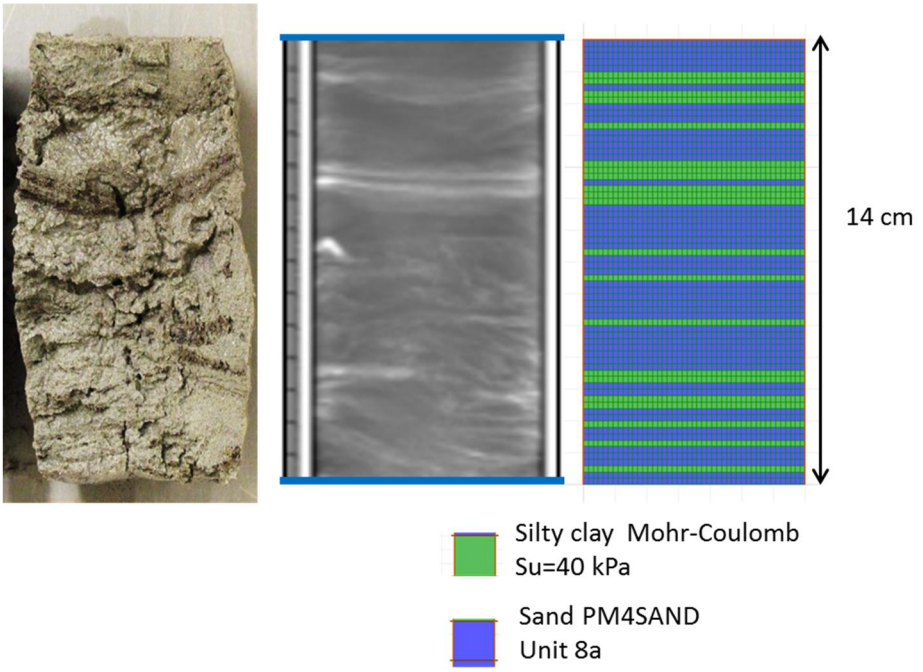


Figure 3. Photo, X-ray section and numerical model of laminated sample CTX07.

Figure 4. Photo (left) and deformed grid (right) of laminate sample CTX07 at the end of cyclic loading.

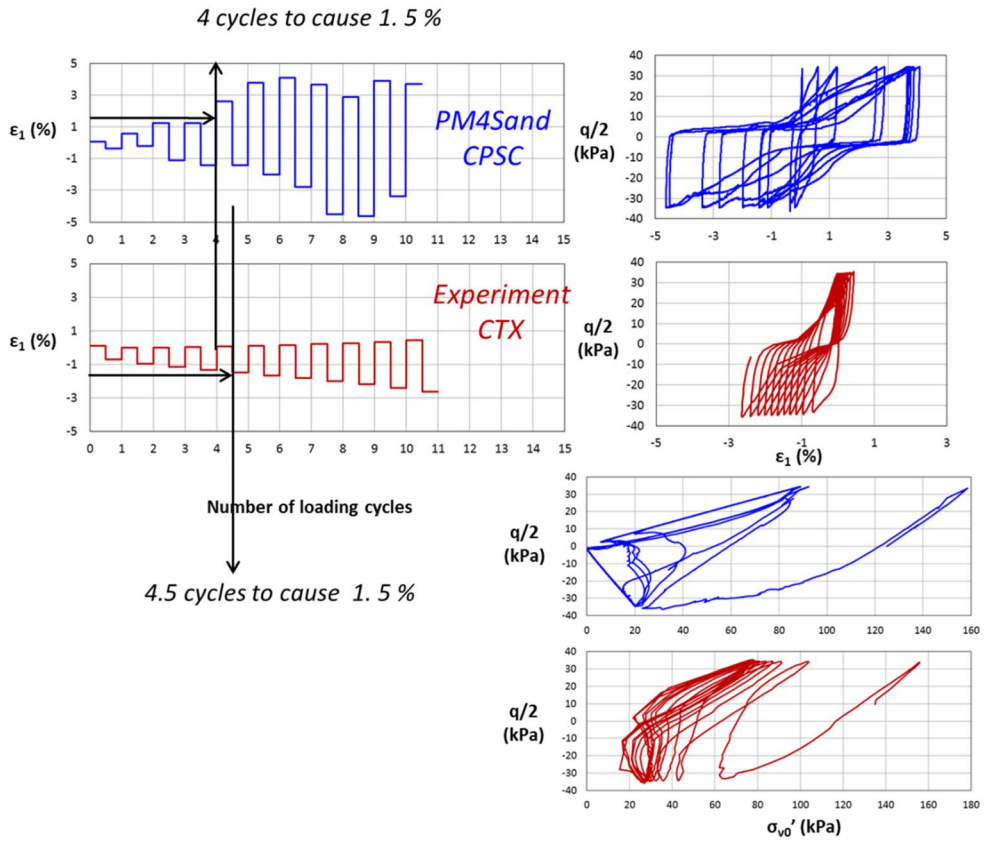


Figure 5. Comparison between numerical and experimental results for laminated sample CTX07.

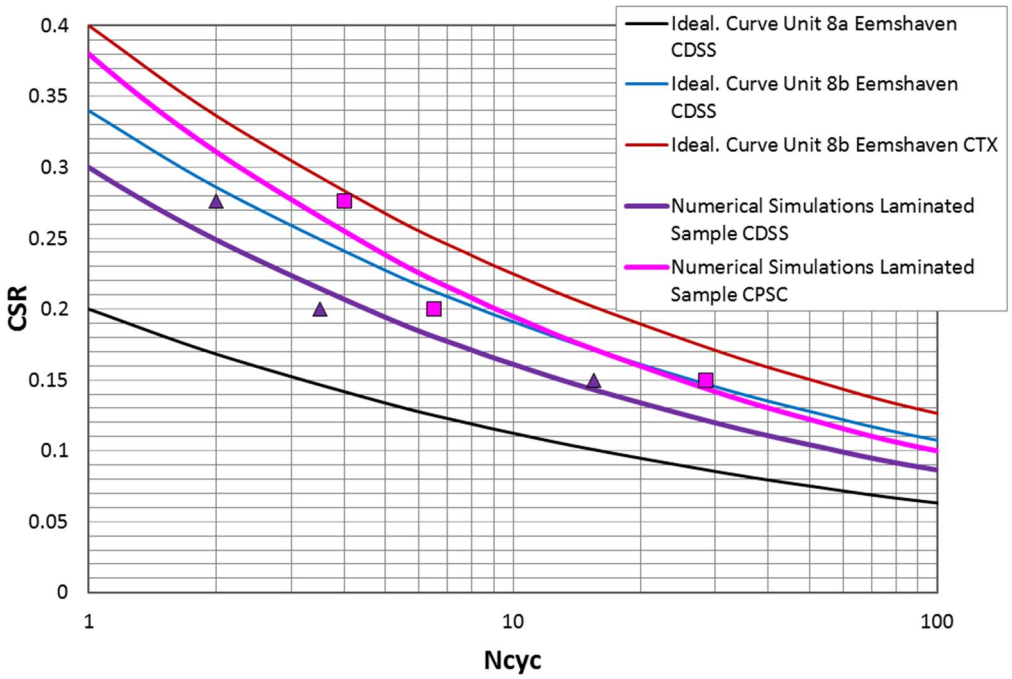


Figure 6. Liquefaction triggering curves obtained from numerical simulations of CDSS and CPSC loading conditions on laminated sample (shown on Figure 3).

Evaluation of Liquefaction Triggering

Numerical simulations of laminated samples under cyclic direct simple shear loading conditions were performed in order to develop estimates of liquefaction triggering resistance for different percentages of clay laminations within the sample.

First numerical simulations of test CDSS18 (i.e. CSR=0.2, initial void ratio e0=0.83) on a laminated sample were performed. Figure 7 shows a photograph of Sample CDSS18. Two clay sub-layers/laminations are identified in the sample. The calibrated parameters for PM4Sand and UBCSAND for Unit 8a were used for the sand layers within the sample while the clay layers were modeled with a Mohr-Coulomb model. Figure 8 presents a comparison between the laboratory test and numerical simulation test results. The percentage of clay laminations (CPL) within this sample was estimated to be on the order of 40% (defined as the total thickness of clay laminations within the sample divided by the sample height). Using the same configuration (CPL=40%), the numerical model was subjected to CSR=0.15 in an attempt to reproduce the test CDSS17 (e0=0.84). The comparison between numerical and experimental results for CDSS17 is shown on Figure 9.

Having simulated reasonably the CDSS test results on a laminated sample, parametric numerical simulations of CDSS tests on laminated samples with different percentages of clay laminations and different distributions of clay laminations within the sample were performed in order to evaluate the liquefaction triggering resistance of laminated sample. Simulations were performed at different CSR values. Analyses were performed using both PM4Sand and UBCSAND models (calibrated to Unit 8a triggering curves) to simulate the sand layer behavior.

Figure 10 presents results of numerical simulations of CDSS tests on laminated samples with clay lamination percentages (CLP) ranging from 10% to 60% (grey lines) plotted together with interpreted lab results shown on Figure 1. Different distributions of clay laminations within the sample were assumed in the numerical simulations of of CDSS tests (example schematizations shown on Figure 11a).

The numerical results shown on this figure are from analyses using UBCSand to model the sand layer behavior. As shown on Figure 10:

- numerical simulations of CDSS tests on laminated samples with CLP of 40% (i.e. higher sand percentage within the sample) produce results close to the liquefaction triggering curve from lab results for Unit 8b (blue line)
- numerical simulations of CDSS tests on laminated samples with CLP of 60% (i.e. lower percentages of sands and higher percentages of clay) produce results close to the liquefaction triggering curve from lab results for Unit 8c (purple line)
- results of numerical simulations show that even the presence of a small amount of clay laminations in the sample (i.e. CLP 10%) results in an increase of cyclic resistance compared to the uniform sand sample

It is also noted that results of parametric numerical analyses of different distributions of clay and sand layers within a sample for a given CLP (Figure 11a) indicate that the distribution of the clay layers within the sample does not significantly change the triggering resistance.

Figure 11b presents a comparison of the liquefaction triggering curves derived from numerical simulations of CDSS tests on laminated samples using PM4Sand and UBCSand to model the sand layers. As shown on Figure 11, the two models predict a similar trend.

The black line on Figures 11a and 11b correspond to the triggering resistance of a sand layer without clay laminations.

We note that as discussed in Fugro (2016c) numerical analyses results indicate that void redistribution effects, tend to be reduced as the thickness of sand layers decreases, or as the percentage of clay interlayers increases.

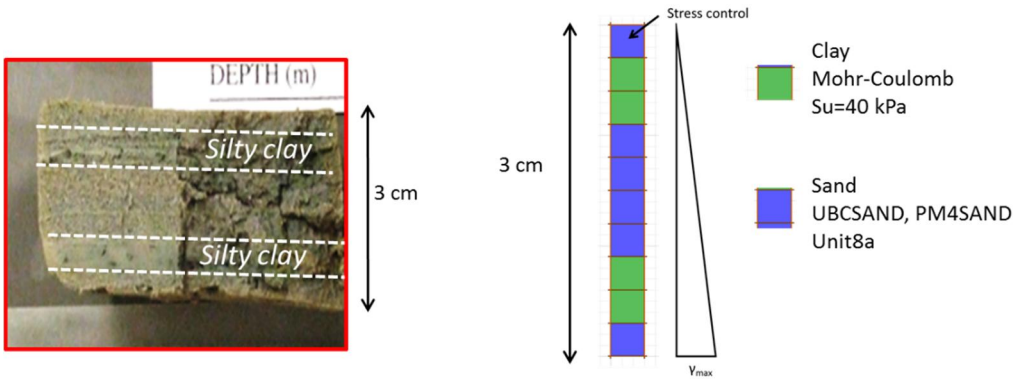


Figure 7. Photo and numerical model of laminated sample CDSS18.

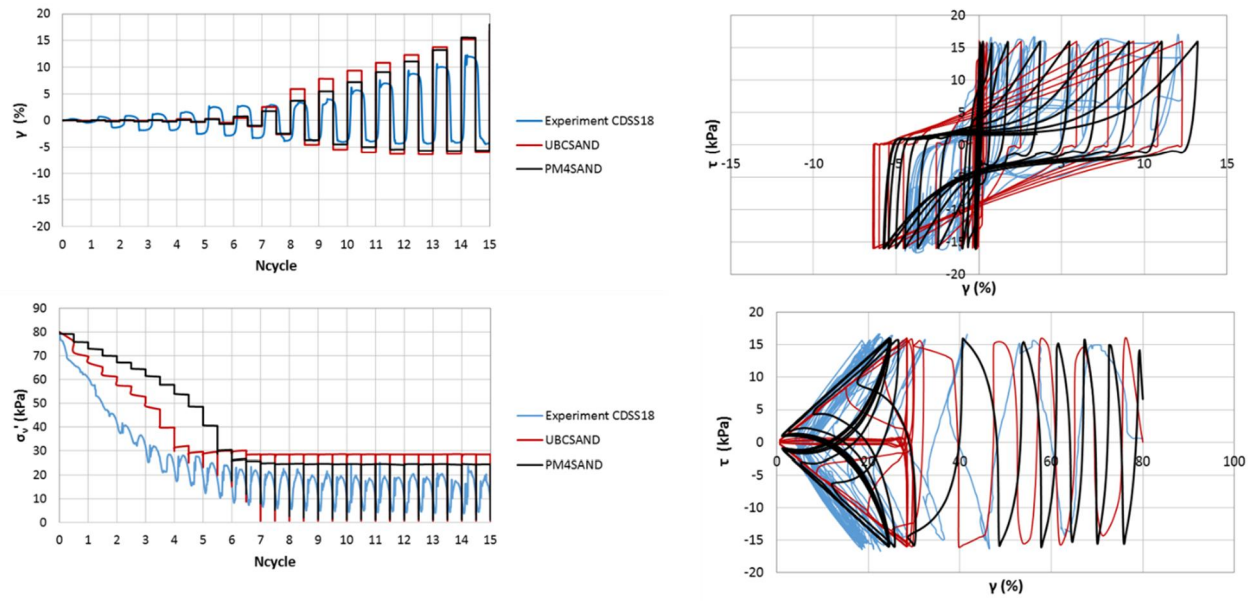


Figure 8. Comparison between numerical and experimental results for laminated sample CDSS18.

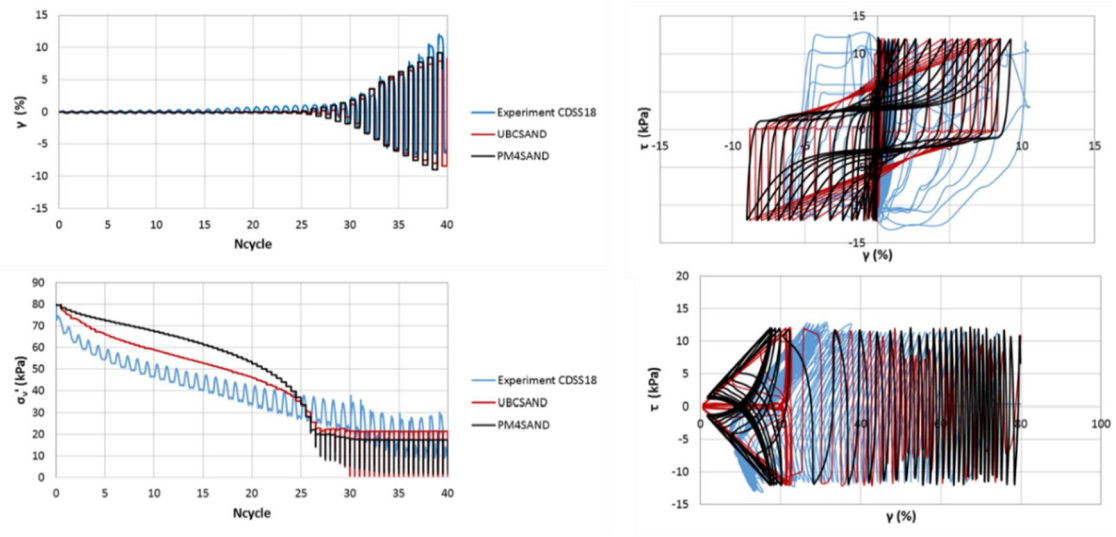


Figure 9. Comparison between numerical and experimental results for laminated sample CDSS17.

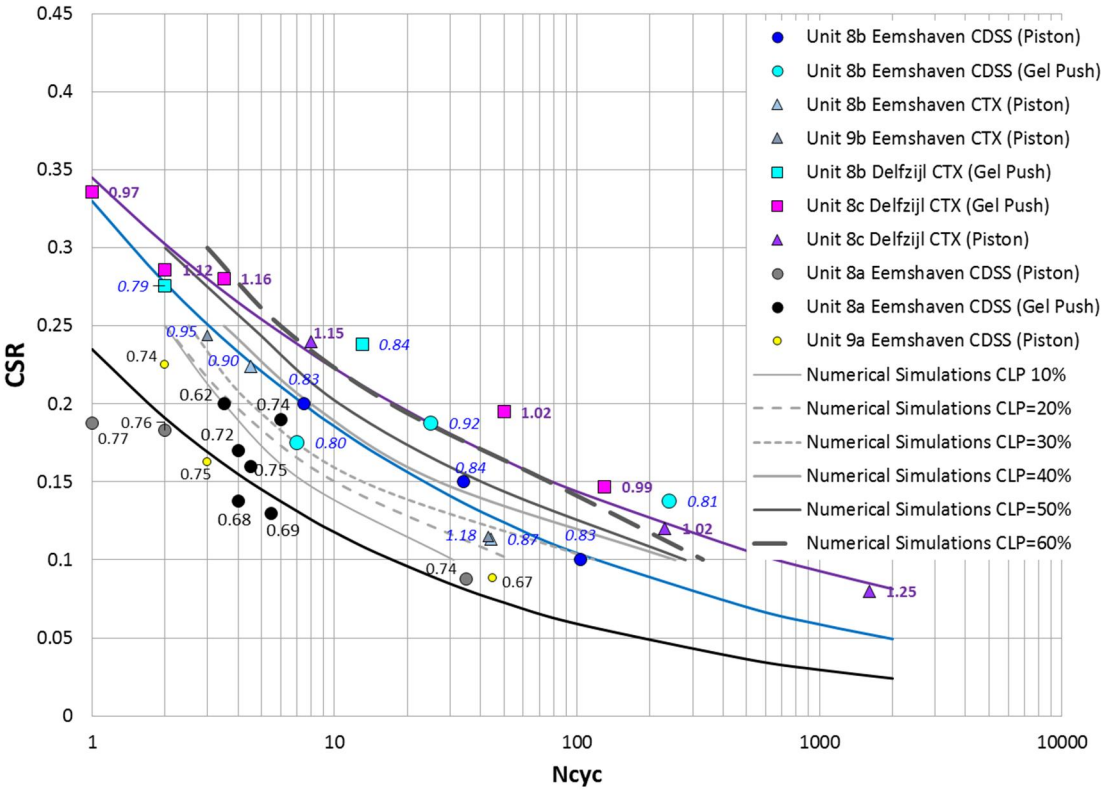


Figure 10. Liquefaction Triggering Resistance Curves from Numerical Simulations of CDSS tests on Laminated Samples with different clay lamination percentages.

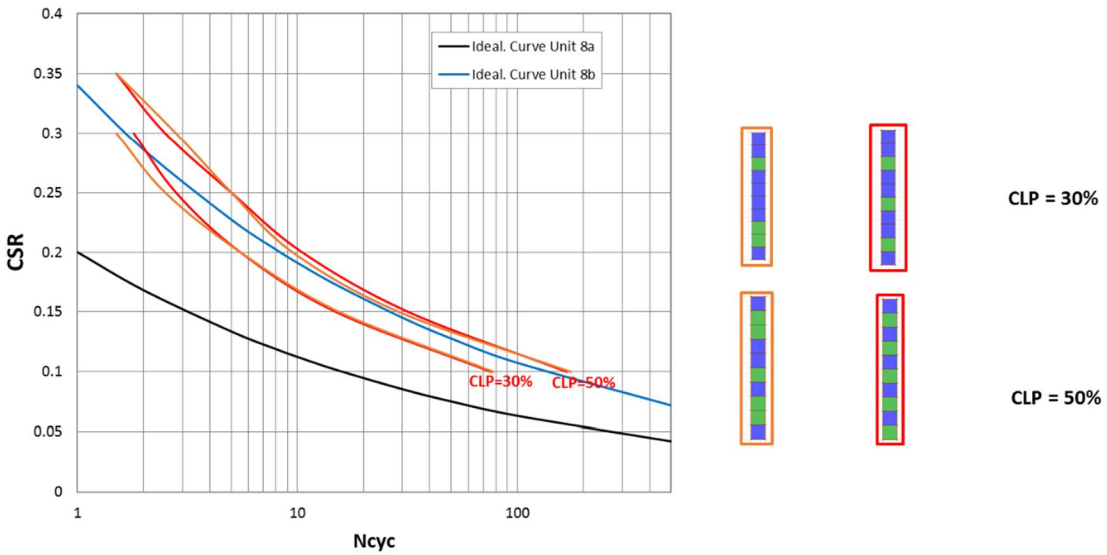


Figure 11a. Numerical simulation results for CLP 30% and 50% assuming different distributions of clay laminations within the sample.

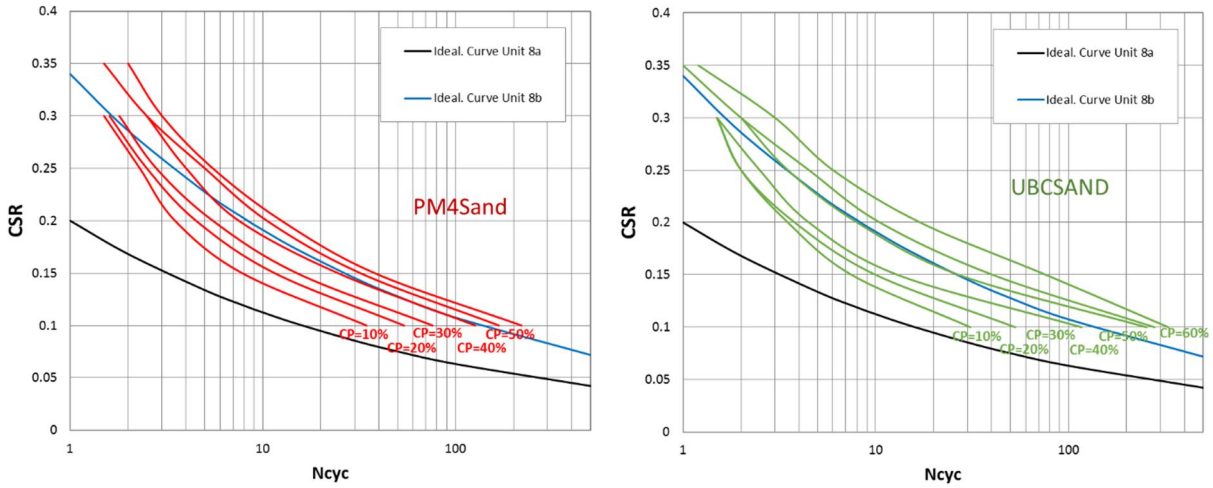


Figure 11b. Liquefaction Triggering Resistance Curves obtained from Numerical Simulations of CDSS tests on Laminated Samples with different clay lamination percentages (left: PM4Sand and right: UBCSAND).

PROPOSED CRR DISTRIBUTION FOR LAMINATED DEPOSITS

Interpreted laboratory test results and numerical simulations were used to develop a proposed distribution of the cyclic resistance (CRR) of laminated deposits at the Delfzijl side of the levee for locations were Unit 8 is present for use in FORM analyses. For these evaluations the number of cycles corresponding to a magnitude M 5 earthquake (i.e. N=4) was estimated using the MSF of Boulanger and Idriss (2014).

As discussed previously the cyclic test results were evaluated considering separate groups of materials including: Unit 8b – Laminated materials with a higher percentage of sands ($0.79 < e_o < 0.92$) and Unit 8c – Laminated materials with a lower percentage of sands ($0.99 < e_o < 1.25$). These laboratory test data were regressed to develop distributions of cyclic resistance for each group of samples. Figure 12 shows the regressions for Unit 8b samples including the mean and 90% confidence interval, while Figure 13 shows the regression for Unit 8c samples.

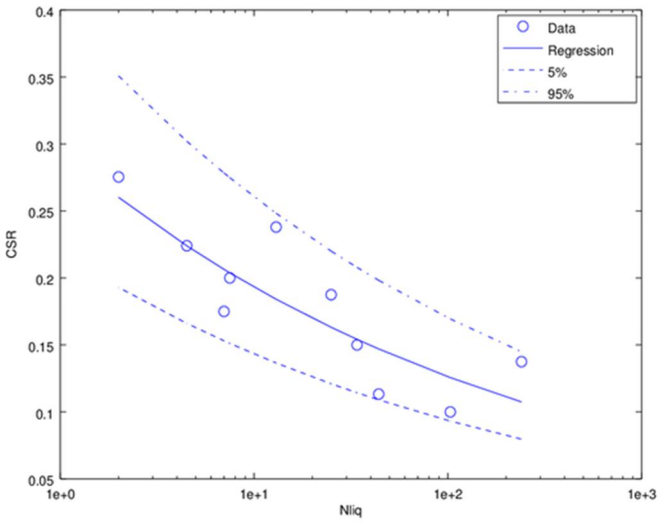


Figure 12. CRR for Unit 8b samples.

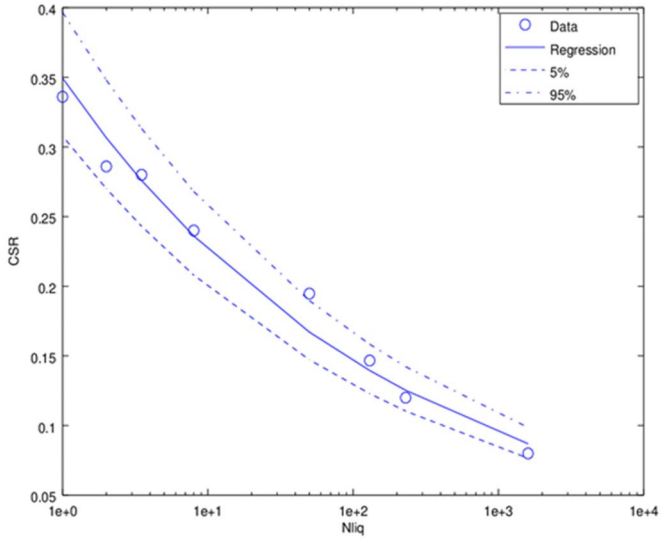


Figure 13. CRR for Unit 8c samples.

The CPT classification data also provide an indicator of the relevant content of sand within the laminated deposits. Qualitative assessments of the available CPT data suggest that in Delfzijl the laminated deposits are composed of about 50% of Unit 8b type material and 50% Unit 8c type material.

For these evaluations the number of cycles corresponding to a magnitude M 5 earthquake (i.e. N=4) was estimated using the MSF of Boulanger and Idriss (2014). Probability density functions corresponding to the cyclic resistance at 4 cycles were calculated for the Unit 8b and Unit 8c materials above and a combined distribution developed assuming equal weights to each of the two distributions. These probability density functions are shown on Figure 14.

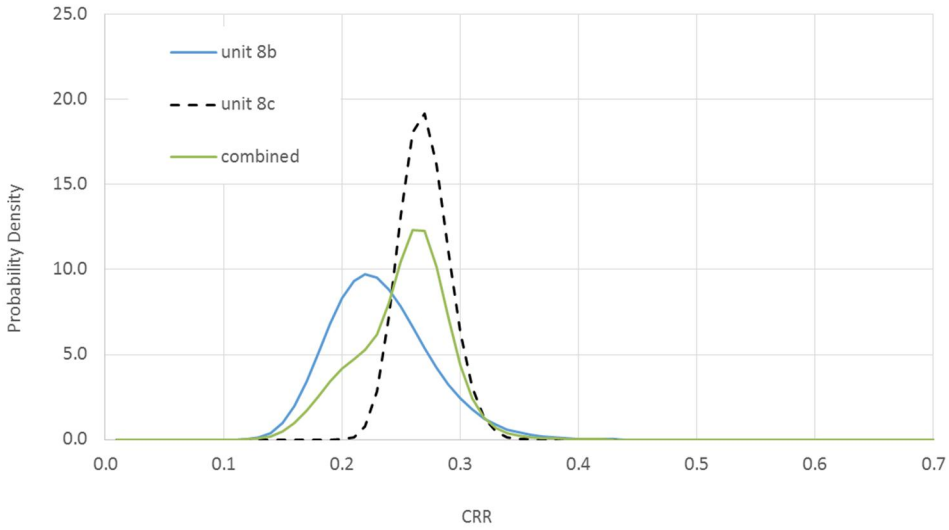


Figure 14. Probability Density Function for Unit 8b, 8c and combined.

The cumulative probability density of the combined distribution is shown relative to the lognormal fit of the distribution on Figure 15.

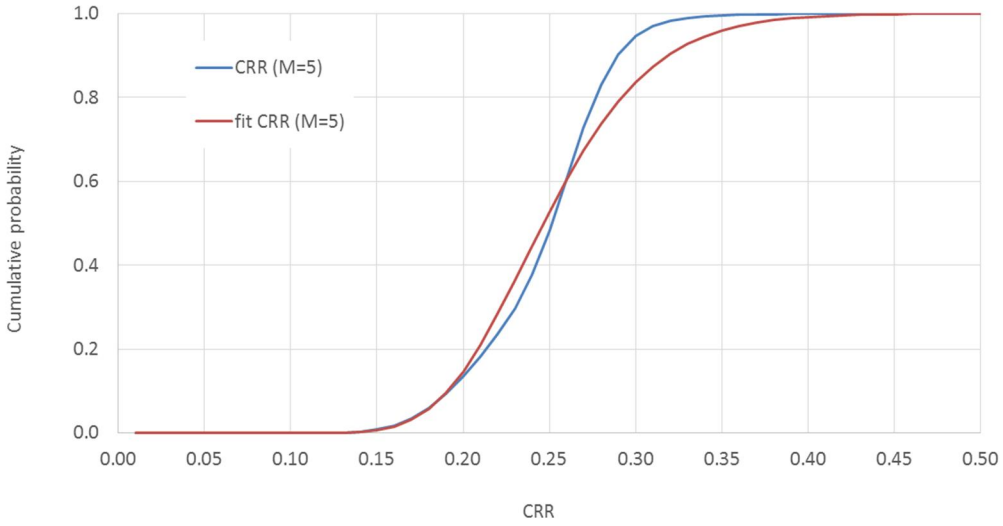


Figure 15. CRR for M=5, Delfzijl. Lognormal with μ= -1.4 and σ = 0.2.

The CRR distribution for the laminated materials is compared with the typical curves calculated from laboratory tests and numerical modeling on Figure 16. The following observations are made.

- Non-laminated sand layers (i.e. Robertson Zone 6) appear to be present in no more than 2% of the CPT data collected in Delfzijl. Estimated CRR for the laminated materials is interpreted to be mostly above the liquefaction triggering results of non-laminated sand layers (i.e. Unit 8a, black curve on Figure 16).
- A ~60% cumulative probability is assigned to liquefaction triggering results from laminated samples with initial void ratios larger than 1 as shown on Figure 16 (CLP 60%). These samples with lower percentages of sands and higher percentages of clay are considered representative of the Delfzijl conditions.
- The triggering curve used for laminated samples with initial void ratios of about 0.8 (i.e. Unt 8b in Fugro's numerical evaluations, blue curve on Figure 13) is derived primarily from CSS tests on samples from Eemshaven borehole 38.0 where a larger percentage of sand is present within the laminated deposits (CLP=40% based on numerical simulation results) compared to Delfzijl explorations based on both CPT data and borehole sample descriptions. Theses resistances are interpreted to have a 36% quantile value.
- A 10% cumulative probability corresponds to the triggering curve derived from numerical simulation results of CDSS tests on laminated samples with CLP 10% (grey curve on Figure 13) since even a small percentage of clay laminations leads to an increase of liquefaction triggering resistance as was shown from numerical simulation results. This percentage of clay laminations is considered to be low for the conditions encountered at Delfzijl explorations.
- An approximately 85% cumulative probability is assigned to the resistance level based on numerical simulations of CDSS tests on laminated samples with CLP=70%.

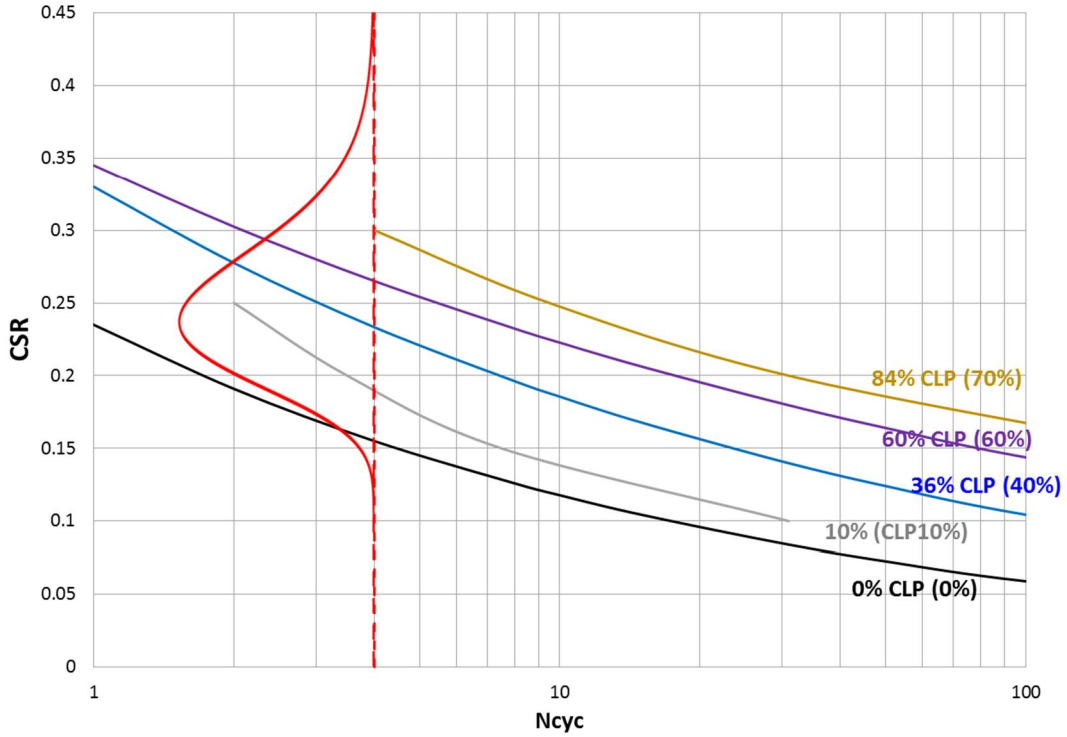


Figure 16. Quantile Values for the typical CRR curves.

REFERENCES

Boulanger R. W., Meyers M. W., Mejia L. H. & Idriss I. M. (1998) “Behavior of a fine-grained soil during the Loma Prieta earthquake,” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, pp. 146-158.

Donahue J. L., Bray J. D., and Riemer M. F. (2007) The Liquefaction Susceptibility, Resistance, and Response of Silty and Clayey Soils, U.S.G.S. Award Number: 05HQGR0009, November

Fugro (2016a) Site investigation and Cyclic Laboratory Testing, Factual data report, Delfzijl / Eemshaven Levee Project in Groningen, the Netherlands, prepared for Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., November

Fugro (2016b) Interpretive report, Delfzijl / Eemshaven Levee Project in Groningen, the Netherlands, prepared for Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., November

Fugro (2016c) Evaluation of Dynamic Stability Eemshaven-Delfzijl Levee, the Netherlands, prepared for NAM, December 2016

Sancio, R. B., Bray, J. D., Riemer, M. F. and Durgunoglu, T. (2003) "An assessment of the liquefaction susceptibility of Adapazari silt," 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering, Christchurch, New Zealand.

Seed, H. B. and Peacock, W. H. (1971) “Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics,” Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No 8, pp. 1099-1119.

Appendix E Residual strength

Documented cases have shown that post-earthquake stability may be critical even if stability is ensured during shaking (e.g. Lower San Fernando dam case history).

Sand Layers. As mentioned in Fugro (2016a) post earthquake stability analyses were performed by assigning residual strength (i.e. defined as the ratio of residual undrained shear strength and in situ initial vertical effective stress, S_r/σ_{vc}') as a function of q_{c1Ncs} as proposed by Idriss and Boulanger (2008) for areas where the maximum excess pore pressure during shaking exceeded a specified threshold indicative of liquefaction. Fugro (2016a) considered that void redistribution effects could be significant and used the lower of the two curves plotted in Figure 28.

Since both the Cyclic Resistance Ratio (i.e. CRR) to liquefaction triggering and residual strength are a function of q_{c1Ncs}, this means that in general when CRR increases then the residual strength ratio S_r/σ_{vc}' should also increase and vice versa.

Laminated deposits within Unit 8. As discussed in Fugro (2016a) the presence of clay interlayers does create permeability contrasts that theoretically would allow for the development of void redistribution. However, given the limited thickness of the individual sand layers, the volume of water that could migrate upwards is limited. Moreover, Unit 8 is typically characterized by an overall low hydraulic conductivity, likely due to the limited lateral continuity and thickness of the sand sub-layers. In the absence of the ability for water inflow, the potential for suppression of dilation will be limited, and shear resistance will likely increase as shear strains exceed 5 to 15 percent. Additionally, due to the relatively low percentage of sand sublayers within the unit and the limited thickness of the sand sublayers, even the occurrence of relatively large shear strains (10 or 20%) within the layers will likely not result in large horizontal deformations prior to the development of dilation-induced shear resistance. Parametric numerical evaluations performed in Fugro (2016a) also point to the mitigating effect of thin layers in laminated deposits on the potential for void redistribution.

Despite the above we have conservatively used the residual strength defined above for sand layers also for the laminated soils. Since the CRR for the laminated soils is defined from laboratory test data, the residual strength for the laminated soils was estimated through a back-calculated q_{c1Ncs}. The value was backcalculated from the CRR value used for the laminated deposits in the FE analyses using the Boulanger and Idriss (2014) relationship.

A clear definition of the uncertainty in residual strength estimates is not available. For the purpose of these evaluations we have assumed that the uncertainty increases as the CRR (or q_{c1Ncs}) increases based on the fact that the recommended relationship by Idriss and Boulanger (2008) is extrapolated for larger q_{c1Ncs} values (i.e. dashed black lines in Figure 28 below). We have used a lognormal distribution to model the uncertainty on CRR with $\mu=0$ and $\sigma=0.15$. Figure 28 shows the resulting 95% confidence interval of residual strength ratios using the uncertainty term described above. The uncertainty is intended to cover both the range of data used to develop the empirical relationship as well as factors such as possible effects of mixing during large deformations etc.

An alternative probability distribution for residual strength based on Kramer and Wang (2015) was also considered in the FORM analyses. The Kramer and Wang (2015) probability distribution for residual strength is based an empirical model consistent with steady-state concepts and behavior observed in laboratory tests and also calibrated on the basis of residual strengths back-calculated from flow-side case histories. The Kramer and Wang (2015) model predicts residual strengths as a function of normalized SPT blowcounts (N_{160}) and as a function of overburden stress. A comparison of the residual strength distributions considered in the FORM analyses is shown on Figure 28. Boulanger and Idriss (2008) relationship between N_{160} and q_{c1Ncs} was used to plot the residual strength proposed by Kramer and Wang (2015) as a function of normalized tip resistance. The residual strength curves plotted on Figure 28 from Kramer and Wang (2015) were derived for 1.5 atm overburden stress.

In order to account for the uncertainty on the conversion between N_{160} and q_{c1Ncs} the standard deviation considered in Kramer and Wang (2015) was increased from 0.37 (green curves) to 0.45 (red curves).

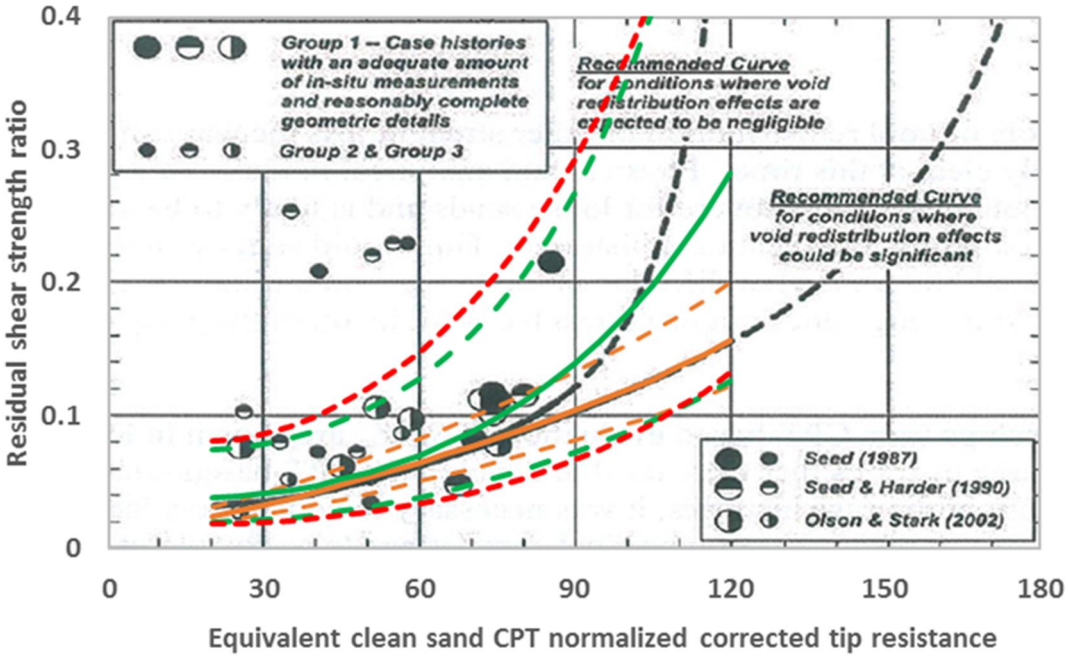


Figure 28. Uncertainty related to residual strength (95%-confidence interval) based on Kramer and Wang (2015) using the standard deviation proposed by the authors (green dashed curves) and an increased standard deviation of 0.45 (red dashed curves) to account for uncertainty in the conversion from $(N1)_{60}$ to q_{c1Ncs} , and Idriss and Boulanger (2008) assuming void redistribution and engineering judgment for the estimation of standard deviation (orange curves).

Appendix F Model uncertainty

Two dimensional, effective-stress, dynamic analyses were performed using the finite difference code FLAC (Itasca 2011). Two different constitutive models were used to model the effective stress behavior of coarse-grained layers to account for epistemic uncertainty: UBCSand, developed by Professor Peter Byrne and his team at the University of British Columbia; and PM4Sand developed by Professor Ross Boulanger and Dr Katerina Ziotopoulou at UC Davis. Both constitutive models were calibrated against site-specific cyclic laboratory tests in order to capture soil triggering and strain accumulation behavior for both level (no-bias) and sloping ground (with static-bias) conditions. The reasonable comparison between observed and simulated behavior suggests that the calibrated constitutive models can be tailored to adequately simulate cyclic soil behavior at the element level both in terms of liquefaction triggering and in terms of post-liquefaction shear strain accumulation (Fugro 2016a).

In order to validate the constitutive models used for the liquefiable sands (i.e. determine the degree to which a model is an accurate representation of the real world from the perspective of the intended uses of the model) and evaluate the predictability of the implemented constitutive model at a system level, numerical simulations of real-scale boundary-value problems, such as case histories and centrifuge experiments, were performed and numerical results were compared with recorded measurements in the field and in the centrifuge, respectively. The case studies (case histories or centrifuge tests) used for validation involved liquefaction induced displacements of slopes and embankments founded on liquefiable layers in order to validate the ability of the two models to predict liquefaction induced deformations (Fugro 2016a).

Several "deterministic" sensitivity analyses have been carried out with two different constitutive models. Differences between computed crest settlements with PM4sand and UBCsand were found to be smaller than a factor 1.3 for all motions considered, for a given stratigraphy and return period Figure 29. Differences of about a factor 1.1-1.2 were found for 10 different stratigraphies (for a given motion and return period) and for 2 different return periods (for a given motion and 2 different stratigraphies), see Figure 30 and Figure 31.

As indicated in the expert panel report from December 3rd 2016 (Expert Panel 2016), with well-calibrated and validated constitutive models embedded in reliable numerical tools, dynamic effective stress analyses using multiple input motions can provide an indication of the range of expected levels of performance. They also allow evaluation of the sensitivity of response to various input parameters and modeling assumptions. It is important, however, to recognize potential uncertainties in constitutive models and numerical analyses. For critical projects, parallel analyses would ideally be performed using different constitutive models and different numerical tools. As described above, in Fugro (2016a) the computer code FLAC was used with two different calibrated and validated constitutive models to simulate the behavior of liquefiable sands. Ideally these analyses should be supplemented by parallel check analyses using a different computational tool (e.g., OpenSees with PDMY model or FLIP with cocktail glass model). Due to time constraints additional analyses with a different computational software have not been performed. To account for this we have introduced a model uncertainty term in the limit state function.

Considering the results of the "deterministic" sensitivity analyses, a model uncertainty distribution with $\mu_{ln(m)}=0$ $\sigma_{ln(m)}=0.42$ would seem reasonable. However, considering the fact that sensitivity analyses have only been carried out with different constitutive models, but not with different software packages, a wider distribution has been assumed. We have assumed that the crest settlements estimated in Fugro (2016a) correspond to the mean value of observed settlements and that there is a 10% probability of exceedance of the predicted crest settlements by a factor of 2. The resulting model uncertainty function is a lognormal distribution with $\mu_{ln(m)}=0$ and $\sigma_{ln(m)}=0.55$ (Figure 32).

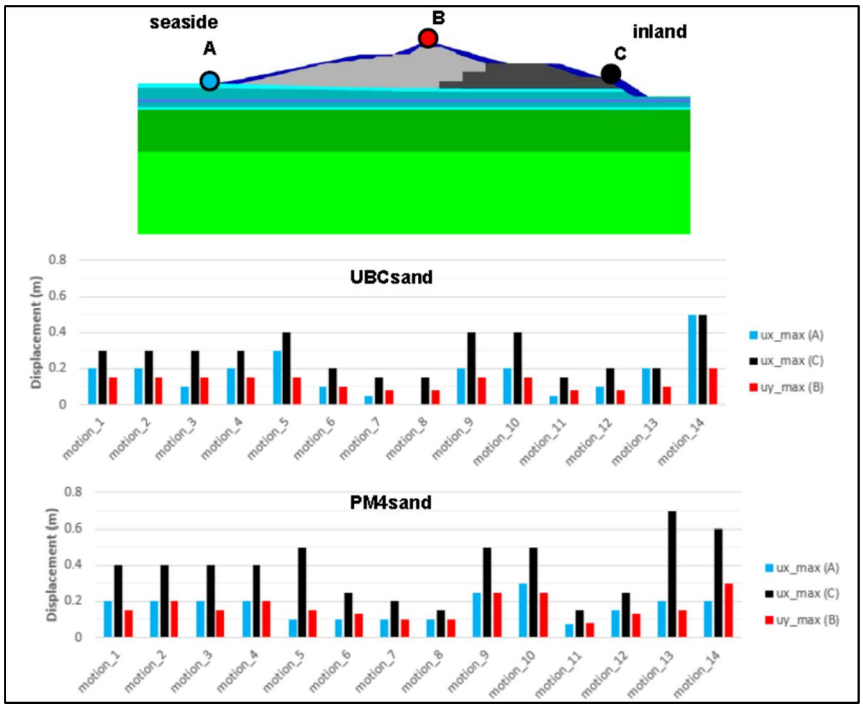


Figure 29. Calculated displacements with UBCsand and PM4sand for 14 different motions (Fugro 2016a: Figure 6-29b, page 42).

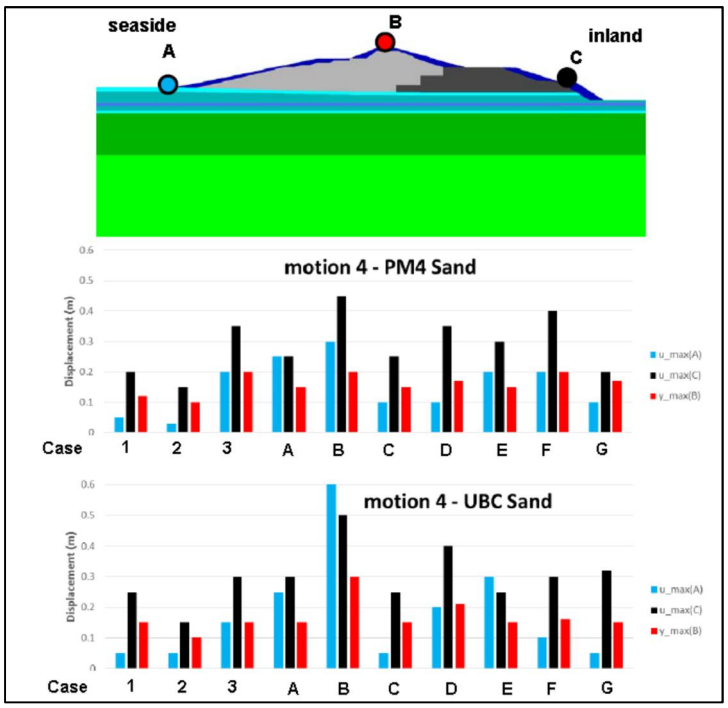


Figure 30. Calculated displacements with UBCsand and PM4sand for 10 different stratigraphies (Fugro 2016a: Figure 6-31b, page 45).

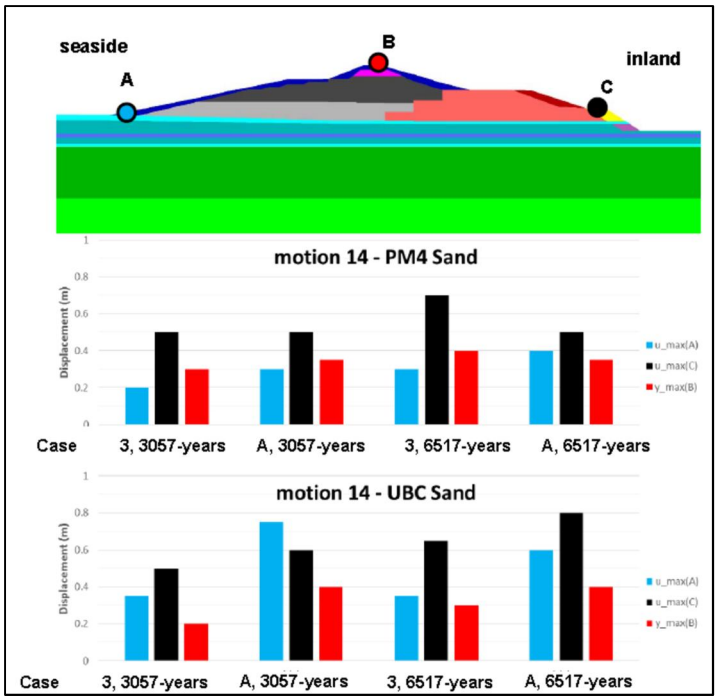


Figure 31. Calculated displacements with UBCsand and PM4sand for 2 different return periods, for 2 different stratigraphies (Fugro 2016a: Figure 6-32b, page 47).

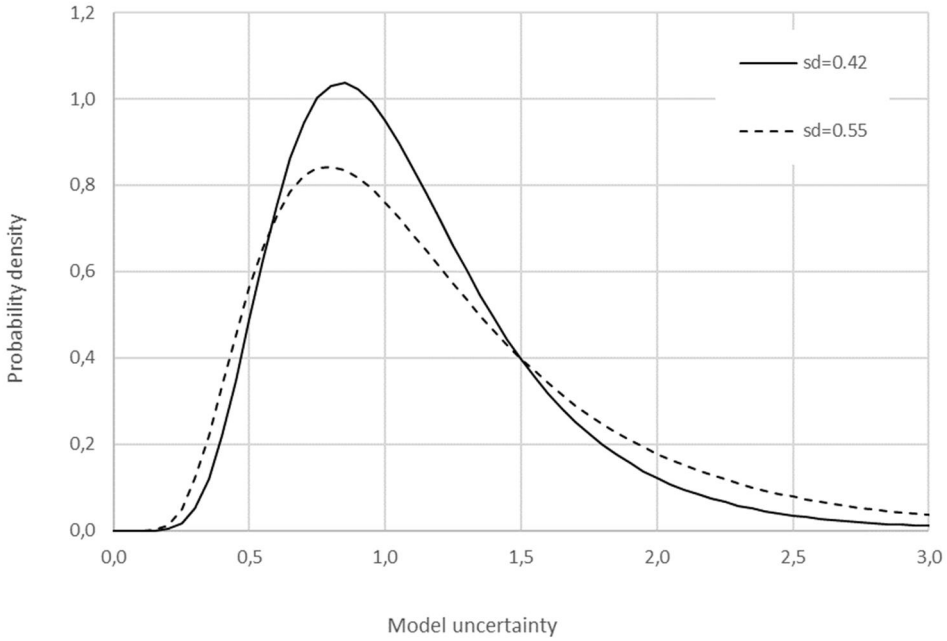


Figure 32. Model uncertainty: lognormal distributions for distribution parameters $\mu_{ln(X)}$=0 and $\sigma_{ln(X)}$=0.42, and $\mu_{ln(X)}$=0 and $\sigma_{ln(X)}$=0.55.

Appendix G Volume effects

Introduction

A laminated deposit consists of a series of alternating sand and clay layers. The resistance of the deposit to liquefaction depends on the composite behavior of these layers. Each lab test gives the resistance to liquefaction of a relatively small volume of laminated material.

Similarly, uniform sand deposits encountered at Eemshaven are characterized by a probability distribution of cyclic resistance based on q_{c1Ncs} values measured in uniform sands at Eemshaven (i.e. Unit 8a, see Fugro 2016c).

It is possible to fit numerous samples into the volume of Unit 8 that plays in a role in a seismic stability analysis. Layers of laminated material as well as sands without clay laminations of variable relative densities are treated as uniform in stability analyses (spatial variability within layers is not modelled explicitly). It is therefore important to specify the distribution that describes the uncertainty related to the composite behavior of such a larger volume of liquefiable material.

The uncertain resistance of such a larger volume (or the resistance of an "equivalent uniform layer") is denoted by CRR in this Appendix. The uncertain resistance of a small volume (sample size) is denoted by $\underline{CRR}$. The difference between the distributions of CRR and $\underline{CRR}$ is caused by the effects ("volume effects") of spatial variability.

Spatial variability could turn out to be favorable, when local weakness are compensated by strengths elsewhere. It could, however, also turn out to be unfavorable, when local weaknesses dominate composite behavior:

1. In case of (only) a "weakest link/series system"-effect, the standard deviation of CRR will be smaller than the standard deviation of $\underline{CRR}$. The mean value of CRR will also be smaller than the mean value of $\underline{CRR}$.
2. In case of (only) spatial averaging, the standard deviation of CRR will be smaller than the standard deviation of $\underline{CRR}$, while the expected values of both variables will be the same (their median values could be different).
3. In case of (only) a "strongest link/parallel system"-effect, the standard deviation of CRR will be smaller than the standard deviation of $\underline{CRR}$ but the mean value of CRR will be greater.

In normal slope stability analyses, some degree of spatial averaging of resistance properties over the slip plane is typically assumed (VanMarcke 1977; Calle & Barends 1990).

An approximate way of modelling the two types of spatial variability described above would be to model a layer as a composite of n x m x p smaller volumes with random/uncertain resistances, denoted by $\underline{CRR}_{i,j,k}$, with i=1..n and j=1..m and k=1..p. This is shown schematically in Figure below. Each element in Figure has a resistance that can be described by the same distribution, but that can be different for each element. Note that it seems reasonable to assume that correlation distances are much smaller in a vertical direction than in the horizontal plane.

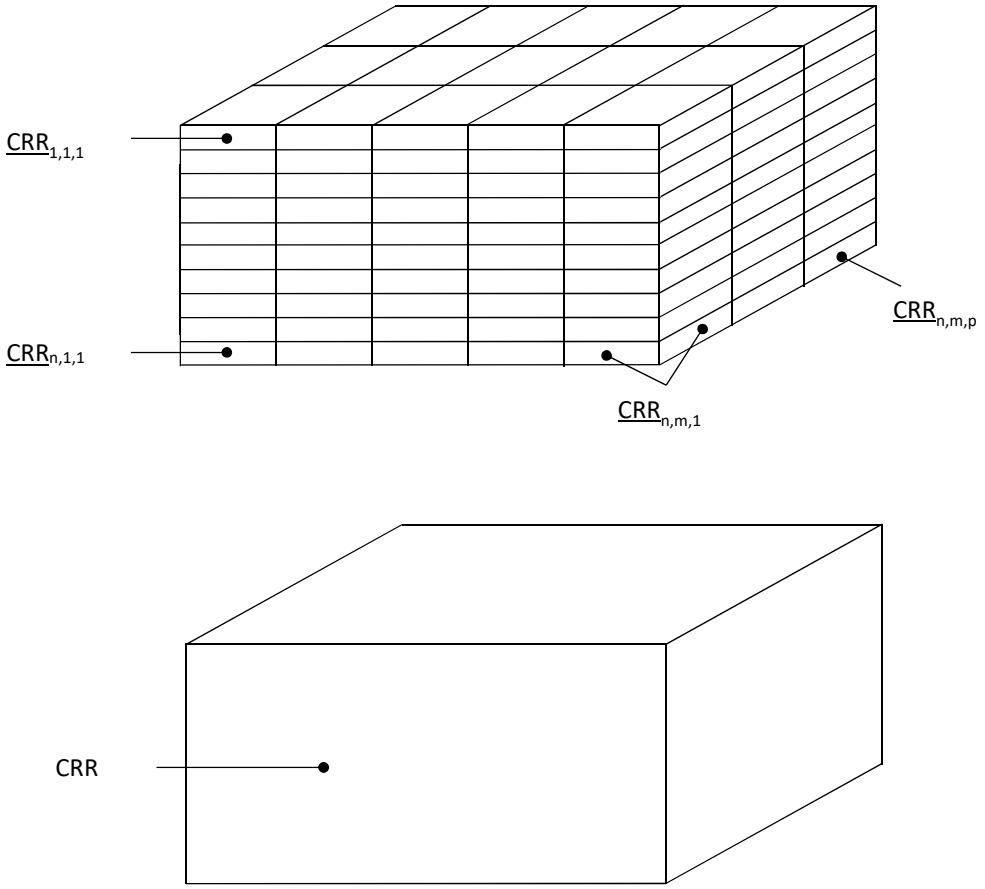


Figure 33. Illustration of a heterogeneous model and an equivalent uniform model.

The heterogeneous model shown in Figure 33 Figure merely serves an illustrative purpose. It would be too time-consuming to use it for deriving a distribution for CRR. Doing so could also easily yield a false sense of accuracy, since such an analysis would involve modelling assumptions that would themselves be highly uncertain (e.g. assumptions concerning the correlation structure).

Sensitivity analyses

It is possible to get insight into volume effects from simplified numerical simulations. This can be done by comparing the computed crest settlements for a cross-section with uniform properties across a sand layer and a similar cross-section in which the layer has spatially variable properties. The following analyses have been performed (Figure 34):

1. An analysis in which the CRR varies in both a horizontal and vertical direction with 2 random assignments of CRR-values.
2. An analysis in which the CRR within a layer only varies along the vertical (horizontal continuity).

It is stressed that these cases are highly schematic: they do not accurately reflect reality. The spatial variations have not been constructed with a random fields model, as done by Montgomery & Boulanger (Montgomery 2015; Boulanger & Montgomery 2015; Boulanger & Montgomery 2016). Rather, 5%, 50% and 95% quantile values from the CRR-distribution have been assigned randomly within the liquefiable layer.

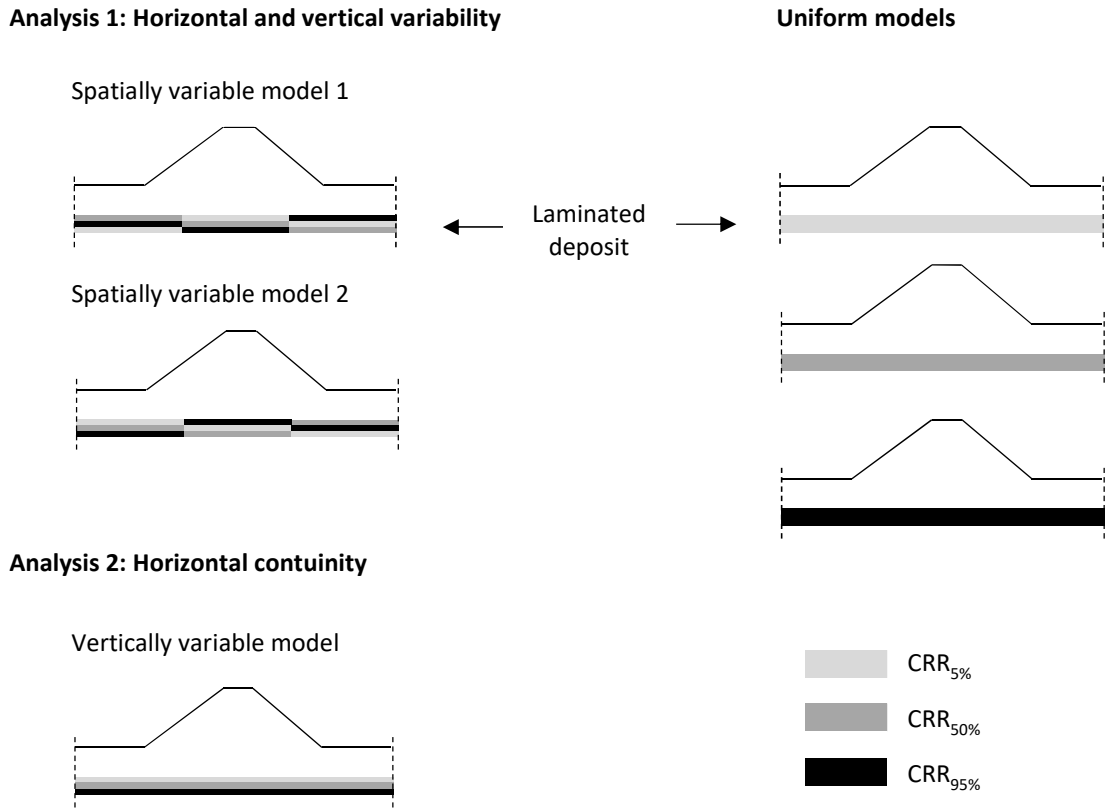


Figure 34. Sensitivity studies to get a feel for the effect of spatial variability within interlayered deposits.

Note that the effect of variability in the third dimension (perpendicular to this sheet of paper) cannot be dealt with in a 2D-model. It seems reasonable, however, to assume that variability in the third dimension reinforces the behavior observed in the 2D-senstivity analysis.

Numerical models simulating the idealized schematizations shown in Figure 34 were developed for the evaluation of volume effects. Analyses were performed with the finite difference code FLAC. The UBCSand constitutive model was used to simulate the sand behavior. The model parameters were calibrated to cyclic resistances corresponding to 5% (pink line, Figure 35), 50% (blue line, Figure 35) and 95% (cyan line, Figure 35) of the CRR-distribution for uniform sands encountered at Eemshaven since this distribution results in lower (less favorable) cyclic resistance values compared to the distribution used for laminated deposits.

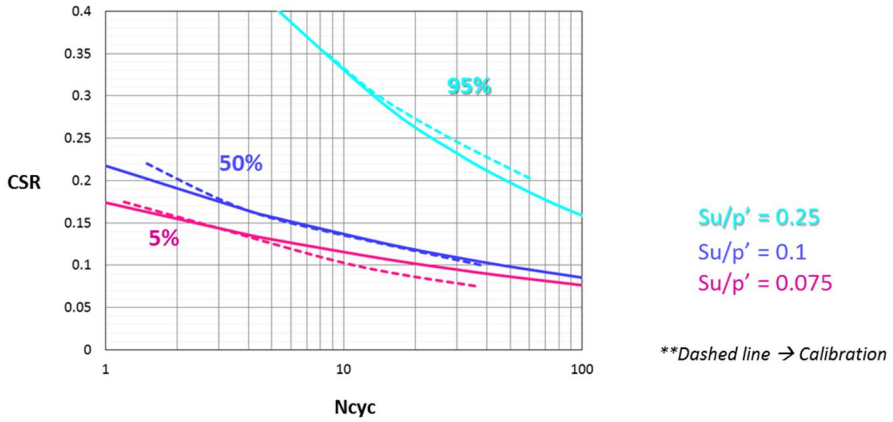


Figure 35. Calibrated constitutive model to different 5%, 50% and 95% percentiles of CRR for Eemshaven.

Analysis 1: Horizontal and vertical variability

The numerical models for the spatially variable case and the uniform case for Unit 8 are shown on Figure 36. Results of numerical evaluations of volume effects are shown in Figure 37 in the form of co-seismic and post-seismic crest settlements for the following cases:

- Model with spatial variability 1 in Unit 8 (upper-left illustration Figure 26)
- Model with spatial variability 2 in Unit 8 (mid-left illustration Figure 26)
- Uniform Unit 8 modeled with the 5% quantile value of CRR
- Uniform Unit 8 modeled with the 50% quantile value of CRR
- Uniform Unit 8 modeled with the 95% quantile value of CRR

As shown in Figure 37, the spatially variable Unit 8 properties result in decreased crest settlements compared to the cases where Unit 8 properties are uniformly modeled using 5% and 50% quantile CRR values. It is worth noting that the both models with spatial variability 1 and 2 give similar results.

Analysis 2: Horizontal continuity / Vertical Variability

The numerical model for the vertically variable case (where horizontal continuity is maintained) is shown in Figure 36 (bottom). As shown in the graph of Figure 37, the vertical variability in the properties of Unit 8 leads to crest settlements similar to the case where Unit 8 properties are uniformly modeled using 50% quantile CRR values.

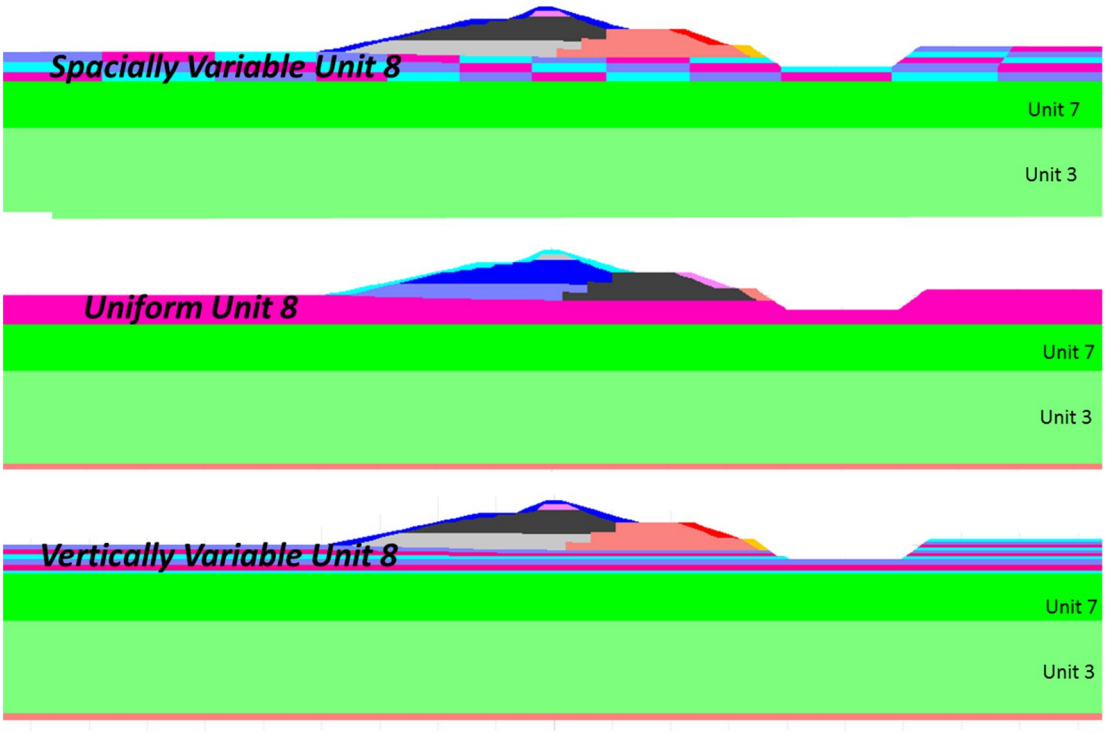


Figure 36. Numerical Models for Assessment of Spatial Variability of Unit 8.

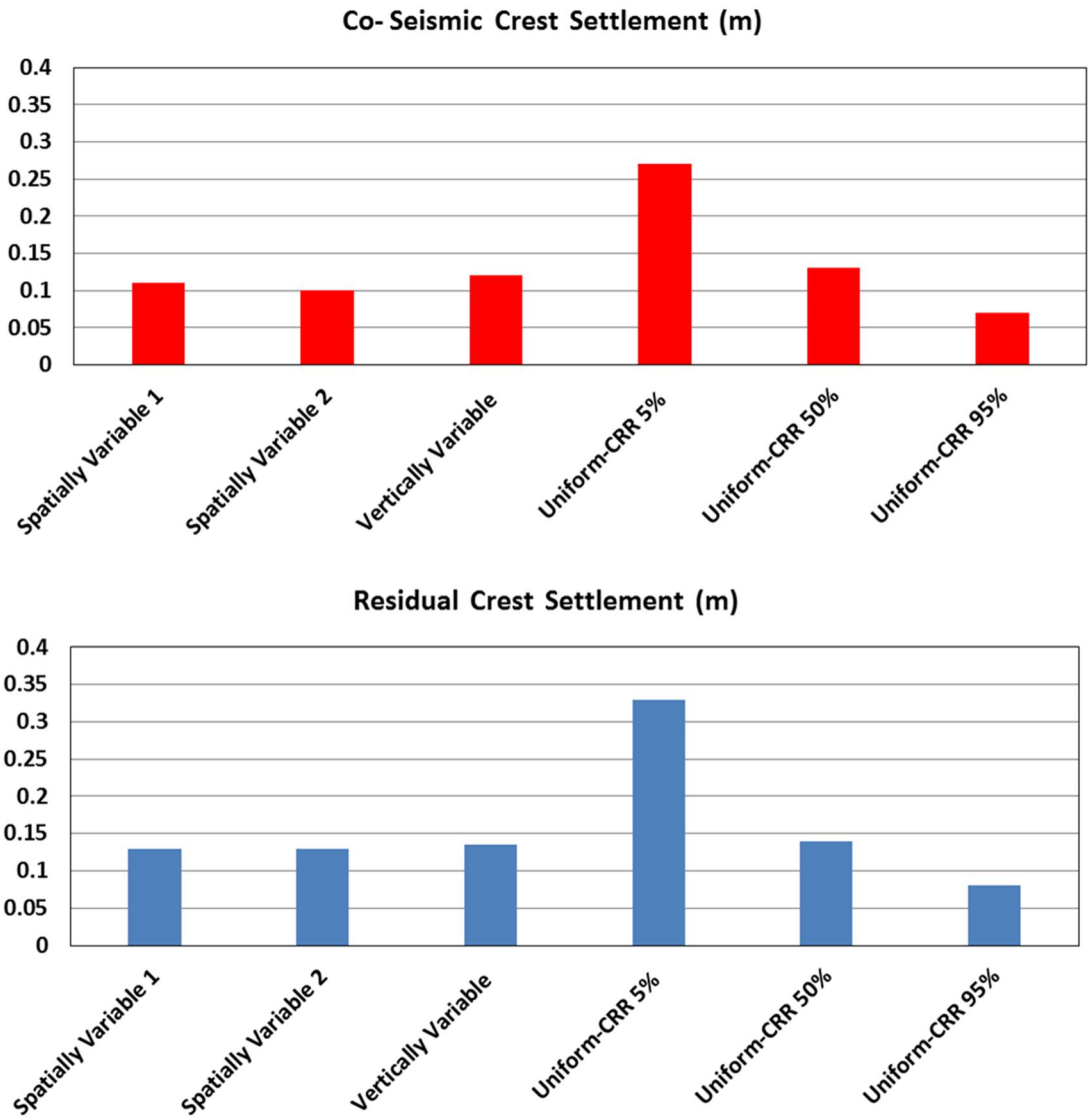


Figure 37. Estimated crest settlements using spatially variable and uniform properties for Unit 8.

Discussion

The results shown in Figure 37 indicate that spatially averaged CRR-values should be used in a uniform model to mimic the results of a model in which the spatial variability of CRR-values within deposits is modelled explicitly (a random fields model). This finding is in line with a comparison between numerical analyses using a random fields model and a uniform model performed for a dam by Boulanger & Montgomery (2016). In this case study, a random fields model with a coefficient of variation of $(N_1)_{60cs}$ of 0,4 and a scale of fluctuation in of 20 m horizontally and 1 m vertically was compared to a uniform model. The case study concerned large deformations, as is the case here. Boulanger & Montgomery (2016) recommend a 33rd percentile value for use in deterministic analyses (conservative) and a range of 30-70% in risk assessments.

The abovementioned sensitivity analyses and more detailed case study all assumed that the uncertainty related to the cyclic resistance ratio or $(N_1)_{60cs}$ can be attributed to fluctuations of point values relative to a spatial average or median value. In case of a regional data set, i.e. a data set that consists of measurements from various locations (or case histories), the local average or median can be uncertain as well. This part of the variance should not be treated as spatially variable in a cross-sectional reliability analysis. Considering this, the uncertainty related to a local average may be expressed as follows (after TAW 2001):

$$\sigma_X = \sigma_{\underline{X}} \cdot \{ (1-\omega) + \omega \cdot \Omega^2 \}^{1/2} \qquad (35)$$

Where:

σ_X Standard deviation of the spatial average of stochastic variable $\underline{X}$ (-)

ω Part of the total variance that can be attributed to fluctuations of point values relative to the local average (-)

Ω Variance reduction factor (-); $0 \leq \Omega \leq 1$

Recommended $CRR_{M=5.0}$-distribution for laminated deposits for use in a uniform model

Based on the results of the sensitivity analyses and the case study by Boulanger & Montgomery (2016), a variance reduction factor Ω of 0 seems reasonable. Note: the average of a lognormally distributed variable is higher than its median value. The difference is negligible however, for the distribution of the CRR for laminated deposits (a factor 1.02). This means that the distribution of the local average is almost identical to the distribution of the local median.

Since the $\underline{CRR}$-distribution for laminated deposits is based on a regional data set, i.e. samples taken at various locations, a value of ω of 0.75 is proposed here. This value in line with Dutch engineering practice for dealing with regional data sets in slope stability assessments (e.g. TAW 1989: page 90; TAW 2001: page 254), see also Calle (2007; 2008) for a statistical basis/interpretation.

The distributions of the point values and the local medians of the cyclic resistance ratio of a laminated deposit are given in Table 12. These distributions are shown in Figure 38.

Table 12. Distributions of cyclic resistance ratios for laminated deposits. Both distributions rest on a regional data set.

Variable	Symbol	Distribution type	Parameter values
Point value of CRR (unsuitable for use in a uniform model)	$\underline{CRR}$	Lognormal	$\mu_{ln(\underline{CRR})} = -1.4$ $\sigma_{ln(\underline{CRR})} = 0.2$
Local average of CRR	CRR	Lognormal	$\mu_{ln(CRR)} = -1.39$ $\sigma_{ln(CRR)} = 0.1$

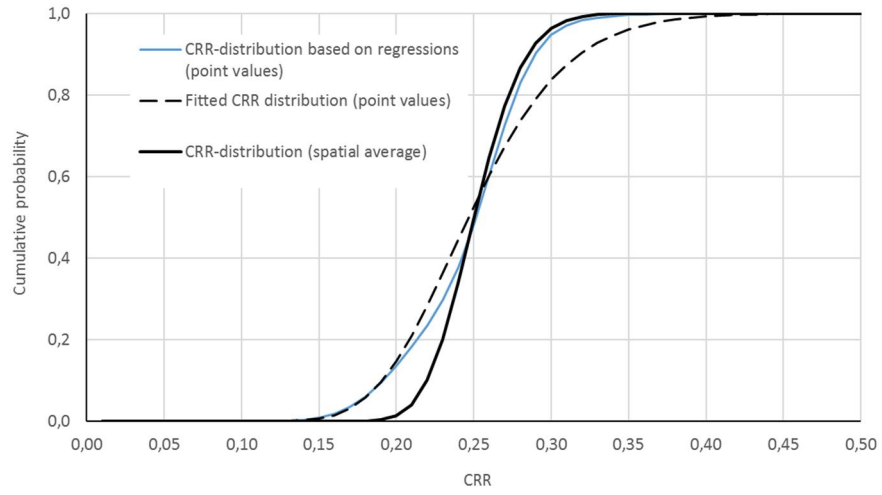


Figure 38. Cyclic resistance ratio for laminated deposits.

Recommended $CRR_{M=7.5}$-distribution for sand deposits for use in a uniform model

The distribution of point values of q_{c1Ncs} for any given layer rests a local CPT data, i.e. a local data set. Within a local data set, regional variations are small. This implies $\omega \approx 1$ in equation (35) (see also TAW 1989, TAW 2001). Based on the results of the sensitivity analyses and the case study by Boulanger & Montgomery (2016) (that all essentially rest on the assumption $\omega=1$), the use of the median of q_{c1Ncs} from the local data set is recommended (not the mean; the median could be about 10% smaller). This means that the distribution of $CRR_{M=7.5}$ for sand deposits for use in a uniform model follows directly from the median of local q_{c1Ncs}-values and the probabilistic relationship between the cyclic resistance ratio and q_{c1Ncs} of Boulanger and Idriss (2014).

The distributions of the point values and the local medians of the cyclic resistance ratio of a sand deposit are given in Table 13. These distributions are shown in Figure 39.

Table 13. Distributions of cyclic resistance ratios for sand deposits.

Stochastic variable	Symbol	Distribution type	Parameter values
Point value of CRR in the local data set (unsuitable for use in a uniform model)	$\underline{CRR}$	Lognormal	$\mu_{ln(\underline{CRR})} = -1.88$ $\sigma_{ln(\underline{CRR})} = 0.22$
Local median of CRR	CRR	Lognormal	$\mu_{ln(CRR)} = -1.88$ $\sigma_{ln(CRR)} = 0.20$
Point value of CRR in the regional data set (unsuitable for use in a uniform model; used in sensitivity analyses because the distribution is relatively wide)	$\underline{CRR}$	Lognormal	$\mu_{ln(\underline{CRR})} = -1.80$ $\sigma_{ln(\underline{CRR})} = 0.30$

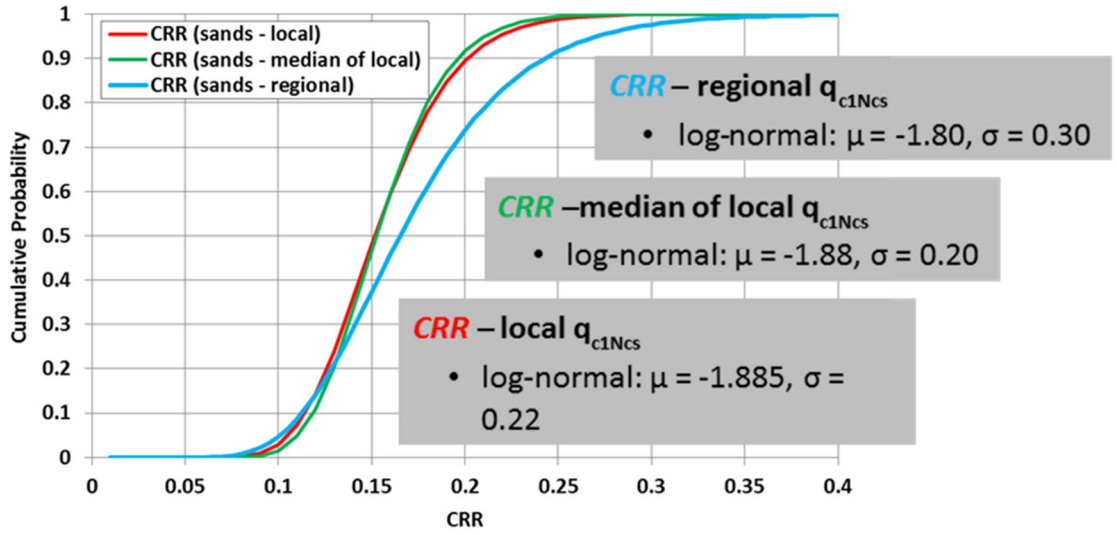


Figure 39. Cyclic resistance ratio for sand deposits.

The left-hand tail of the distribution for point values of q_{c1Ncs} is largely determined by the uncertainty in the Boulanger & Idriss (2014)-relationship, as shown by the FORM influence coefficients (Figure 40). This explains why the left-hand tails of the distributions for point values and the median of q_{c1Ncs} are rather similar. This means that the assumption of $\omega \approx 1$ in equation (35) hardy influences the results of FORM-analyses and semi-probabilistic assessments.

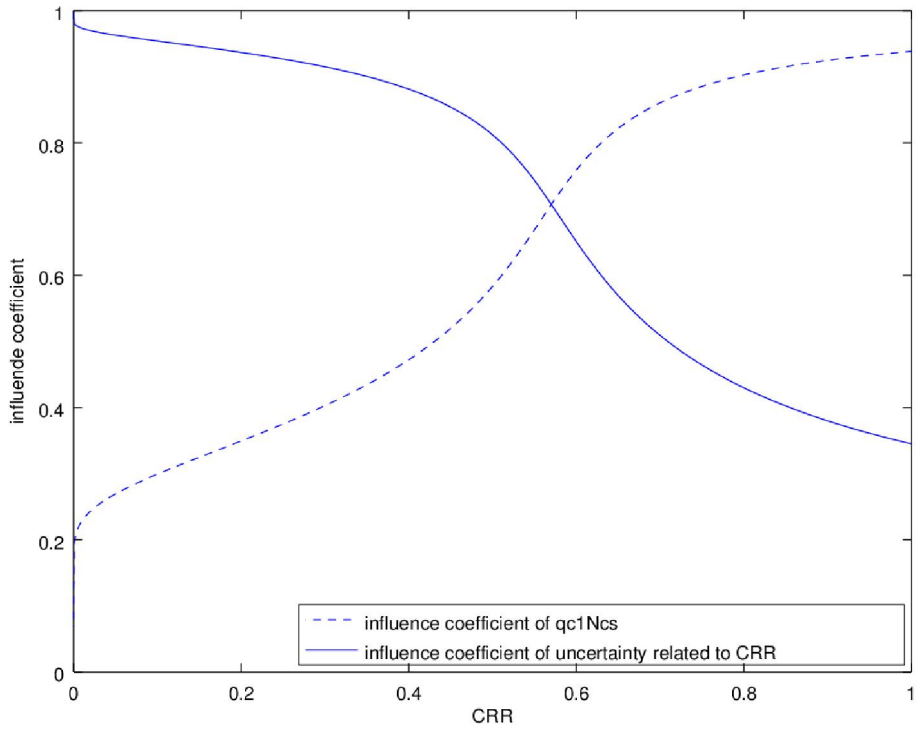


Figure 40. FORM-influence coefficients for the convolution of local point values of q_{c1Ncs} and the uncertainty in the Boulanger & Idriss (2014) relationship.

Appendix H Uncertainty related to motions

Computed displacements depend on the selected ground motion (spectrally matched to the target design spectrum). This is because matched motions have different characteristics such as duration and velocity pulses. This uncertainty cannot easily be modelled by continuous stochastic variables. This can be dealt with in a simpler manner by conditioning computed deformations and failure probabilities on motions, and to consider the subjective probabilities ("degrees of belief") associated with each motion. This is discussed below.

Theory
Consider a set of i=1..n motions that spans all possible motions. Probabilities of failure could be calculated for each given motion. The probability of failure then equals:

$$P(F) = \sum P(F|M_i) \cdot P(M_i) \quad (36)$$

Where:
P(F) Probability of failure (per year)
$P(F|M_i)$ Probability of failure given motion i (per year), i=1..n. A motion is thought of here as a "basic" time series that can be scaled to whatever spectral acceleration. This, however, is an oversimplification. When motions are matched to a particular spectrum, their durations are held constant, even though motions should have shorter durations for higher accelerations in the Groningen area. This is an important reason why the selection of "basic" motions should depend on the target design spectrum. This issue is discussed at the end of this section.
$P(M_i)$ Probability of motion i (-). Note that $\sum P(M_i)=1$. The motions M_i are mutually exclusive, collectively exhaustive.

In a probabilistic assessment, the failure probabilities for the different motions could be obtained from e.g. MC or FORM-analyses. These could then be combined with the probabilities assigned to each motion into a probability of failure, P(F). This failure probability could then be compared to the target failure probability, P_T.

In a semi-probabilistic assessment, the following procedure could be followed (in line with the procedure described in ENW 2012), i.e.:

1. For each motion:
    a. Vary the target reliability index (or target failure probability) and compute the associated design values, using a functional relationship between reliability indices and design values (see equation (3))
    b. Select the target reliability index for which a calculation with the design values from step 1a just leads to the critical crest settlement (limit state function equal to zero).
    c. Calculate the probability of failure associated with the reliability index from step 1b.
    d. Multiply the probability of failure from step c with the probability of the motion under consideration.
2. Take the sum of the results from step 1. This is an estimate of the probability of failure (see equation (36)).
3. Compare the estimate of the probability of failure from step 2 to the target failure probability.

The procedure described above is theoretically correct but impractical since it involves a large number of evaluations of the limit state function.

Pragmatic way forward
The number of evaluations could be strongly reduced if we were able to identify a motion M_d for which the following holds:

$$P(F) \leq P(F|M_d) \quad (37)$$

Obviously, taking the most conservative motion ($M_d = M_n$), would certainly satisfy the condition given by equation (37). This, however, would also be highly conservative.

To be able to define the design motion in probabilistic terms, we could order the motions on the basis of their conditional failure probabilities, with motion 1 having the smallest failure probability and motion n the highest, i.e.

$$P(F|M_i) \leq P(F|M_w) \qquad \text{with} \qquad i < w \tag{38}$$

The following procedure is suggested for dealing with the uncertainty related to motions:

1. Select independent motions with appropriate seismological characteristics, including duration.
2. Compute crest settlements for each motion (semi-probabilistically). This is an important step because it is difficult to predetermine which motion gives the greatest deformation.
3. Analyze the results: outliers should be understood.
4. A slightly conservative motion should be treated as representative, which could be interpreted as a motion an "exceedance probability" of 20% (see below).
   Note that it might be incorrect to treat the motions being considered as equally likely or to assume that the 11 selected motions span the entire set of possible motions. In some cases, it might be reasonable to assign low subjective probabilities to particular motions or to treat the set of motions as a subset of relatively pessimistic scenarios. This means that M_d need not be a conservative motion within the set of motions being considered.

Even when the differences between the failure probabilities for different motions are substantial, a motion with an "exceedance probability" in of 20% is still likely to be sufficiently conservative, even when the failure probabilities per motion differ substantially. To illustrate this, consider the following purely hypothetical examples.

Case 1
Consider 4 equally probable motions, each with a different (conditional) failure probability. The "overall" failure probability equals $1{,}875 \cdot P_0$ (Table 14). This is smaller than $P(F|M_3)$, which implies that motion 3 could be used as a basis for a simplified assessment. This is a motion with a cumulative probability of 75%, or an "exceedance probability" of 25%.

Table 14. Hypothetical case 1: four equally likely motions with associated failure probabilities that differ up to a factor 8.

Motion	$P(M_i)$	Cumulative probability	$P(F\|M_i)$	$P(M_i) \cdot P(F\|M_i)$
1	1/4	1/4	$1/2 \cdot P_0$	$1/8 \cdot P_0$
2	1/4	2/4	P_0	$1/4 \cdot P_0$
3	1/4	3/4	$\mathbf{2 \cdot P_0}$	$1/2 \cdot P_0$
4	1/4	1	$4 \cdot P_0$	P_0
Sum	1	-	-	$\mathbf{1{,}875 \cdot P_0}$

Case 2
Consider 11 equally probable motions, with (conditional) failure probabilities that increase exponentially. The smallest and highest failure probabilities differ by a factor 100. The "overall" failure probability equals $24{,}48 \cdot P_0$ (see Table 15). Here, the "design motion" has a cumulative probability of 8/11, or an "exceedance probability" of 27%.

Table 15. Hypothetical case 2: four equally likely motions with associated failure probabilities that differ up to a factor 100.

Motion	$P(M_i)$	Cumulative probability	$P(F\|M_i)$	$P(M_i) \cdot P(F\|M_i)$
1	1/11	1/11	$1{,}00 \cdot P_0$	$0{,}09 \cdot P_0$
2	1/11	2/11	$1{,}58 \cdot P_0$	$0{,}14 \cdot P_0$
3	1/11	3/11	$2{,}51 \cdot P_0$	$0{,}23 \cdot P_0$
4	1/11	4/11	$3{,}98 \cdot P_0$	$0{,}36 \cdot P_0$
5	1/11	5/11	$6{,}31 \cdot P_0$	$0{,}57 \cdot P_0$
6	1/11	6/11	$10{,}00 \cdot P_0$	$0{,}91 \cdot P_0$

7	1/11	7/11	15,85 · P_0	1,44 · P_0
8	1/11	8/11	**25,12** · P_0	2,28 · P_0
9	1/11	9/11	39,81 · P_0	3,62 · P_0
10	1/11	10/11	63,10 · P_0	5,74 · P_0
11	1/11	1	100,00 · P_0	9,09 · P_0
Sum				**24,48 · P_0**

The use of motions with a fixed duration in FORM-analyses

The same (scaled) motion (motion 4) has been used in the FORM-analyses. For the relatively low exceedance probability of the design point value of the spectral acceleration, a motion with a shorter duration than the duration of motion 4 would have been appropriate (e.g. 1.5 seconds rather than 4.2 seconds). The fact that duration has not been adjusted has led to overestimation of the probability of failure (conservatism). This, however, is largely irrelevant for our purposes. More important is that it has also led to overestimation of the relative importance of the uncertainty related to the spectral acceleration of the model base, i.e. overestimation of $\alpha_{SAmodel_base}^2$ (and underestimation of the squared other influence coefficients). This is because it has "fattened the tail of the load distribution". When deciding on design values, this has to be kept in mind.

Figure 41 plots significant duration (D5-75) and cumulative absolute velocity (CAV) estimates of the 11 motions used for the design basis case for Eemshaven section presented in the LPI-screening report (Deltares 2017) versus post-seismic crest settlements. The estimated significant duration for a 3057-year return period event using Bommer et al. (2015) empirical correlation for Groningen is 3.8 seconds. For the FORM analysis, motion 4 was considered representative of the entire suite of 11 motions. Motion 6 was considered in a sensitivity analysis.

Figure 42 plots significant duration (D5-75) and cumulative absolute velocity (CAV) estimates of the 11 motions used for the design basis case for Delfzijl section presented in the LPI-screening report (Deltares 2017) versus post-seismic crest settlements. The estimated significant duration for a 6537-year return period event using Bommer et al (2015) empirical correlation for Groningen is 3.6 seconds. For the FORM analysis, motion 4 was considered representative of the entire suite of 11 motions. Motion 6 was considered in a sensitivity analysis.

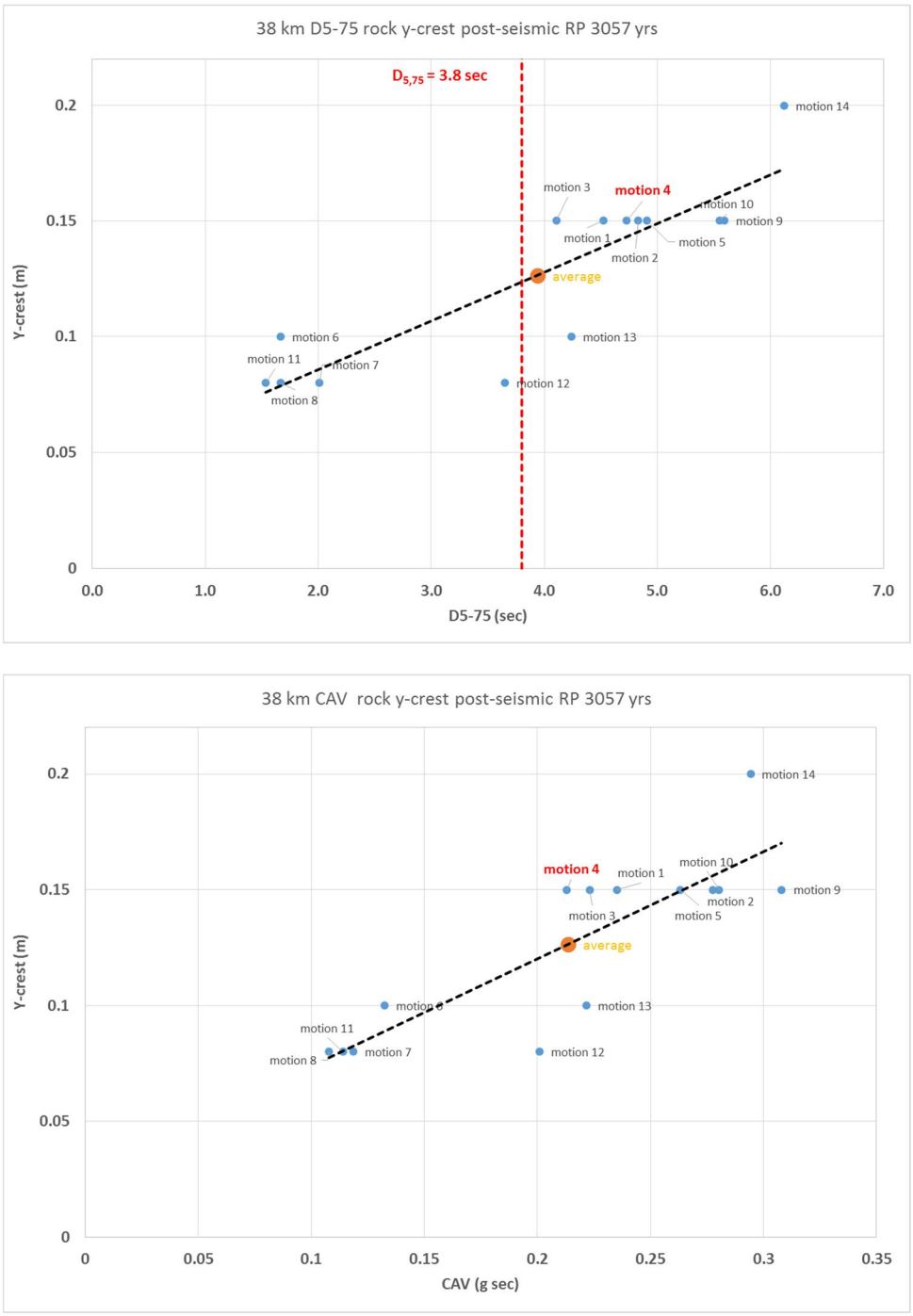


Figure 41. Range of crest settlements versus significant duration (upper illustration) and cumulative absolute velocity (lower illustration) from 14 different ground motions for Eemshaven Design Basis Case (Deltares 2017).

Figure 42. Range of crest settlements versus significant duration (upper illustration) and cumulative absolute velocity (lower illustration) from 14 different ground motions for Delfzijl Design Basis Case (Deltares 2017).

Appendix I Results of FORM-analyses for the 2D finite elements model

An overview of the results of the FORM-analyses are in the tables below. Prior to the FORM-iterations shown in these tables, at least 15 iterations were carried out.

Table 16. Results of FORM-analyses for Eemshaven profile using the median of local q_{c1Ncs} data [Base case A : Su/p' according to Kramer & Wang (2015); ground motion 4]

No.	Sa [g] ($=e^{x1}$)	CRR [-] ($=e^{x2}$)	εSu/p' [-] ($=e^{x3}$)	m [-] ($=e^{x4}$)	Z [m]	$\partial Z/\partial x_1$	$\partial Z/\partial x_2$	$\partial Z/\partial x_3$	$\partial Z/\partial x_4$	μ_Z	σ_Z	Beta	α_{x1}^2	α_{x2}^2	α_{x3}^2	α_{x4}^2	x_{1d}	x_{2d}	x_{3d}	x_{4d}
0	0.450	0.100	0.700	2.000	0.148	-5.310	10.677	3.540	-2.999	30.630	6.120	5.005	0.738	0.122	0.068	0.073	-0.794	-2.224	-0.586	0.742
1	0.450	0.102	0.669	2.020	0.137	-5.418	11.790	3.153	-3.011	31.418	6.252	5.025	0.736	0.142	0.052	0.070	-0.782	-2.254	-0.513	0.732
2	0.452	0.102	0.654	2.032	0.114	-5.484	12.409	3.016	-3.035	31.914	6.345	5.030	0.732	0.153	0.046	0.069	-0.790	-2.268	-0.484	0.728
3	0.452	0.102	0.646	2.039	0.093	-5.543	12.717	2.958	-3.057	32.280	6.417	5.030	0.731	0.157	0.043	0.069	-0.792	-2.274	-0.470	0.725
4	0.452	0.103	0.642	2.044	0.075	-5.589	12.885	2.934	-3.076	32.547	6.470	5.031	0.731	0.159	0.042	0.068	-0.791	-2.276	-0.462	0.724
5	0.453	0.103	0.640	2.048	0.061	-5.623	12.987	2.927	-3.091	32.743	6.508	5.031	0.732	0.159	0.041	0.068	-0.790	-2.277	-0.458	0.723
6	0.453	0.103	0.638	2.050	0.049	-5.649	13.056	2.927	-3.103	32.889	6.537	5.031	0.732	0.160	0.041	0.068	-0.790	-2.277	-0.456	0.722
7	0.453	0.103	0.637	2.052	0.040	-5.668	13.105	2.930	-3.113	33.000	6.560	5.031	0.732	0.160	0.040	0.068	-0.789	-2.277	-0.455	0.722
8	0.453	0.103	0.637	2.053	0.032	-5.683	13.142	2.934	-3.121	33.087	6.577	5.031	0.732	0.160	0.040	0.068	-0.789	-2.277	-0.454	0.722
9	0.453	0.103	0.636	2.055	0.026	-5.695	13.171	2.938	-3.128	33.155	6.590	5.031	0.732	0.160	0.040	0.068	-0.789	-2.277	-0.454	0.722
10	0.454	0.103	0.636	2.055	0.021	-5.704	13.193	2.941	-3.133	33.210	6.601	5.031	0.732	0.160	0.040	0.068	-0.789	-2.277	-0.454	0.722
11	0.454	0.103	0.636	2.056	0.017	-5.712	13.210	2.945	-3.137	33.253	6.610	5.031	0.732	0.160	0.040	0.068	-0.789	-2.277	-0.454	0.722
12	0.454	0.103	0.636	2.057	0.014	-5.718	13.224	2.947	-3.140	33.288	6.616	5.031	0.732	0.160	0.040	0.068	-0.789	-2.277	-0.454	0.722
13	0.454	0.103	0.636	2.057	0.011	-5.722	13.235	2.950	-3.143	33.316	6.622	5.031	0.732	0.160	0.040	0.068	-0.789	-2.277	-0.454	0.722

The design point has been verified using the FEM analysis. The final step of FORM analysis based on the response space results to a crest settlement of 1.45 m, the calculated crest settlement from FEM analysis is 1.50 m. A final FORM iteration using numerical analyses leads to similar influence factors (α_i^2), as shown in the table below.

No.	Sa [g] ($=e^{x1}$)	CRR [-] ($=e^{x2}$)	εSu/p' [-] ($=e^{x3}$)	m [-] ($=e^{x4}$)	Z [m]	$\partial Z/\partial x_1$	$\partial Z/\partial x_2$	$\partial Z/\partial x_3$	$\partial Z/\partial x_4$	α_{x1}^2	α_{x2}^2	α_{x3}^2	α_{x4}^2
final	0.454	0.103	0.636	2.057	-0.085	-6.171	13.371	3.085	-3.245	0.753	0.144	0.039	0.064

Table 17. Results of FORM-analyses for the Delfzijl profile with spatial averaging [Base case B : Su/p' according to Kramer and Wang (2015); ground motion 4]

No.	Sa [g] ($=e^{x1}$)	CRR [-] ($=e^{x2}$)	εSu/p' [-] ($=e^{x3}$)	m [-] ($=e^{x4}$)	Z [m]	$\partial Z/\partial x_1$	$\partial Z/\partial x_2$	$\partial Z/\partial x_3$	$\partial Z/\partial x_4$	μ_Z	σ_Z	Beta	α_{x1}^2	α_{x2}^2	α_{x3}^2	α_{x4}^2	x_{1d}	x_{2d}	x_{3d}	x_{4d}
0	1.100	0.220	0.700	3.000	-0.016	-4.160	9.747	1.325	-3.171	24.766	4.505	5.497	0.786	0.047	0.018	0.150	0.058	-1.509	-0.327	1.171
1	1.092	0.220	0.704	3.044	-0.012	-4.157	9.708	1.331	-3.168	24.748	4.502	5.497	0.786	0.047	0.018	0.150	0.059	-1.509	-0.329	1.170
2	1.086	0.220	0.707	3.079	-0.010	-4.155	9.680	1.336	-3.165	24.732	4.499	5.497	0.786	0.046	0.018	0.150	0.059	-1.508	-0.330	1.170
3	1.081	0.221	0.709	3.107	-0.008	-4.152	9.660	1.338	-3.163	24.716	4.496	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.059	-1.508	-0.331	1.170
4	1.077	0.221	0.711	3.129	-0.006	-4.150	9.645	1.340	-3.161	24.703	4.493	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.060	-1.508	-0.332	1.170
5	1.074	0.221	0.712	3.148	-0.005	-4.148	9.635	1.342	-3.160	24.692	4.491	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.060	-1.508	-0.333	1.170
6	1.071	0.221	0.713	3.162	-0.004	-4.147	9.627	1.342	-3.159	24.682	4.490	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.060	-1.508	-0.333	1.170
7	1.069	0.221	0.714	3.174	-0.003	-4.145	9.621	1.343	-3.158	24.675	4.488	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.060	-1.508	-0.333	1.170
8	1.068	0.221	0.715	3.184	-0.002	-4.144	9.617	1.343	-3.157	24.668	4.487	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.059	-1.508	-0.333	1.170
9	1.066	0.221	0.715	3.192	-0.002	-4.143	9.613	1.343	-3.157	24.663	4.486	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.059	-1.508	-0.333	1.170
10	1.065	0.221	0.715	3.198	-0.001	-4.143	9.611	1.343	-3.156	24.659	4.485	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.059	-1.508	-0.333	1.170
11	1.065	0.221	0.716	3.203	-0.001	-4.142	9.609	1.344	-3.156	24.656	4.485	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.059	-1.508	-0.334	1.170
12	1.064	0.221	0.716	3.207	-0.001	-4.142	9.607	1.344	-3.156	24.654	4.484	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.059	-1.508	-0.334	1.170
13	1.063	0.221	0.716	3.210	-0.001	-4.141	9.606	1.344	-3.156	24.652	4.484	5.498	0.786	0.046	0.018	0.150	0.059	-1.508	-0.334	1.170

The design point has been verified using the FEM analysis. The final step of FORM analysis based on the response space results to a crest settlement of 0.98 m, the calculated crest settlement from FEM analysis is 0.95 m. A final FORM iteration using numerical analyses leads to similar influence factors (α_i^2), as shown in the table below.

No.	Sa [g] ($=e^{x1}$)	CRR [-] ($=e^{x2}$)	εSu/p' [-] ($=e^{x3}$)	m [-] ($=e^{x4}$)	Z [m]	$\partial Z/\partial x_1$	$\partial Z/\partial x_2$	$\partial Z/\partial x_3$	$\partial Z/\partial x_4$	α_{x1}^2	α_{x2}^2	α_{x3}^2	α_{x4}^2
final	1.060	0.220	0.720	3.210	-0.049	-3.852	9.630	1.605	-3.207	0.750	0.051	0.029	0.171

Table 18. Results of FORM-analyses for the Eemshaven profile using the median of local q_{c1Ncs} data [Sensitivity case 1 : Su/p' according to Kramer & Wang (2015); motion 6]

No.	Sa [g] ($=e^{x1}$)	CRR [-] ($=e^{x2}$)	εSu/p' [-] ($=e^{x3}$)	m [-] ($=e^{x4}$)	Z [m]	$\partial Z/\partial x_1$	$\partial Z/\partial x_2$	$\partial Z/\partial x_3$	$\partial Z/\partial x_4$	μ_Z	σ_Z	Beta	α_{x1}^2	α_{x2}^2	α_{x3}^2	α_{x4}^2	x_{1d}	x_{2d}	x_{3d}	x_{4d}
0	0.634	0.104	0.663	2.071	0.054	-6.616	13.604	3.001	-3.098	39.162	7.418	5.279	0.780	0.135	0.033	0.053	-0.435	-2.267	-0.432	0.667
1	0.636	0.104	0.662	2.058	0.050	-6.623	13.620	3.002	-3.103	39.203	7.426	5.279	0.780	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.432	0.667
2	0.637	0.104	0.660	2.047	0.046	-6.629	13.634	3.003	-3.107	39.240	7.433	5.279	0.780	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.432	0.668
3	0.638	0.104	0.659	2.037	0.042	-6.634	13.647	3.004	-3.111	39.274	7.439	5.279	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.432	0.668
4	0.639	0.104	0.658	2.028	0.038	-6.639	13.658	3.004	-3.115	39.304	7.445	5.280	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.431	0.668
5	0.639	0.104	0.657	2.020	0.035	-6.643	13.668	3.006	-3.118	39.332	7.450	5.280	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.431	0.668
6	0.640	0.104	0.657	2.013	0.032	-6.647	13.676	3.007	-3.121	39.357	7.454	5.280	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.431	0.669
7	0.641	0.104	0.656	2.007	0.029	-6.651	13.684	3.008	-3.124	39.380	7.459	5.280	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.431	0.669
8	0.641	0.104	0.655	2.001	0.027	-6.655	13.692	3.009	-3.127	39.402	7.463	5.280	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.431	0.669
9	0.642	0.104	0.655	1.996	0.025	-6.658	13.698	3.010	-3.129	39.421	7.466	5.280	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.431	0.669
10	0.642	0.104	0.654	1.992	0.023	-6.661	13.704	3.011	-3.131	39.439	7.470	5.280	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.431	0.670
11	0.643	0.104	0.654	1.988	0.021	-6.663	13.710	3.011	-3.133	39.456	7.473	5.280	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.431	0.670
12	0.643	0.104	0.653	1.985	0.019	-6.666	13.715	3.012	-3.135	39.471	7.476	5.280	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.431	0.670
13	0.644	0.104	0.653	1.982	0.017	-6.668	13.720	3.013	-3.137	39.485	7.478	5.280	0.779	0.135	0.033	0.053	-0.436	-2.267	-0.431	0.670

The design point has been verified using the FEM analysis. The final step of FORM analysis based on the response space results to a crest settlement of 1.51 m, the calculated crest settlement from FEM analysis is 1.52 m.

Table 19. Results of FORM-analyses for the Delfzijl profile with spatial averaging [Sensitivity case 2 : Su/p' according to Kramer and Wang (2015); ground motion 6]

No.	Sa [g] ($=e^{x1}$)	CRR [-] ($=e^{x2}$)	εSu/p' [-] ($=e^{x3}$)	m [-] ($=e^{x4}$)	Z [m]	$\partial Z/\partial x_1$	$\partial Z/\partial x_2$	$\partial Z/\partial x_3$	$\partial Z/\partial x_4$	μ_Z	σ_Z	Beta	α_{x1}^2	α_{x2}^2	α_{x3}^2	α_{x4}^2	x_{1d}	x_{2d}	x_{3d}	x_{4d}
0	1.000	0.214	0.536	1.904	-0.181	-8.018	22.520	4.885	-3.346	45.268	8.517	5.315	0.817	0.070	0.067	0.047	-0.008	-1.541	-0.617	0.632
1	0.999	0.214	0.537	1.900	-0.147	-7.942	22.322	4.836	-3.310	44.835	8.436	5.315	0.817	0.070	0.067	0.047	-0.009	-1.541	-0.617	0.631
2	0.997	0.214	0.537	1.895	-0.119	-7.880	22.157	4.797	-3.280	44.482	8.370	5.315	0.817	0.070	0.067	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.630
3	0.996	0.214	0.538	1.892	-0.097	-7.830	22.021	4.766	-3.257	44.195	8.316	5.314	0.817	0.070	0.067	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.630
4	0.995	0.214	0.538	1.889	-0.078	-7.789	21.909	4.741	-3.237	43.961	8.273	5.314	0.817	0.070	0.066	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.629
5	0.994	0.214	0.538	1.886	-0.063	-7.756	21.817	4.720	-3.222	43.771	8.237	5.314	0.817	0.070	0.066	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.629
6	0.994	0.214	0.539	1.884	-0.051	-7.729	21.741	4.704	-3.209	43.617	8.208	5.314	0.817	0.070	0.066	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.628
7	0.993	0.214	0.539	1.882	-0.042	-7.707	21.680	4.690	-3.199	43.491	8.185	5.314	0.817	0.070	0.066	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.628
8	0.993	0.214	0.539	1.881	-0.034	-7.689	21.630	4.679	-3.191	43.389	8.166	5.314	0.817	0.070	0.066	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.628
9	0.993	0.214	0.539	1.879	-0.027	-7.674	21.590	4.670	-3.184	43.307	8.150	5.314	0.817	0.070	0.066	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.628
10	0.992	0.214	0.539	1.878	-0.022	-7.663	21.557	4.663	-3.178	43.239	8.137	5.314	0.817	0.070	0.066	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.628
11	0.992	0.214	0.539	1.877	-0.018	-7.653	21.530	4.657	-3.174	43.185	8.127	5.314	0.817	0.070	0.067	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.628
12	0.992	0.214	0.539	1.876	-0.015	-7.645	21.508	4.653	-3.170	43.141	8.119	5.314	0.817	0.070	0.067	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.628
13	0.992	0.214	0.540	1.876	-0.012	-7.639	21.490	4.649	-3.167	43.105	8.112	5.314	0.817	0.070	0.067	0.046	-0.009	-1.541	-0.617	0.628

The design point has been verified using the FEM analysis. The final step of FORM analysis based on the response space results to a crest settlement of 1.60 m, the calculated crest settlement from FEM analysis is 1.70 m.

Table 20. Results of FORM-analyses for the Eemshaven profile without spatial averaging [Sensitivity case 3 : Su/p' according to Idriss and Boulanger 2008; ground motion 4]

No.	Sa [g] ($=e^{x1}$)	CRR [-] ($=e^{x2}$)	εSu/p' [-] ($=e^{x3}$)	m [-] ($=e^{x4}$)	Z [m]	$\partial Z/\partial x_1$	$\partial Z/\partial x_2$	$\partial Z/\partial x_3$	$\partial Z/\partial x_4$	μ_Z	σ_Z	Beta	α_{x1}^2	α_{x2}^2	α_{x3}^2	α_{x4}^2	x_{1d}	x_{2d}	x_{3d}	x_{4d}
0	0.500	0.100	0.900	2.000	-0.198	-7.376	9.128	7.361	-3.363	39.631	8.091	4.898	0.815	0.115	0.019	0.052	-0.673	-2.297	-0.100	0.616
1	0.502	0.100	0.901	1.969	-0.160	-7.267	9.024	7.284	-3.324	39.067	7.976	4.898	0.814	0.115	0.019	0.053	-0.676	-2.299	-0.101	0.617
2	0.503	0.100	0.902	1.946	-0.130	-7.182	8.936	7.222	-3.292	38.625	7.886	4.898	0.813	0.116	0.019	0.053	-0.678	-2.299	-0.101	0.618
3	0.504	0.100	0.902	1.927	-0.105	-7.116	8.863	7.172	-3.266	38.276	7.816	4.897	0.813	0.116	0.019	0.053	-0.680	-2.300	-0.101	0.619
4	0.505	0.100	0.902	1.913	-0.085	-7.064	8.803	7.131	-3.245	38.001	7.760	4.897	0.812	0.116	0.019	0.053	-0.681	-2.300	-0.101	0.619
5	0.505	0.100	0.903	1.902	-0.069	-7.023	8.755	7.098	-3.228	37.782	7.715	4.897	0.812	0.116	0.019	0.053	-0.681	-2.300	-0.101	0.620
6	0.505	0.100	0.903	1.893	-0.056	-6.991	8.716	7.071	-3.214	37.608	7.680	4.897	0.812	0.116	0.019	0.053	-0.681	-2.300	-0.101	0.620
7	0.505	0.100	0.903	1.886	-0.045	-6.965	8.685	7.049	-3.203	37.469	7.652	4.897	0.812	0.116	0.019	0.053	-0.682	-2.300	-0.101	0.620
8	0.505	0.100	0.903	1.881	-0.037	-6.944	8.660	7.031	-3.194	37.359	7.629	4.897	0.812	0.116	0.019	0.053	-0.682	-2.300	-0.102	0.620
9	0.505	0.100	0.903	1.876	-0.030	-6.928	8.639	7.016	-3.186	37.270	7.611	4.897	0.812	0.116	0.019	0.053	-0.682	-2.300	-0.102	0.620
10	0.506	0.100	0.903	1.873	-0.024	-6.914	8.623	7.004	-3.181	37.199	7.597	4.897	0.812	0.116	0.019	0.053	-0.682	-2.300	-0.102	0.620
11	0.506	0.100	0.903	1.870	-0.020	-6.904	8.610	6.994	-3.176	37.142	7.585	4.897	0.812	0.116	0.019	0.053	-0.682	-2.300	-0.102	0.620
12	0.506	0.100	0.903	1.868	-0.016	-6.895	8.599	6.986	-3.172	37.096	7.576	4.897	0.812	0.116	0.019	0.053	-0.682	-2.300	-0.102	0.620
13	0.506	0.100	0.903	1.866	-0.013	-6.888	8.591	6.980	-3.169	37.059	7.569	4.897	0.812	0.116	0.019	0.053	-0.682	-2.300	-0.102	0.620

The design point has been verified using the FEM analysis. The final step of FORM analysis based on the response space results to a crest settlement of 1.62 m, while the calculated crest settlement from FEM analysis is 1.60 m. A final FORM iteration using numerical analysis results concludes to similar influence factors (α_i^2) as shown in the table below.

No.	Sa [g] ($=e^{x1}$)	CRR [-] ($=e^{x2}$)	εSu/p' [-] ($=e^{x3}$)	m [-] ($=e^{x4}$)	Z [m]	$\partial Z/\partial x_1$	$\partial Z/\partial x_2$	$\partial Z/\partial x_3$	$\partial Z/\partial x_4$	α_{x1}^2	α_{x2}^2	α_{x3}^2	α_{x4}^2
final	0.506	0.100	0.900	1.870	0.008	-6.545	8.415	5.610	-3.147	0.806	0.122	0.014	0.058

Table 21. Results of FORM-analyses for the Delfzijl profile without spatial averaging [Sensitivity case 4 : Su/p' according to Idriss and Boulanger 2008; ground motion 4]

No.	Sa [g] ($=e^{x1}$)	CRR [-] ($=e^{x2}$)	εSu/p' [-] ($=e^{x3}$)	m [-] ($=e^{x4}$)	Z [m]	$\partial Z/\partial x_1$	$\partial Z/\partial x_2$	$\partial Z/\partial x_3$	$\partial Z/\partial x_4$	μ_Z	σ_Z	Beta	α_{x1}^2	α_{x2}^2	α_{x3}^2	α_{x4}^2	x_{1d}	x_{2d}	x_{3d}	x_{4d}
0	0.800	0.190	0.900	2.300	-0.145	-5.843	8.997	5.367	-3.393	31.285	6.232	5.020	0.810	0.083	0.017	0.090	-0.282	-1.690	-0.097	0.827
1	0.791	0.189	0.901	2.297	-0.127	-5.847	8.933	5.447	-3.374	31.264	6.230	5.019	0.812	0.082	0.017	0.089	-0.279	-1.688	-0.099	0.822
2	0.784	0.188	0.902	2.293	-0.110	-5.842	8.881	5.497	-3.355	31.211	6.221	5.017	0.813	0.082	0.018	0.088	-0.277	-1.687	-0.100	0.819
3	0.778	0.188	0.903	2.288	-0.094	-5.833	8.837	5.528	-3.338	31.142	6.208	5.016	0.814	0.081	0.018	0.087	-0.276	-1.686	-0.101	0.816
4	0.774	0.187	0.903	2.282	-0.079	-5.822	8.801	5.546	-3.322	31.067	6.194	5.016	0.814	0.081	0.018	0.087	-0.275	-1.685	-0.101	0.814
5	0.771	0.187	0.903	2.277	-0.067	-5.810	8.771	5.557	-3.309	30.993	6.180	5.015	0.815	0.081	0.018	0.087	-0.275	-1.685	-0.101	0.812
6	0.769	0.186	0.903	2.272	-0.056	-5.798	8.746	5.562	-3.297	30.924	6.167	5.015	0.815	0.080	0.018	0.086	-0.274	-1.684	-0.102	0.811
7	0.767	0.186	0.903	2.268	-0.047	-5.787	8.725	5.565	-3.287	30.861	6.154	5.014	0.815	0.080	0.018	0.086	-0.274	-1.684	-0.102	0.810
8	0.766	0.186	0.903	2.264	-0.039	-5.777	8.708	5.565	-3.279	30.805	6.144	5.014	0.815	0.080	0.018	0.086	-0.274	-1.684	-0.102	0.809
9	0.765	0.186	0.903	2.261	-0.032	-5.769	8.694	5.565	-3.272	30.756	6.134	5.014	0.815	0.080	0.019	0.086	-0.274	-1.684	-0.102	0.809
10	0.764	0.186	0.903	2.258	-0.027	-5.761	8.683	5.564	-3.266	30.714	6.126	5.014	0.815	0.080	0.019	0.086	-0.274	-1.684	-0.102	0.809
11	0.763	0.186	0.903	2.255	-0.022	-5.755	8.674	5.562	-3.261	30.678	6.119	5.014	0.815	0.080	0.019	0.086	-0.275	-1.684	-0.103	0.808
12	0.762	0.186	0.903	2.253	-0.019	-5.749	8.666	5.561	-3.257	30.648	6.113	5.014	0.815	0.080	0.019	0.086	-0.275	-1.684	-0.103	0.808
13	0.762	0.186	0.903	2.251	-0.015	-5.744	8.660	5.560	-3.253	30.622	6.108	5.013	0.815	0.080	0.019	0.086	-0.275	-1.684	-0.103	0.808

The design point has been verified using the FEM analysis. The final step of FORM analysis based on the response space results to a crest settlement of 1.34 m, while the calculated crest settlement from FEM analysis is 1.30 m. A final FORM iteration using numerical analysis results concludes to similar influence factors (α_i^2) as shown in the table below.

No.	Sa [g] ($=e^{x1}$)	CRR [-] ($=e^{x2}$)	εSu/p' [-] ($=e^{x3}$)	m [-] ($=e^{x4}$)	Z [m]	$\partial Z/\partial x_1$	$\partial Z/\partial x_2$	$\partial Z/\partial x_3$	$\partial Z/\partial x_4$	α_{x1}^2	α_{x2}^2	α_{x3}^2	α_{x4}^2
final	0.762	0.186	0.903	2.250	0.075	-5.625	7.875	5.625	-3.076	0.828	0.070	0.020	0.081

Appendix J Sensitivity analyses on design sea water level

In Fugro (2016c) dynamic levee stability evaluations the water table level for earthquake loading (i.e. corresponding to a 1-year flood event) was used in the analyses together with the application of earthquake loading. The water level corresponding to the 1-year flood event is at El. +3.75m NAP at seaside for both Eemshaven and Delfzijl.

Since water pressure acts as a stabilizing force on the seaside levee slope, the use of the higher water levels associated with the 1-year flood event may be an unconservative assumption in terms of levee crest settlements. To address this issue, additional numerical analyses were performed assuming mean high water level (i.e. El. +1.93m NAP for both Eemshaven Delfzijl) and mean low tides water level (i.e. El. -0.7m NAP for Eemshaven and El. -1.85m NAP for Delfzijl) to evaluate its influence on dynamically induced crest settlements. The water levels are shown schematically on Figure 43.

Results of the sensitivity analyses on the water level are shown on Figure 44 for Eemshaven and Figure 45 for Delfzijl. The figures plot contours of post seismic crest settlement for the 1-year flood event (upper illustration), mean high water level (illustration in the middle) and mean low tides water level (lower illustration). As shown on these figures the crest settlements are not significantly affected for the water levels considered.

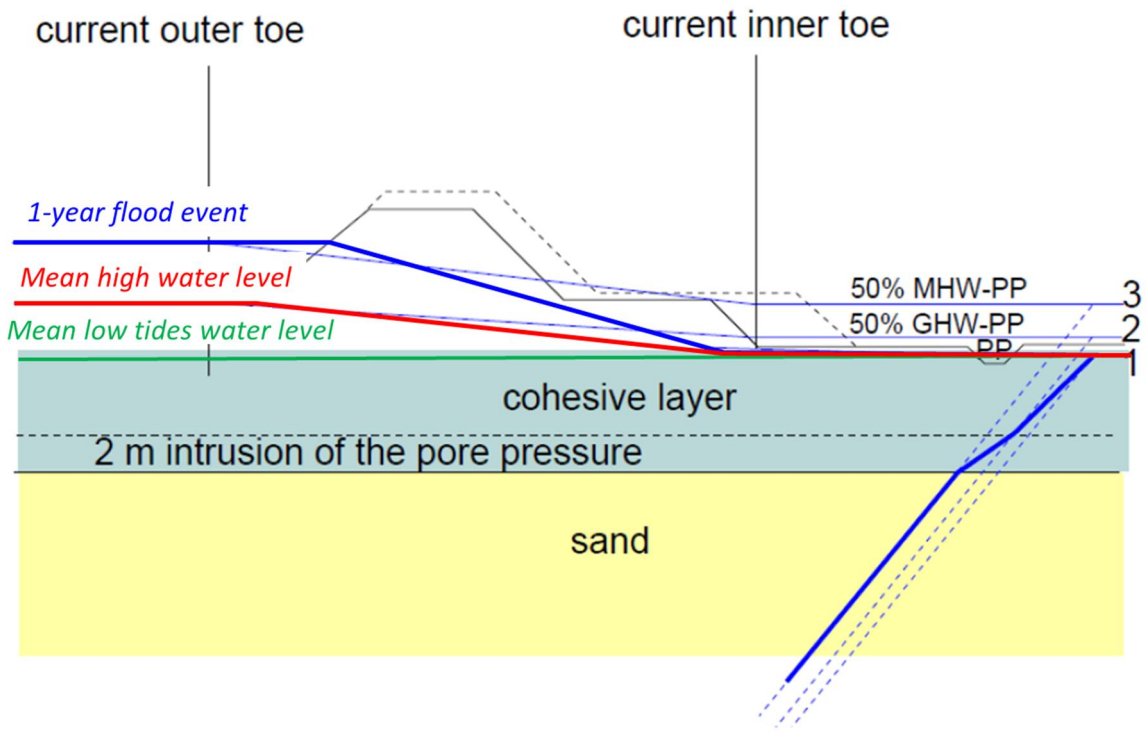


Figure 43. Schematization of 1-year flood event (blue line), mean high (red line) and mean low tides (green line) water levels.

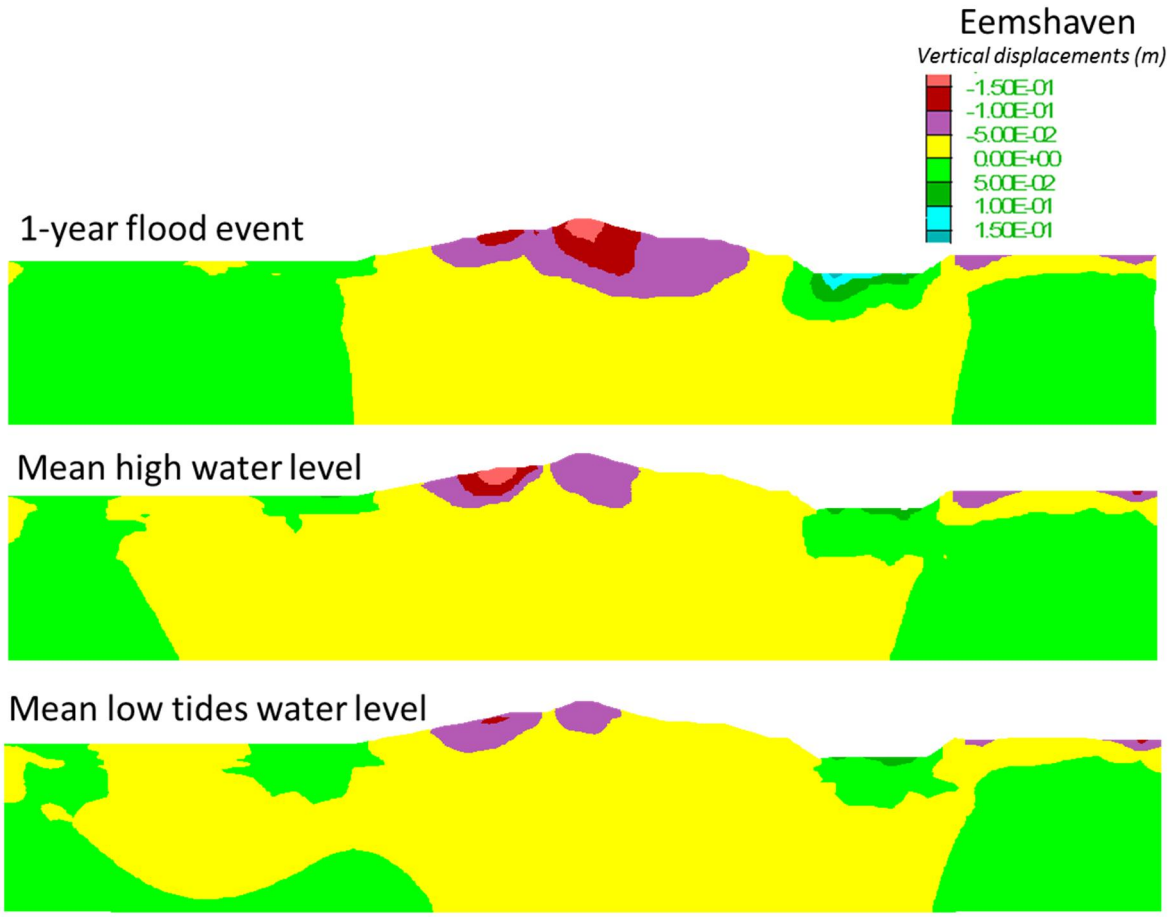


Figure 44. Contours of residual vertical displacements in Eemshaven for 1-year flood event (blue line in Figure 43), mean high (red line in Figure 43) and mean low tides (green line in Figure 43) water level conditions.

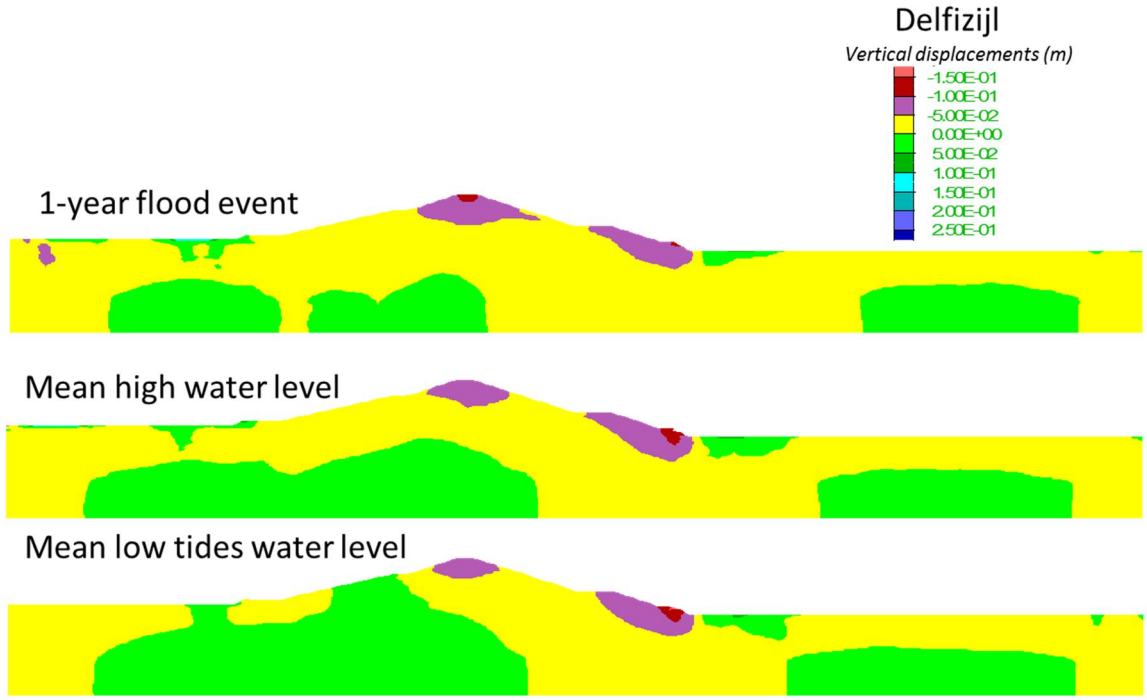


Figure 45. Contours of residual vertical displacements in Delfzijl for 1-year flood event (blue line in Figure 43), mean high (red line in Figure 43) and mean low tides (green line in Figure 43) water level conditions.