

**Aardbevingsrisico en
bodemdalingsstudie N05-A-
gasveld en omliggende
prospect**



Inhoud

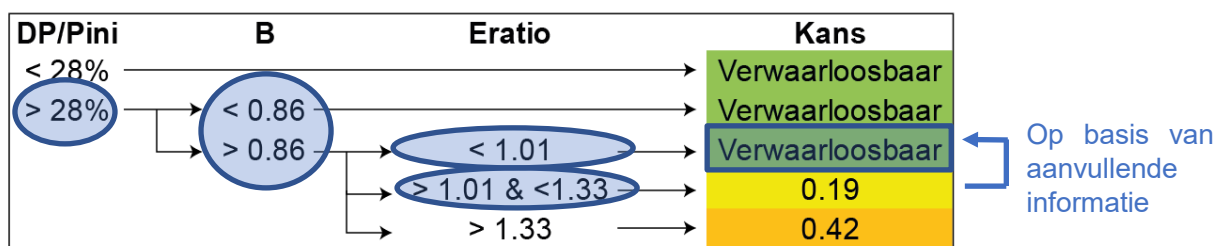
1	Managementsamenvatting	3
2	Introductie	5
2.1	Aanleiding en vraagstelling	5
2.2	Aanpak	6
2.2.1	Aardbevingsrisico	6
2.2.2	Prognose bodemdaling	8
3	Gegevens	9
3.1	Algemeen	9
3.2	Uit akoestische boorgatmetingen en routine kernanalyse	9
3.3	Uit gesteentemechanisch onderzoek	10
3.3.1	Methodiek voor bepaling van gesteentemechanische eigenschappen	10
3.3.2	Gesteentemonsters-analyse boring N05-01-S1	11
3.4	Parameters voor de analyse	12
4	Seismisch risicoanalyse	13
4.1	Inleiding	13
4.2	Breuken en stratigrafie	14
4.3	Stap 1A: Screening kans op aardbevingen	17
4.4	(i) Relatieve drukval	18
4.5	(ii) Breukdichtheid	19
4.6	(iii) Relatieve stijfheid	20
4.6.1	DHAIS	21
4.6.2	Aanvullende informatie	21
4.7	Samenvatting resultaten DHAIS stap 1A	25
4.8	Stap 1B: Bepaling potentieel maximale magnitude	26
4.8.1	Methode 1: Breukgeometrie	26
4.8.2	Methode 2: Energiebalans	27
4.9	Stap 2: screening risico	28
5	Bodemdalingsstudie	32
5.1	Inleiding	32
5.2	Eenheidsbodemdalingsom	32
5.2.1	Inleiding	32
5.2.2	De eenheidsbodemdalingsom	32
5.2.3	De invloed van de zoutlaag	33
5.3	Bodemdalingskom	34
5.3.1	Ontwikkeling in de tijd	34
5.3.2	Volume bodemdalingssom	39
5.3.3	Helling zeebodem Riffgat	40
5.3.4	Vergelijking met andere velden	40
6	Conclusies	42
7	Referenties	43
	Bijlagen	
A	Samenvattingstabellen gesteenteonderzoek	A1
B	Relatieve stijfheid berekeningen kaarten en aanvullende data	B1

1 Managementsamenvatting

Dit rapport beschrijft de inschatting van het aardbevingsrisico en de bodemdalingsprognose voor het N05-A-gasveld en omliggende prospects onder het maximale gaswinningsscenario. Dit scenario gaat uit van een maximale schatting voor depletie in alle ongeboorde prospects en het N05-A-gasveld. De aanleiding voor de studie is het voornemen van ONE-Dyas om een winningsplan in te dienen voor het gasveld N05-A.

Aardbevingsrisico

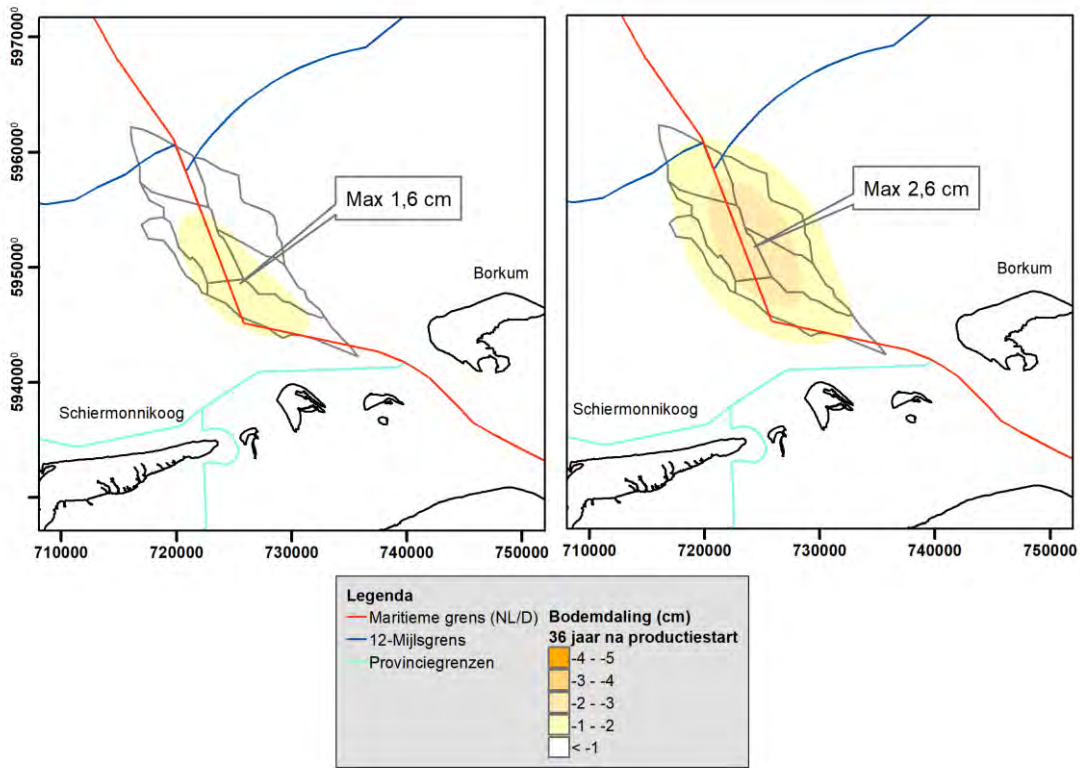
Aan de hand van de Methodiek voor Risicoanalyse over geïnduceerde bevingen door gaswinning (DHAIS, van Eijs et al., 2004; van Thienen-Visser et al., 2012; Staatstoezicht op de Mijnen, 2016) is een analyse gemaakt van de kans op een aardbeving. Deze analyse is gemaakt voor het maximale gaswinningsscenario. Uit de strikte toepassing van DHAIS blijkt dat de kans op het optreden van een aardbeving verwaarloosbaar is voor prospects N05-A, N05-A-Noord en Diamant en 19% bedraagt voor prospects Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost. Op basis van aanvullende informatie ter plaatse van nieuwe boringen aan Nederlandse zijde en bestaande boringen aan Duitse zijde van de grens, gericht op de Young's modulus van het reservoir en de overburden, blijkt echter dat de kans op het optreden van een aardbeving naar beneden bijgesteld kan worden tot verwaarloosbaar voor alle prospects. (Figuur 1.1).



Figuur 1.1 Samenvatting risicoanalyse aardbevingen.

Bodemdalingsprognose

Er is een prognose gemaakt van de bodemdaling aan het oppervlak (zeebodem) voor het depleterend veld N05-A en omliggende prospects in het maximale gaswinningsscenario aan het eind van de productie (Figuur 1.2). De bodemdaling is gemodelleerd door de daling van een aantal nucleus-reservoirs te superponeren en vervolgens te verdelen over de totale oppervlakte van het gasveld. De berekening is uitgevoerd voor een bandbreedte van compactiecoëfficiënten. Op basis van deze berekeningen bedraagt de verwachte bodemdaling bij een compactiecoëfficiënt van $0,035 \text{ GPa}^{-1}$ in het centrum van de kom 1,6 cm voor het gasveld N05-A afzonderlijk en 2,6 cm inclusief de omliggende prospects in het maximale gaswinningsscenario aan het eind van de productie.



Figuur 1.2 Bodemdaling (in cm) voor het N05-A-gasveld en omliggende prospects, tijdstip = einde productie met maximale gaswinningsscenario voor de meest waarschijnlijke compactiecoëfficiënt uit laboratoriumanalyses op gesteentemonsters van $0,035 \text{ GPa}^{-1}$. Links: verwachte bodemdaling voor N05-A afzonderlijk. Rechts: verwachte bodemdaling uitgaande dat alle prospects gasvoerend zijn en bij gelijktijdige winning uit alle prospects.

2 Introductie

2.1 Aanleiding en vraagstelling

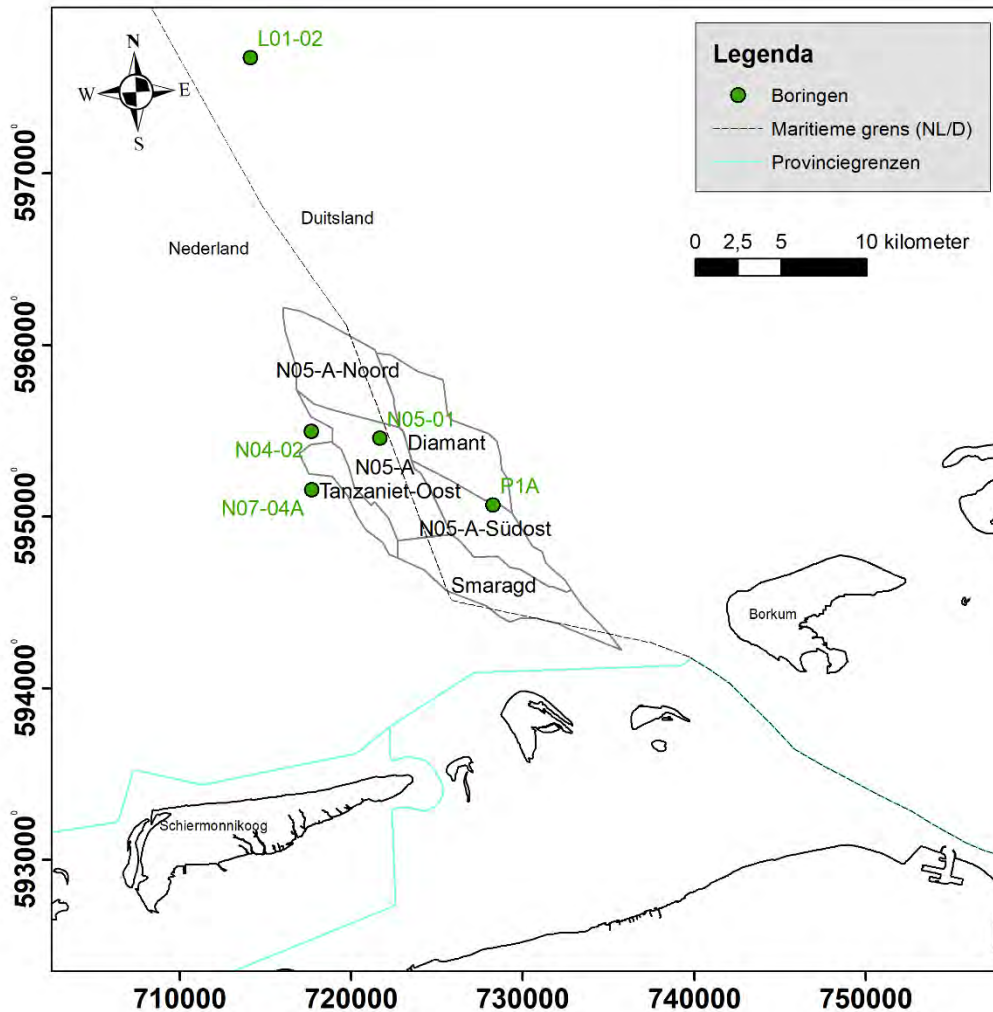
ONE-Dyas onderzoekt het N05-A-gasveld en omliggende prospects voor gaswinning (Figuur 2.1). In verband met het winningsplan is het van belang goed inzicht te hebben in de mogelijke effecten van de gaswinning op de omgeving van het gasveld en omliggende prospects. Dit rapport behandelt de screening van het aardbevingsrisico en de prognose van de bodemdaling ten gevolge van de gaswinning.

Deze studie met betrekking tot bodemdaling en bijbehorende seismische activiteit maakt gebruik van een inschatting voor het maximale gaswinningsscenario. Dit scenario is gebaseerd op de volgende aannames:

- Aanwezigheid van gas wordt verondersteld in N05-A en alle omliggende prospects die vanaf de N05-A platformlocatie kunnen worden aangeboord.
- De hoeveelheid aanwezig gas en reservoir karakteristieken in N05-A en de omliggende prospects zijn zodanig gekozen dat een maximale schatting van depletie van de voorkomens gebruikt wordt. Dit scenario heeft een lage kans van optreden. Het is waarschijnlijker dat de parameters zodanig zijn dat de actuele waarden voor bodemdaling en seismische activiteit (significant) lager zullen zijn.
- Het depletiescenario voor de studie is gemodelleerd voor een tijdsduur van 37 jaar. De technisch maximale productieperiode van de putten in het scenario is ongeveer 33 jaar, gebaseerd op een oppervlaktedruk van 10 bar aan de putmond.
- In de modellering is aangenomen dat het mogelijke reservoir in de Smaragdstructuur ten zuiden van N05-A watervoerend is en via de aquifer verbonden is met N05-A. Zo wordt in de modelleringsstudie een inschatting gemaakt van de maximaal mogelijke drukdaling in deze structuur als gevolg van gaswinning in het N05-A-gasveld. Een proefboring naar de Smaragdstructuur is niet mogelijk vanaf de voorziene platformlocatie voor ontwikkeling van het N05-A-gasveld en is derhalve geen onderdeel van dit project.

De winningsvergunning voor N04-N05-N08 is toegekend op 24 juli 2019 en heeft een looptijd van 30 jaar. Om het effect van bodemdaling zo goed mogelijk te simuleren is de gemodelleerde productieperiode langer dan de looptijd van deze winningsvergunning. De verwachte productiestop zal voor het einde van de winningsvergunning liggen.

Deltares heeft eerder studies uitgevoerd naar bodemdaling en bevingsrisico in een concessie van ONE-Dyas (de Lange & Luger, 2012; de Lange et al., 2013; de Lange & Creusen, 2017). In de huidige studie is gebruik gemaakt van dezelfde methodiek. De geofysische en geomechanische eigenschappen van de geologische eenheden zijn deels verkregen via nlog.nl (VELMOD 3.1 van TNO, 2017) en deels geleverd door de opdrachtgever.



Figuur 2.1 Locatie van het N05-A-gasveld en omliggende prospects. De waterdiepte in dit gebied varieert van 20 tot 25 m.

2.2 Aanpak

2.2.1 Aardbevingsrisico

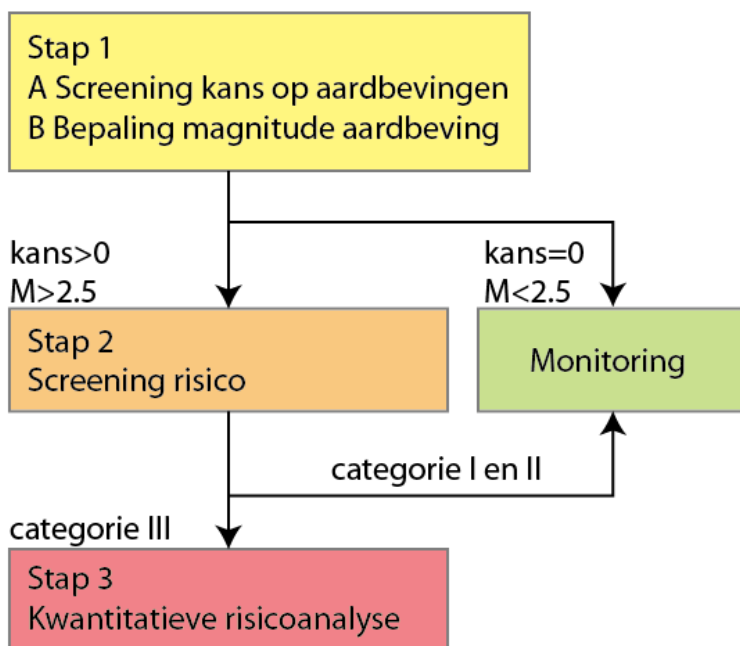
Uit de gegevens van alle producerende gasvelden in Nederland heeft TNO relaties opgesteld tussen de eigenschappen van de ondergrond, de winningsmethode en de drukveranderingen en het optreden van bevingen (van Eijs et al., 2004; van Thienen-Visser et al., 2012). De methodiek uit deze rapporten is overgenomen in de Methodiek voor risicoanalyse over geïnduceerde bevingen door gaswinning (SodM, 2016). In het onderhavige rapport wordt naar deze methodiek verwezen als DHAIS (Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit).

Een voorspelling van de effecten van aardbevingen wordt in een aantal stappen uitgevoerd. Aan de hand van bepaalde kenmerken van een olie- of gasvoorkomen wordt de kans bepaald dat zich, op enig moment gedurende de productie van een voorkomen, een beving voordoet. Dit wordt gedaan aan de hand van het schema in Tabel 2.1. Uit deze tabel is af te leiden dat eerst de relatieve drukval DP/Pini beschouwd dient te worden. Indien deze onder de

grenswaarde van 28% ligt, is de kans op een aardbeving verwaarloosbaar. Indien de relatieve drukval hoger is dan 28%, dan dient de breukdichtheid B beschouwd te worden. Afhankelijk van de waarde voor B is de analyse klaar ($B < 0,86$) en de kans op een aardbeving verwaarloosbaar, of de volgende parameter (E-ratio; relatieve stijfheid van het overliggende gesteente ten opzichte van het reservoirsteente) dient beschouwd te worden. Afhankelijk van de waarde voor de E-ratio is de kans op aardbevingen verwaarloosbaar, gelijk aan 19% of gelijk aan 42%.

Tabel 2.1 Kans op aardbeving volgens de DH AIS methode.

DP/Pini	B	Eratio	Kans
< 28%			Verwaarloosbaar
> 28%	< 0.86		Verwaarloosbaar
			Verwaarloosbaar
	> 0.86	< 1.01	Verwaarloosbaar
		> 1.01 & < 1.33	0.19
		> 1.33	0.42



Figuur 2.2 Beslisstructuur voor de seismische risicoanalyse volgens de DH AIS methode.

De beslisstructuur met betrekking tot de seismische risicoanalyse is weergegeven in Figuur 2.2. In stap 1A en 1B wordt een screening op de kans op aardbevingen uitgevoerd (conform Tabel 2.1) en de potentieel maximale magnitude bepaald. Dit is de magnitude van een aardbeving als alle opgebouwde energie in één keer zou vrijkomen. Op basis van een schatting van de potentieel maximale magnitude is het gasveld ingedeeld in een categorie (I, II of III). Bij categorie I volstaat monitoring met het huidige geofon en accelerometer netwerk van het KNMI. In de 'Methodiek voor risicoanalyse over geïnduceerde bevingen door gaswinning' (SodM, 2016) is aangegeven welke monitoringsverplichtingen, beheersmaatregelen en onderzoekverplichtingen verbonden zijn aan de andere twee categorieën (II en III). De

categorie heeft dus gevolgen voor welke vervolgstappen nodig zijn voor het winningsplan en de exploitatie.

De afleiding van de aardbevingsrisico's voor het N05-A-gasveld en omliggende prospects is beschreven in hoofdstuk 4.

2.2.2 Prognose bodemdaling

De prognose van de bodemdaling als gevolg van de gaswinning is gebaseerd op de relatie tussen de afnemende poriëndruk in het depleterend reservoirgesteente en de daardoor optredende compactie van dat gesteente. De volumevermindering vertaalt zich in een bodemdalingskom aan de oppervlakte.

Bij de prognose van de bodemdaling wordt uitgegaan van het maximale gaswinningsscenario, beschreven in § 2.1. De winningsvergunning voor N04-N05-N08 is toegekend op 24 juli 2019 en heeft een looptijd van 30 jaar. Om het effect van bodemdaling zo goed mogelijk te simuleren is de gemodelleerde productieperiode langer dan de looptijd van deze winningsvergunning. De verwachte productiestop zal voor het einde van de winningsvergunning liggen.

De berekening van de bodemdalingskom voor het N05-A-gasveld en omliggende prospects is beschreven in hoofdstuk 5.

3 Gegevens

3.1 Algemeen

Er zijn twee belangrijke bronnen beschikbaar om de gesteentemechanische parameters, zoals Young's modulus E , Poisson's ratio ν , Biot coëfficiënt α en compactiecoëfficiënt C_m ter plaatse van het reservoir en de bovenliggende gesteenten in te schatten:

1. Verschillende boringen geplaatst in de regio, waarin boorgatmetingen zijn opgenomen en routine kernanalyses zijn uitgevoerd. Deze geven de *in situ* gemeten waarden van bijvoorbeeld dichtheid en de seismische snelheden V_P en V_S . Uit deze parameters kunnen de benodigde gesteentemechanische parameters worden afgeleid.
2. Gesteentemechanische parameters zijn in het laboratorium gemeten door proeven onder bepaalde druk regimes te doen op monsters uit boorkernen. Het gesteente is van een grote diepte naar de oppervlakte gebracht en betreft een klein volume van het reservoir.

Deze twee bronnen samen maken het mogelijk om een bandbreedte te definiëren van de gesteentemechanische parameters.

3.2 Uit akoestische boorgatmetingen en routine kernanalyse

Bij de start van het onderzoek waren er boorgatmetingen beschikbaar van de boring in het studiegebied (N05-01-S1) en porositeitsmetingen uit routine kernanalyses van de nabijgelegen boring N04-02 (via NLOG.nl). Tijdens het onderzoek zijn aanvullende boorgatmetingen beschikbaar gekomen van N05-01-S3, N07-04A en van een Duitse put P1A. De gegevens uit deze laatste vier putten zijn gebruikt om de bandbreedte van C_m -waarden af te leiden. Verder is de bandbreedte aan gemeten en gekalibreerde compactiecoëfficiënten van de Amelandvelden, gepubliceerd in de documentatie bij de winningsplannen op NLOG.nl, bij de data betrokken.

Om C_m te berekenen uit de boorgatmetingen is gebruik gemaakt van de volgende formules. De dynamische Young's modulus (E_{dyn}) kan berekend worden door gebruik te maken van Eissa & Kazi (1988):

$$E_{dyn}(GPa) = 1 * 10^{-9} \cdot \left[\frac{\rho V_s^2 * (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \right] \quad (1)$$

met dichtheid ρ in kg/m^3 en seismische snelheden V_p en V_s in m/s . De statische Young's modulus (E_{stat}) is berekend uit E_{dyn} volgens Eissa & Kazi (1988):

$$E_{stat}(GPa) = 0,74 * E_{dyn}(GPa) - 0,82 \quad (2)$$

Vervolgens kan de compactiecoëfficiënt berekend worden door gebruik te maken van E volgens:

$$C_m = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} \quad (3)$$

met ν de Poisson's ratio.

De kleinste waarde voor de compactiecoëfficiënt op basis van akoestische en dichtheidsboorgatmetingen voor het Rotliegend reservoir is afgeleid uit de dynamische Young's modulus E_{dyn} . Per boring is de gemiddelde waarde voor E_{dyn} voor het reservoir berekend door de E_{dyn} -waarden volgens formule (1) over het diepte-interval van het reservoir te middelen. Vervolgens is de gemiddelde E_{dyn} van de vier boringen berekend en met formule (3) omgezet in C_m . De C_m uitgaande van E_{dyn} is gelijk aan $0,021 \text{ GPa}^{-1}$.

De grootste waarde voor de compactiecoëfficiënt is de waarde gebaseerd op de relatie met de porositeit uit routine kernanalyse. Met deze methodiek bedraagt de C_m $0,054 \text{ GPa}^{-1}$ voor boring N04-02 en $0,046 \text{ GPa}^{-1}$ voor boring N05-01-S1. We hebben de C_m van N04-02 gebruikt als maximale compactiecoëfficiënt voor de bandbreedte in deze studie.

Ten slotte is een middenwaarde afgeleid uit de statische Young's modulus E_{stat} , die met formule (2) is omgerekend uit E_{dyn} . De middenwaarde voor C_m bepaald met formule (3) en E_{stat} is gelijk aan $0,029 \text{ GPa}^{-1}$. De bandbreedte van compactiecoëfficiënten voor het Rotliegend-reservoir van het N05-A-gasveld en omliggende prospects uit de akoestische en dichtheidsboorgatmetingen is weergegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Samenvatting van de in de berekeningen gebruikte compactiecoëfficiënten op basis van de boorgatmetingen en routine kernanalyse.

Bron	Gemiddelde van boorgatmetingen N05-01-S1, N05-01-S3, N07-04A en P1A	Gemiddelde van boorgatmetingen N05-01-S1, N05-01-S3, N07-04A en P1A	Routine kernanalyse van N04-02
Uitgangsgrootheid	E_{dyn}	E_{stat}	Porositeitsdata
C_m [GPa^{-1}]	0,021	0,029	0,054

3.3 Uit gesteentemechanisch onderzoek

3.3.1 Methodiek voor bepaling van gesteentemechanische eigenschappen

Om de compactie van het reservoir in te schatten bij een vaste drukverlaging kan gebruik worden gemaakt van de formule (Fjaer, 2008):

$$\frac{\Delta h}{h} = C_m \alpha \Delta p_f \quad (4)$$

met Δh de verandering in reservoirdikte, h de reservoirdikte, α de Biot-coëfficiënt, C_m de compactiecoëfficiënt en Δp_f de verandering in poriedruk. Slechts een deel van de drukverlaging komt tot uitdrukking in de compactie van het gesteente. Dit effect wordt beschreven door de Biot-coëfficiënt α . Als $\alpha = 1$, dan wordt alle drukverlaging omgezet in compactie van het gesteente. Bij een lagere α is bij eenzelfde drukverlaging de compactie geringer. Voor een constante drukverlaging en constante dikte van het reservoir is de bodemdaling derhalve afhankelijk van het gecombineerde effect van C_m en α .

Naast de inschatting van de compactiecoëfficiënt uit akoestische en dichtheidsboorgatmetingen (sectie 3.2), kunnen relevante parameters ook worden achterhaald door laboratoriummetingen uit te voeren op monsters die via boringen op diepte zijn genomen, zogenaamde plugs. Er zijn verschillende manieren om de gesteenteparameters te meten en af

te leiden. In een standaardbenadering kan de compactiecoëfficiënt berekend worden uit laboratoriumresultaten volgens formule (3).

De Biot-coëfficiënt α kan eveneens bepaald worden uit laboratoriumproeven. Dit is echter een moeilijk te bepalen parameter met een grote onzekerheid. C_m kan ook in het laboratorium gemeten worden. Tezamen geven α en C_m dan aan in hoeverre drukverlaging in het reservoir zich vertaalt in bodemdaling (formule 1). Het gecombineerde effect van α en C_m kan ook *direct* gemeten worden in het laboratorium als de bulkcompressibiliteit bij constante hydrostatische druk C_{bp} (Hettema & de Pater, 1998). De relatie tussen de verschillende parameters is:

$$\alpha C_m = \alpha C_{bc} ust = C_{bp} ust \quad (5)$$

waarbij C_{bp} de bulkcompressibiliteit bij constante hydrostatische druk is, C_{bc} de bulkcompressibiliteit bij constante poriedruk en met ust (uniaxiale vervorming), gedefinieerd als:

$$ust = \frac{1+v}{3(1-v)} \quad (6)$$

Het verdient de voorkeur om het product van C_m en α direct uit de laboratoriumtests te bepalen. Dan wordt het effect van de totale spanning en de poriedruk op de compressibiliteit direct gemeten (Hettema & de Pater, 1998).

3.3.2 Gesteentemonsters-analyse boring N05-01-S1

Van twee niveaus binnen het reservoir zijn gesteentemonsters genomen en getest in het laboratorium door het Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns in Duitsland (Dietl, 2019). Plug PS02 is representatief voor 5% van het reservoir (met relatief hoge porositeit) en plug PS04 is representatief voor 95% van het reservoir (met gemiddelde porositeit). Per plug zijn er vier monsters geanalyseerd. Om de parameter voor het reservoir te bepalen is eerst per plug een gemiddelde berekend en vervolgens het gewogen gemiddelde waarbij 5% en 95% als gewichten zijn gebruikt. De twee relevante tabellen uit het rapport (Dietl, 2019) zijn opgenomen in bijlage A.

Uitgaande van de waarden voor C_{bp} en v in tabellen 5 en 6 van (Dietl, 2019), gewichten van 5% en 95% voor PS02 en PS04 en formules (3) en (4) bedraagt de waarde voor αC_m uit de pluggen $0,035 \text{ GPa}^{-1}$. Dit is te beschouwen als een "effectieve compactiecoëfficiënt". De waarde ligt in de buurt van de waarden bepaald uit de akoestische en dichtheidsboorgatmetingen (Tabel 3.1).

Om het gecombineerde effect van αC_m mee te nemen in de eenheidsbodemdalingsom, gaan we uit van een effectieve Young's modulus E^* , die is afgeleid uit:

$$E^* = \frac{3(1-2\nu)}{C_{bp}} \quad (7)$$

Deze effectieve E^* is niet gelijk aan de werkelijke Young's modulus van het materiaal, maar een rekenwaarde om het Biot-effect te kunnen verdisconteren in de eenheidsbodemdalingsom. De uit de pluggen afgeleide parameters zijn weergegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Relevante parameters voor de eenheidsbodemdalingssom uitgaande van resultaten uit het gesteenteonderzoek op de pluggen.

Parameter		Waarde	Opmerking
ν	Poisson's ratio	0,083	Gewogen gemiddelde uit laboratoriumtesten
ust		0,395	Berekend met (6) en gewogen gemiddelde
C_{bp}	bulk compressibiliteit bij constante hydrostatische druk (1/GPa)	0,088	Gewogen gemiddelde uit laboratoriumtesten
E^*	Effectieve Young's modulus (GPa)	28,5	Nodig voor software eenheidsbodemdalingssom (Plaxis), berekend met (7)
αC_m	Effectieve compactie coëfficiënt (1/GPa)	0,035	Berekend uitgaande van in het laboratorium gemeten C_{bp}

3.4 Parameters voor de analyse

Voor de verschillende bronnen (boorgatmetingen, routine kernanalyse, geomechanische kernanalyse) hebben we de compactie ingeschat met formule (4) op basis van een gemiddelde dikte van 28 m en een gemiddelde drukval van 320 bar. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3.3. De schatting van de compactie in het reservoir op basis van de akoestische en dichtheidsboorgatmetingen varieert van 1,9 tot 4,8 cm en op basis van de plug data 3,1 cm.

Tabel 3.3 Parameters voor bodemdalingssom op basis van akoestische en dichtheidsboorgatmetingen op basis van formules (1)–(3) en op basis van de plugs, uitgaande van een drukval van 320 bar en een dikte van het reservoir van 28 m. De cursief weergegeven waarden zijn input voor de eenheidsbodemdalingssom (software Plaxis).

Parameter		Boorgatmetingen en routine kernanalyse			Plug (effectieve waarden)
E	Young's modulus (GPa)	41,9	29,9	16 ¹⁾	$E^* = 28,5$
ν	Poisson's ratio	0,22	0,22	0,22	0,084
α	Biot's coëfficiënt	1 ²⁾	1 ²⁾	1 ²⁾	-
C_m	Compactie coëfficiënt (1/GPa)	0,021	0,029	0,054	$C_m^* \alpha = 0,035$ ³⁾
Δh	Daling (centimeter)	1,9	2,6	4,8	3,1

1) Berekend uit C_m en ν met formule (3)

2) Conservatieve aanname

3) Effectieve compactiecoëfficiënt berekend volgens werkwijze Marc Hettema (Hettema & de Pater, 1998)

De waarden van de Young's modulus behoren bij de range van gekozen compactiecoëfficiënten en Poisson's ratio. Deze set van parameters worden gebruikt in de eenheidsbodemdalingssom (Plaxis, www.plaxis.com) om de daarbij horende bodemdaling te berekenen.

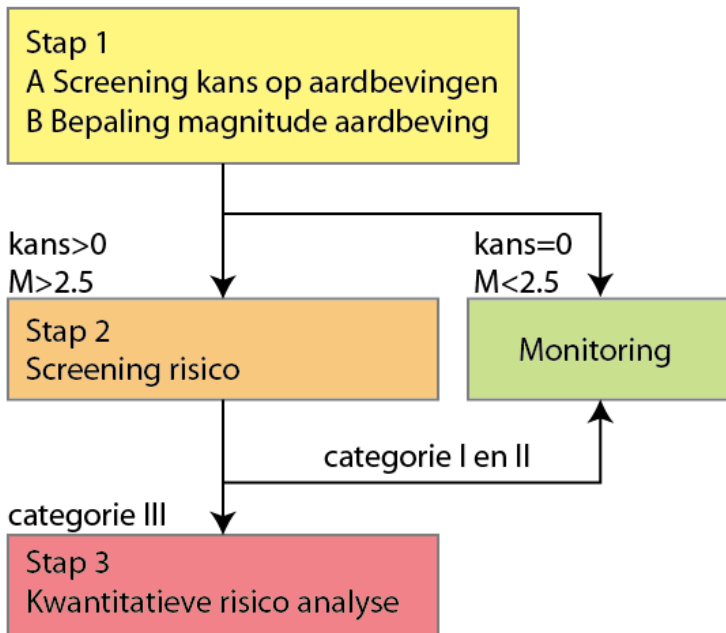
4 Seismisch risicoanalyse

4.1 Inleiding

Aardgaswinning leidt tot spanningsveranderingen in de bodem. Bij voldoende grote spanningsveranderingen worden de spanningen zo groot dat er plaatselijk bewegingen kunnen optreden langs breukvlakken. Spanningsveranderingen kunnen het gevolg zijn van drukverlagingen in het gasveld die resulteren in compactie van het reservoirgesteente. Bij breuken die door de interne stroefheid van het gesteente niet meebewegen kan op enig moment de spanning de weerstand overschrijden, waardoor de breuk weer gaat bewegen. Als dit plotseling en schoksgewijs gebeurt, resulteert dit in druk- en schuifspanningsgolven die naar het maaiveld migreren. Deze zorgen voor trillingen aan het oppervlak die als een aardbeving worden waargenomen. Omdat bij gasvelden de oorzaak menselijk ingrijpen is wordt er gesproken van geïnduceerde seismiciteit. De trillingen die als gevolg hiervan ontstaan aan de oppervlakte zijn voelbaar voor personen en kunnen schade aan constructies, gebouwen en inventaris en gronddeformaties tot gevolg hebben.

Om voor het winningsplan een schatting te maken van het aardbevingsrisico zijn berekeningen gemaakt aan de hand van het stroomschema uit de DHAIS methodiek. Het stroomschema in deze methodiek bestaat uit drie stappen (Figuur 4.1). Eerst wordt er een eerste evaluatie, de zgn. 'screening', uitgevoerd om te bepalen of verdere studie nodig is. Voor velden die op basis van deze berekeningen een verwaarloosbare kans hebben om geïnduceerde bevingen te genereren of waar geen bevingen sterker dan $M=2,5$ op de schaal van Richter zijn te verwachten, zijn geen aanvullende onderzoekstappen noodzakelijk en volstaat monitoring met het bestaande KNMI-netwerk. Voor velden die niet voldoen aan de eerste screening wordt overgegaan tot de tweede stap in de analyse. Hiermee wordt de risicocategorie bepaald. In het geval van categorie I en II is alleen monitoring nodig. In het geval van categorie III dient een kwantitatieve risicoanalyse uitgevoerd te worden.

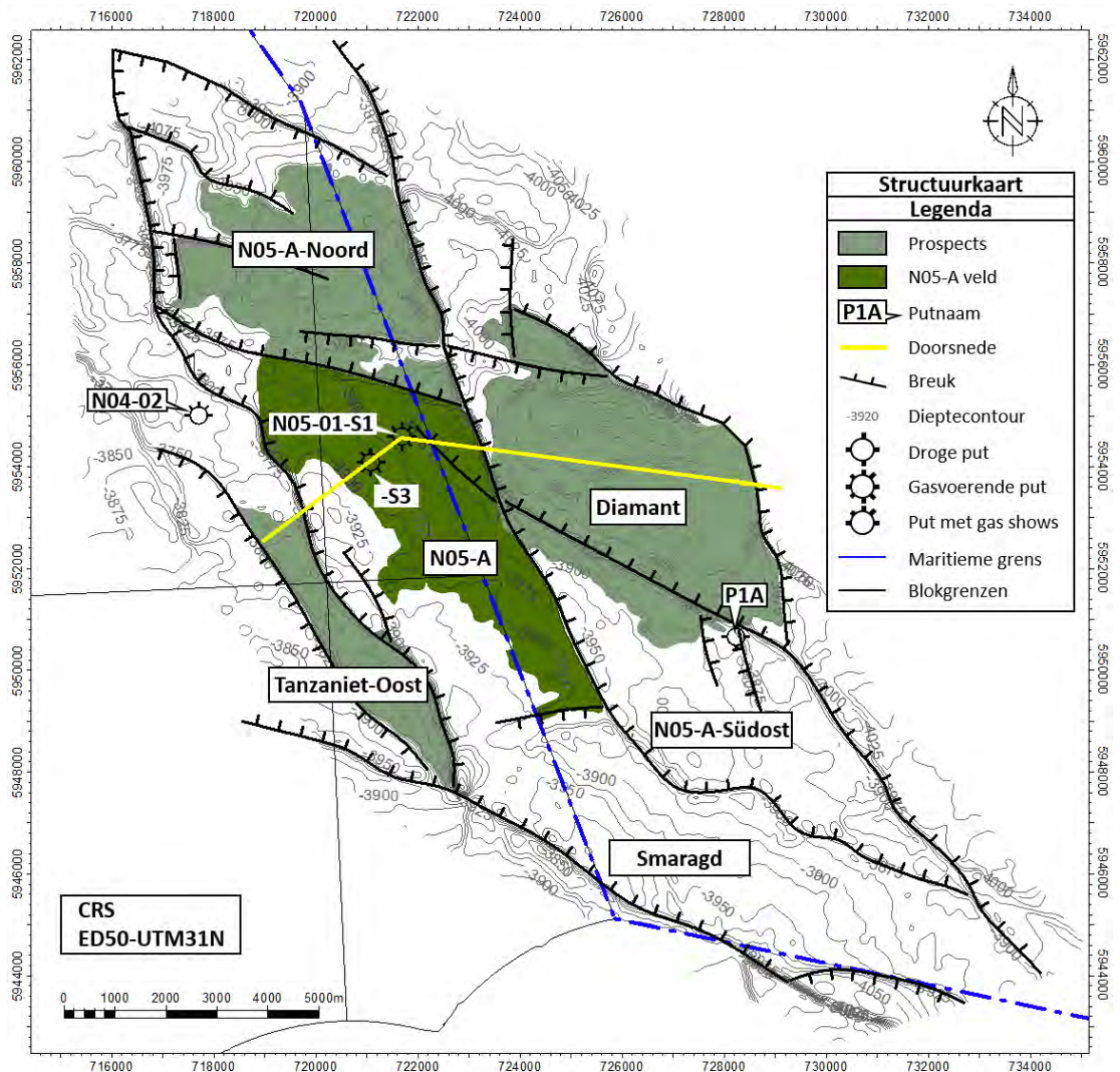
Bij de analyse conform DHAIS is uitgegaan van het gasvoerende deel van het reservoir, zoals weergegeven in Figuur 4.2.



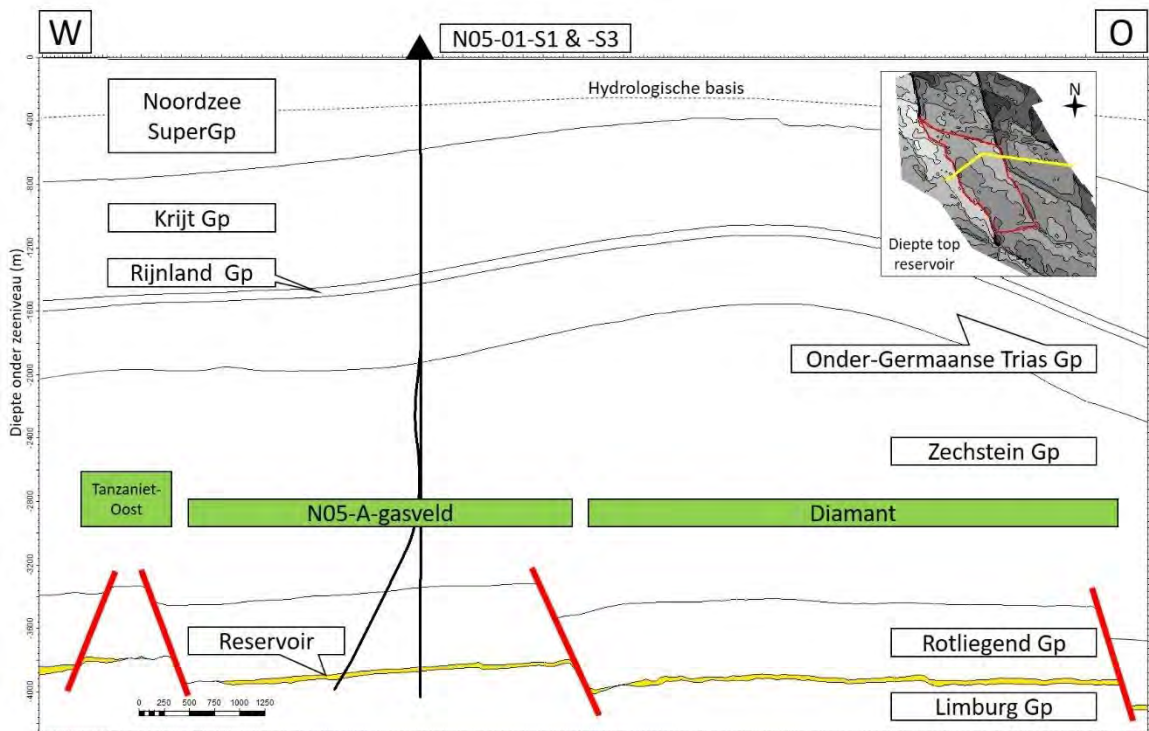
Figuur 4.1 Beslisstructuur voor de seismische risicoanalyse volgens de DHAI methode.

4.2 Breuken en stratigrafie

Het reservoir bevindt zich in de Rotliegend Groep (Slochteren Fm) op een diepte die varieert tussen 3700 en 4100 m. Breuken verdelen deze formatie in verschillende blokken (Figuur 4.2). Het Rotliegend is onderverdeeld in het reservoir met daarboven de Silverpit Formatie. De geologische doorsnede WZW-ONO van het gebied (Figuur 4.3) toont grote laterale verschillen in de dikte van de Zechstein Groep en van de North Sea Supergroep. Figuur 4.4 biedt een overzicht van de breuken in het N05-A en prospectsgebied.

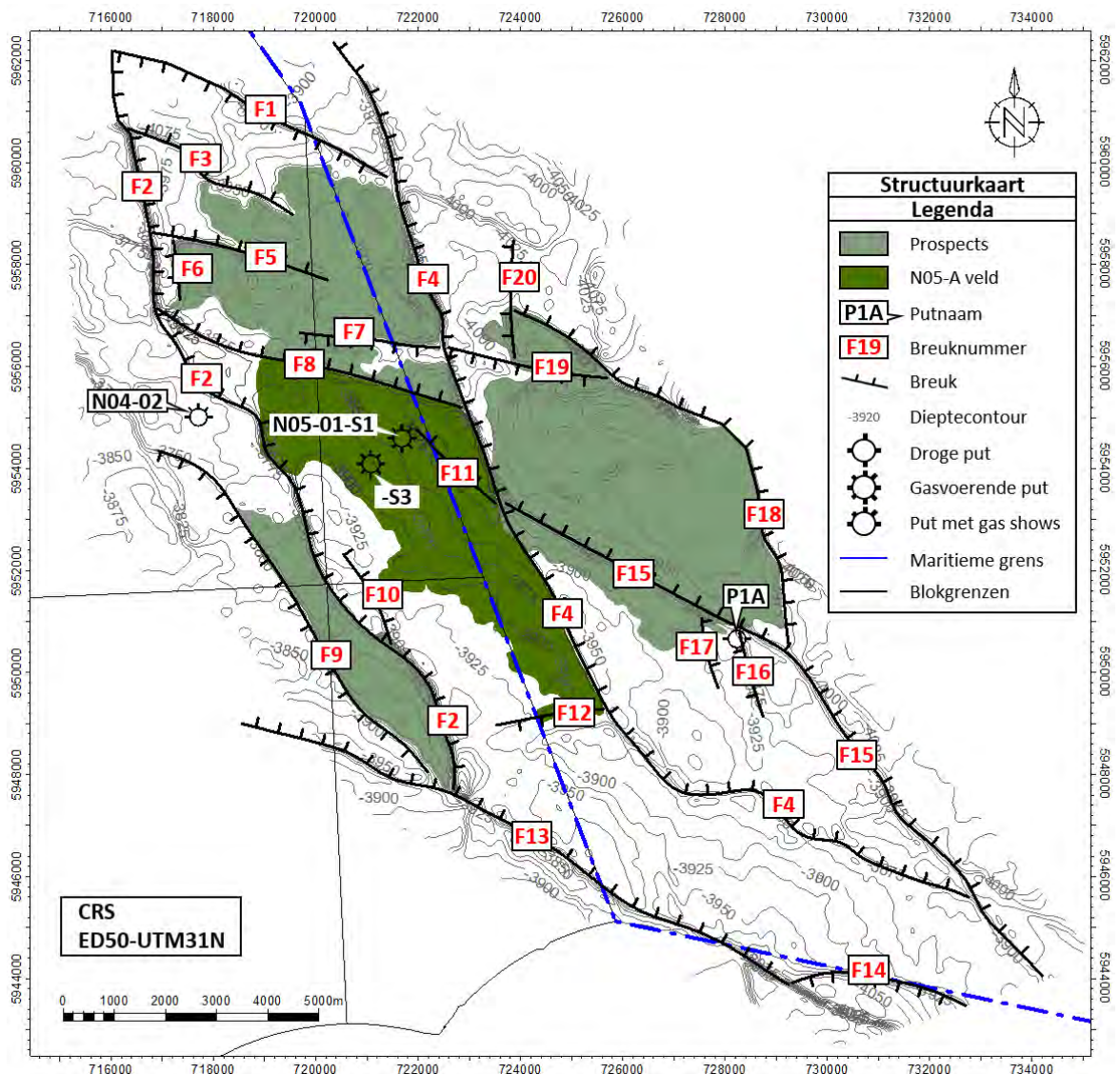


Figuur 4.2 Dieptekaart van de top van het reservoir van het N05-A voorkomen en de vier omliggende prospects, met daarop in groen aangegeven het gasvoerende gedeelte van de voorkomens en de locatie van de dwarsdoorsnede Figuur 4.3. Bron: ONE-Dyas.



Figuur 4.3 Geologische doorsnede door het gebied (bron: ONE-Dyas). De ligging van de doorsnede is weergegeven in de inzet en in Figuur 4.2.

Alle prospects in het gebied zijn omringd door breuken (Figuur 4.4). De reservoirs in de prospects worden gemodelleerd als gas- en watervoerend, met de uitzondering van Smaragd (alleen water). Het Gas-Water-Contact (GWC) is door ONE-Dyas op -3910 m gepostuleerd in het N05-A-gasveld en in prospect N05-A-Südost, op -3920 m in N05-A-Noord, op -3840 m in Tanzaniet-Oost en op -3975 m in Diamant.



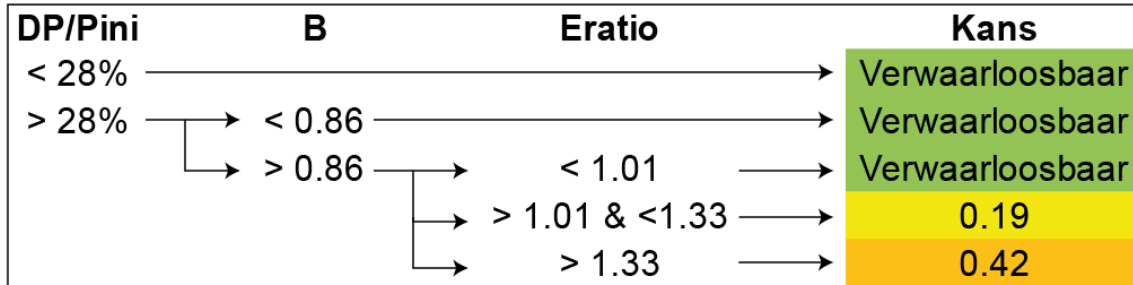
Figuur 4.4 Overzicht van de breuken met breuknummers in het studiegebied. Bron: ONE-Dyas.

4.3 Stap 1A: Screening kans op aardbevingen

Deze eerste evaluatie van de kans op aardbevingen is uitgevoerd met DHAIS. Op basis van drie daarin gestelde criteria voor de relatieve drukval en relatieve stijfheid kan de kans op beven worden geschat (Tabel 4.1). Deze criteria zijn de volgende:

- Relatieve drukval (DP/P_{ini})
- Relatieve breukdichtheid ($B = \text{Breukoppervlakte}^{3/2} / \text{Brutogesteentevolume}$)
- Relatieve stijfheid ($E\text{-ratio} = E_{\text{overburden}} / E_{\text{reservoir}}$)

Tabel 4.1 Kans op aardbeving volgens de DHAIS methode.



4.4 (i) Relatieve drukval

De gemiddelde druk aan het begin (P_{ini}) en de gemiddelde druk aan het einde van de depletie zijn gebruikt om de relatieve drukval te berekenen als DP/P_{ini} (DP = gemiddelde druk begin depletie minus gemiddelde druk einde depletie). Het einde van gasproductie van een put wordt verwacht bij een gasdruk van onder de 10 bar aan de bovengrondse putmond (Tubing Head Pressure) of bij het meeproduceren van een te grote hoeveelheid reservoirwater (liquid loading en water cut). Tabel 4.2 biedt een overzicht van de drukval en de relatieve drukval voor alle prospects en geeft aan dat DP/P_{ini} groter is dan 0,28 voor alle prospects. Volgens de kansclassificatie beschreven in Tabel 4.1 hangt de kans op beven af van de breukdichtheid en de relatieve stijfheid. Deze zijn in § 4.5 en 4.6 onderzocht.

Tabel 4.2 Overzicht van de verwachte relatieve drukval in het N05-A-gasveld en omliggende prospects. Overschrijdingen van de grenswaarde van 0,28 zijn dikgedrukt weergegeven.

	N05-A	N05-A-Noord	N05-A-Südost	Tanzaniet-Oost	Diamant
P_{ini}	466	468	466	458	471
DP	429	416	211	331	412
DP/P_{ini}	0,92	0,89	0,45	0,72	0,87

4.5 (ii) Breukdichtheid

De breukdichtheid van het reservoir B is in de DHAIS methode gedefinieerd als:

$$B = \frac{\text{breukoppervlakte}^{3/2}}{\text{brutogesteentevolume}} = \frac{l_b^{3/2} h^{3/2}}{Ah} \quad (8)$$

- waarin: h = de minimale waarde van de maximale dikte van de gaskolom van het voorkomen en de gemiddelde dikte van het gasvoerende reservoir
 l_b = totale breuklengte van de intra-reservoir breuken en randbreuken van het voorkomen binnen de GWC contour
 A = het oppervlakte van het voorkomen [m²] binnen de GWC contour.

Bij zowel de breukoppervlakte als het brutogesteentevolume is uitgegaan van het gasvoerende deel van het reservoir. De breuklengtes, het oppervlakte van het gaswatercontact, de maximale hoogte van de gaskolom en de gemiddelde dikte van het reservoir zijn in GIS kaarten opgemeten. Deze GIS kaarten komen overeen met de kaarten in het winningsplan. De breuklengtes van de individuele breuken zijn opgenomen in Tabel 4.3.

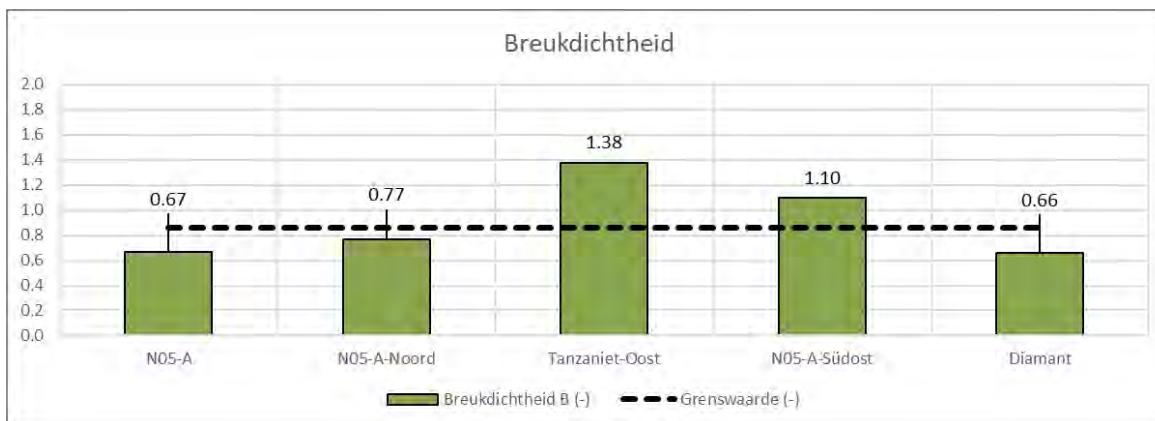
Op basis van formule (8) is de breukdichtheid B uitgerekend voor het N05-A-gasveld en de omliggende prospects (Tabel 4.4 en Figuur 4.5). De grenswaarde van 0,86 wordt overschreden voor Tanzaniet-Oost en voor N05-A-Südost.

Tabel 4.3 Overzicht breuklengtes voor N05-A en de omliggende prospects

Prospect	Breuk	Breuklengte [km]
N05-A-Noord Totale breuklengte = 16.85 km	F1	0
	F2	0
	F3	1,6
	F4	4,1
	F5	3,1
	F6	1,15
	F7	2,8
	F8	4,1
Tanzaniet-Oost Totale breuklengte = 12.6 km	F2	6,1
	F9	6,5
N05-A Totale breuklengte = 16.8 km	F2	2,3
	F4	6,5
	F8	4,1
	F10	0,5
	F11	2,1
	F12	1,3
N05-A-Südost Totale breuklengte = 6.7 km	F4	1,1
	F15	5,1
	F16	0
	F17	0,5
Diamant Totale breuklengte = 18.3 km	F4	0,7
	F15	5,2
	F18	9,3
	F19	2,0
	F20	1,1

Tabel 4.4 Overzicht breukoppervlaktes, volumes en berekende breukdichtheden voor N05-A en de omliggende prospects.

Eigenschappen	N05-A	N05-A-Noord	Tanzaniet-Oost	N05-A-Südost	Diamant
Breuklengte binnen GWC (m) (l_b)	1,7E+04	1,7E+04	1,3E+04	6,7E+03	1,8E+04
Breukoppervlakte (m ²) ($h l_b$)	4,6E+05	4,6E+05	3,7E+05	2,1E+05	5,3E+05
Oppervlakte GWC (m ²) (A)	1,7E+07	1,5E+07	5,6E+06	2,8E+06	2,0E+07
Bruto gesteentevolume binnen GWC (m ³) (Ah)	4,73E+08	4,02E+08	1,63E+08	8,52E+07	5,81E+08
Gemiddelde reservoir dikte (m) (h)	28	27	29	31	29
Breukdichtheid (-) (B)	0,67	0,77	1,38	1,10	0,66
Grenswaarde (-)	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86



Figuur 4.5 Breukdichtheid B voor het N05-A-gasveld en omliggende prospects. De grenswaarde van 0,86 is aangegeven.

4.6 (iii) Relatieve stijfheid

De gemeten seismische snelheid en bulkdichtheid in de verschillende boringen (bron: ONE-Dyas) en de VELMOD-kaarten (TNO, Pluymaekers et al., 2017) zijn gebruikt om de relatieve stijfheid te berekenen volgens:

$$E_{ratio} = \frac{E_{overburden}}{E_{reservoir}} \quad (9)$$

waar de $E_{overburden}$ de statische Young's modulus van de overburden is en $E_{reservoir}$ de statische Young's modulus van het Rotliggend reservoir.

4.6.1 DHAIS

De E-ratio is in de oorspronkelijke DHAIS studie (van Eijs et al., 2004) gedefinieerd. De gegevens van de statische eigenschappen zijn hierin gemiddeld per laagpakket. Er is bijvoorbeeld één gemiddelde waarde bepaald voor het Ten Boer Laagpakket (ROCLT), hoofdzakelijk bestaande uit kleisteen. De E-ratio voor een Rotliegend (Slochteren) reservoir in combinatie met het Ten Boer Laagpakket overburden, is volgens de statistiek van de DHAIS methode gelijk aan 1,28. Deze waarde wordt vervolgens gebruikt in alle voorkomens waar het Ten Boer Laagpakket de veronderstelde seal en dus overburden is. (paragraaf 2.2.2 van Eijs et al., 2004). De E-ratio voor een Rotliegend (Slochteren) reservoir in combinatie met het Ten Boer Laagpakket overburden, is volgens de statistiek van de DHAIS methode gelijk aan 1,28.

Indien uitgegaan wordt van deze situatie, dan duidt deze E-ratio op een bevingskans van 19% voor de prospects waarvoor de breukdichtheid B groter is dan 0,86. De breukdichtheid is groter dan 0,86 voor prospects Tanzaniet-Oost en voor N05-A-Südost. De tijdelijke leidraad schrijft voor om in deze situatie de potentieel maximale magnitude uitgaande van breukgeometrie en energiebalans te berekenen.

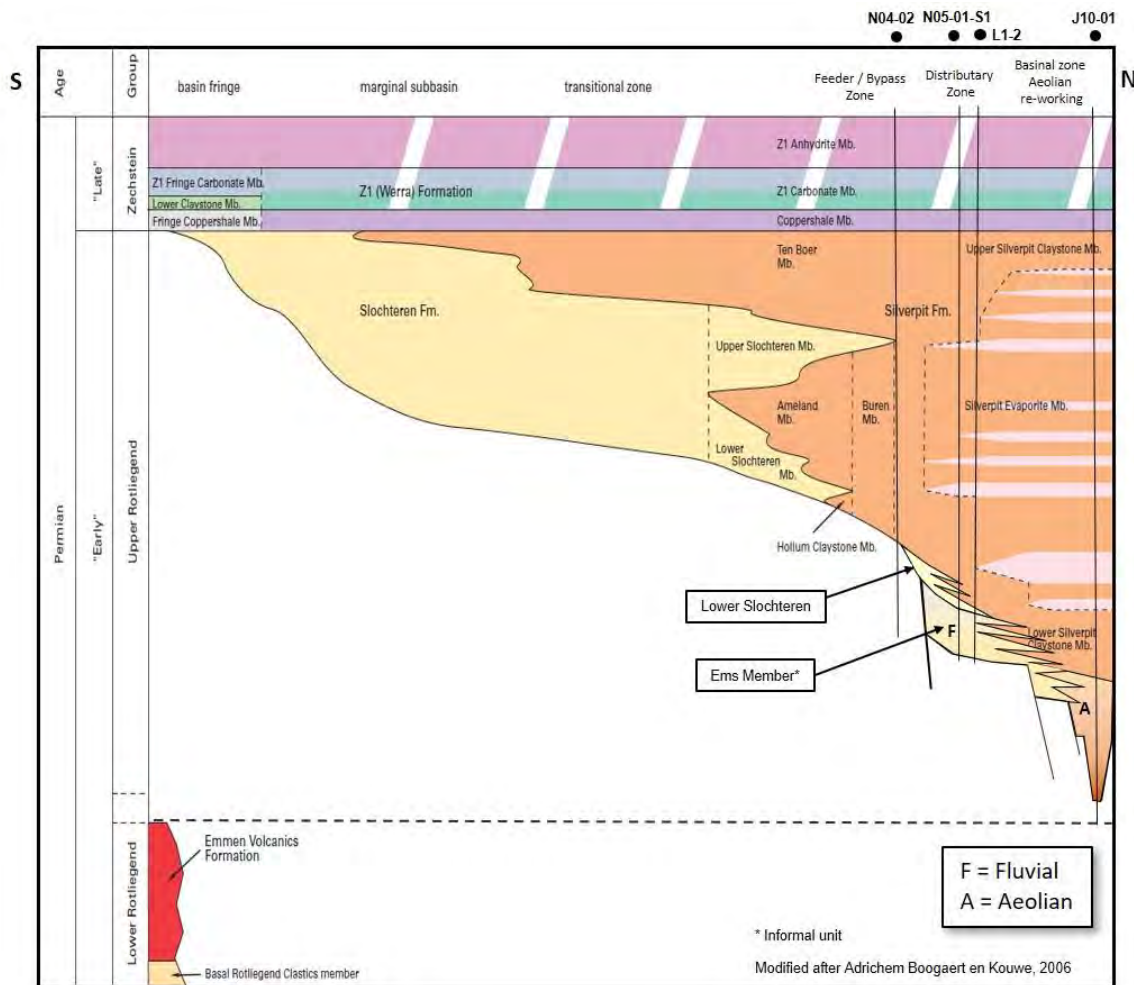
4.6.2 Aanvullende informatie

Tijdens het onderzoek voorafgaand aan het ontwikkelen van de prospects zijn er een aantal boringen geplaatst waarin boorgatmetingen (akoestiek en dichtheid) zijn uitgevoerd. Sinds het uitkomen van de oorspronkelijke DHAIS is VELMOD ook aangepast. Er zijn derhalve twee recente bronnen van aanvullende informatie beschikbaar om de Young's modulus ter plaatse van de prospects in te schatten:

- 1 boorgatmetingen; akoestisch en dichtheid
- 2 Via V_p uit het model VELMOD 3.1 (TNO, Pluymaekers et al., 2017. Beschikbaar via nlog.nl).

De meerwaarde van de akoestische en dichtheidsboorgatmetingen is dat alle parameters worden gemeten (V_p , V_s , dichtheid). De meerwaarde van VELMOD is dat het informatie geeft over de regionale variaties, inclusief gebieden waarin er geen in-situ data is. Er is in deze aanvullende analyse voor gekozen om de geomechanische gesteenteplog data niet te gebruiken, omdat deze alleen informatie geven over het reservoir en niet over de overburden, waardoor er geen zuivere vergelijking mogelijk is.

Uit de aanvullende boorinformatie blijkt dat de basale Rotliegend zandsteen ter plaatse van N05-A en omliggende prospects wordt afgedekt door een dik pakket Silverpit Claystone en Zechstein zout (Burgess et al, 2018, Figuur 4.6). De overburden ter plaatse van N05-A en omliggende prospects is gedefinieerd als de Silverpit Formatie en Zechstein Group samen. In de DHAIS studie wordt het Ten Boer Claystone Laagpakket als afdekkende laag gehanteerd. De geologische situatie ter plaatse van N05-A en omliggende prospects wijkt derhalve af van het uitgangspunt in DHAIS. In deze sectie is de aanvullende informatie gebruikt om de E-ratio in te schatten. De dynamische en statische E kan berekend worden door gebruik te maken van (Eissa & Kazi, 1988) volgens formules (1) en (2) in § 3.2.



Figuur 4.6 Chronostratigrafische weergave van formaties ter plaatse van N05-A en omliggende prospects. De ligging van de boringen is in de figuur aangegeven. Bron: Burgess et al. (2018).

E_{overburden} uit akoestische en dichtheidsboorgatmetingen

Aangezien de akoestische en dichtheidsboorgatmetingen informatie geven over de overburden en over het reservoir, is deze bron van data geschikt voor de vergelijking van E_{stat} (E-ratio). Tabel 4.5 biedt een overzicht van de gemiddelde waarden uit de verschillende boringen voor het reservoir, en voor de overburden (gegevens van het Silverpit- en Zechstein- diepte-interval). Hieruit zijn de gemiddelde E_{stat} van het reservoir en die van de overburden berekend met behulp van de in de putten beschikbare akoestische en dichtheidsboorgatmetingen. In alle boringen is de E-ratio van het Rotliegend-reservoir hoger dan de E-ratio van de overburden (Silverpit en Zechstein). Dit resulteert in een E-ratio overal kleiner dan de grenswaarde 1,01.

Tabel 4.5 Young's Modulus (E) van het reservoir en van de overburden (Silverpit en Zechstein) en de E-ratio, berekend in de N05-A ontdekkingsput (N05-01-S1) en de overige putten rondom N05-A en omliggende prospects.

Boring	E_{stat} Reservoir (GPa)	E_{stat} Overburden (GPa)	E-Ratio (-)
N05-01-S1	29,69	29,17	0,98
N05-01-S3	31,73	29,17 *	0,92
N07-04A	27,15	26,57	0,98
N07-04A-S1	30,95	27,95	0,90
P1A	29,69 *	26,55	0,89
Gemiddelde van de putten	29,88	27,56	0,91

* Voor E_{stat} overburden van N05-01-S3 en de E_{stat} van het reservoir van P1A is dezelfde waarde aangenomen als voor N05-01-S1, omdat deze niet uit de boorgatmetingen bepaald konden worden.

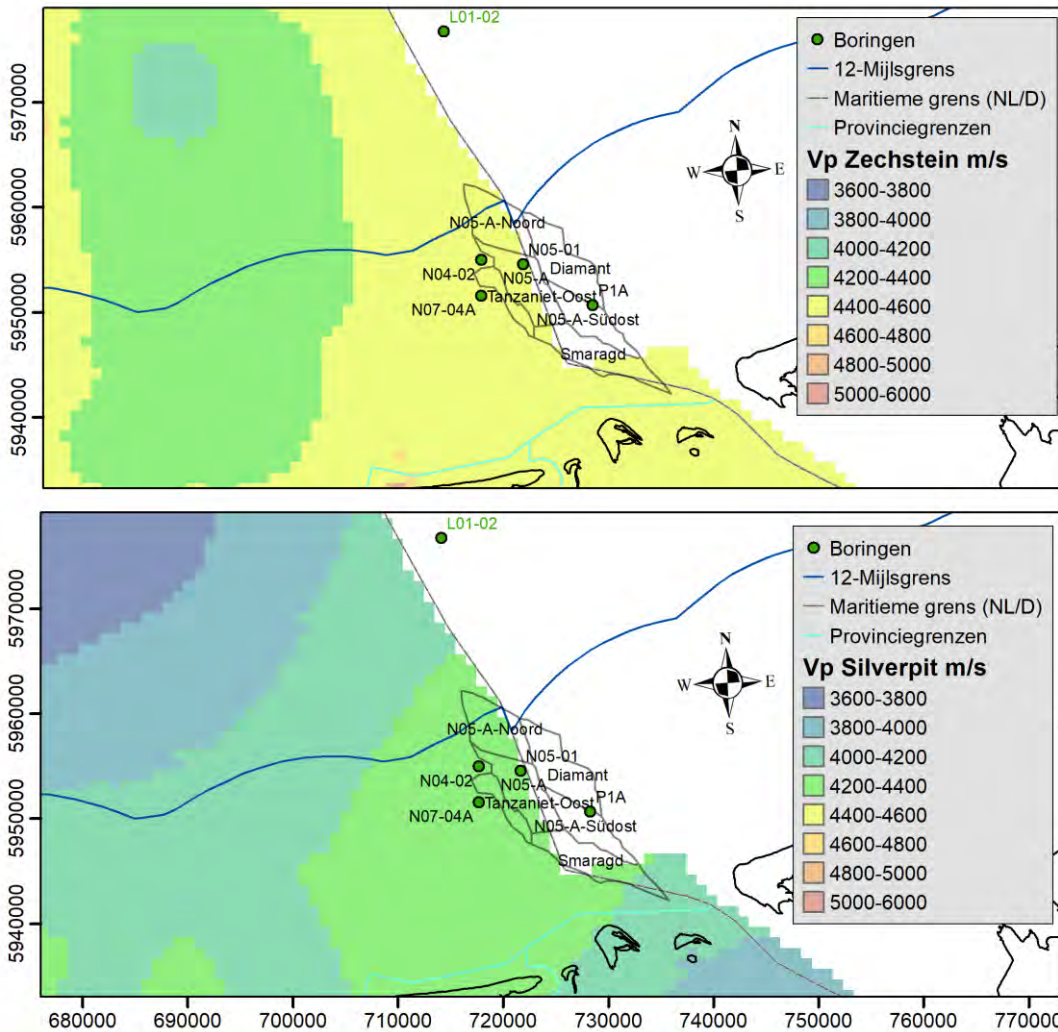
$E_{\text{overburden}}$ uit VELMOD

De waarden van $E_{\text{overburden}}$ kunnen berekend worden uit de VELMOD 3.1-dataset (Figuur 4.7), uitgaande van Zechstein en Silverpit als overburden. In de VELMOD-dataset is geen onderscheid gemaakt tussen Silverpit Formatie en het reservoir binnen de Rotliegend Group, omdat er geen N05-A-type reservoir is aangetroffen in deze boringen. Hierdoor zijn de VELMOD-parameters van de Rotliegend in feite gelijk aan de parameters van die van Silverpit Formatie. Ook zijn de nieuwste gegevens van de recente putten die in het kader van dit project zijn geboord en twee Duitse putten niet meegenomen in het VELMOD 3.1-model (Appendix B). Ten slotte houdt de huidige VELMOD 3.1-kaart op bij de NL-D grens en dekt daarmee niet het gehele onderzoeksgebied.

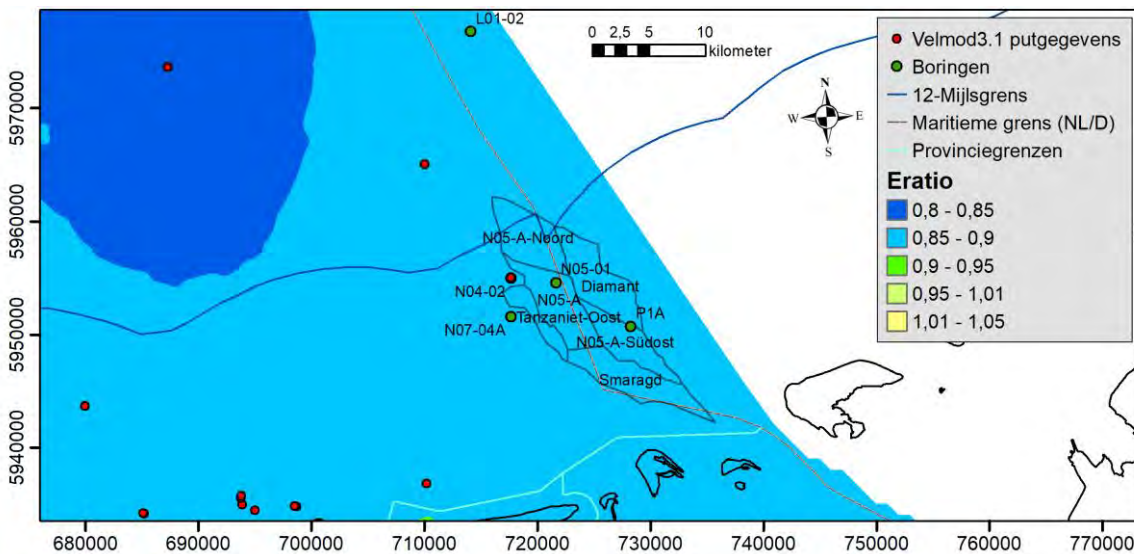
Om de $E_{\text{overburden}}$ te kunnen berekenen hebben we de volgende procedure toegepast:

1. Integratie van de nieuwe boorgatmetingen (V_p) in de seismische snelheidsgrids (VELMOD 3.1) (Figuur 4.7) (convergent interpolatie) waardoor de grids gebiedsdekkend en up-to-date zijn.
2. Statische Young's Modulus berekend (formules 1 en 2) voor Zechstein en voor Rotliegend (Silverpit). Hiervoor zijn een gemiddelde V_s en dichtheidswaarden gebruikt, omdat VELMOD 3.1 alleen V_p bevat.
3. Statische Young's modulus van de overburden berekend door het gemiddelde tussen Zechstein en Rotliegend (Silverpit) Young's moduli te nemen (Bijlage B).
4. Statische Young's Modulus van het reservoir is aangenomen als 29.88 GPa, namelijk de gemiddelde waarde uit de akoestische en dichtheidsboorgatmetingen voor de berekening van de E-ratio (Tabel 4.4).
5. Berekening van de E-ratio volgens formule 9 (Figuur 4.8).

De resultaten in Figuur 4.8 tonen aan dat de waarden voor de E-ratio in het hele gebied kleiner zijn dan 1,01.



Figuur 4.7 Seismische snelheid V_p (m/s) van de Zechstein Group (boven) en van de Rotliegend Group (Silverpit Formatie) (onder). Bron: VELMOD 3.1, TNO, beschikbaar via nlog.nl.



Figuur 4.8 E-ratio gebaseerd op VELMOD 3.1 (V_p en gemiddelde snelheid V_s) en aanvullende gegevens uit putten.

De waarde van de E-ratio is op twee verschillende manieren berekend gebruikmakend van aanvullende, lokale informatie. De ene manier op basis van waarden uit boorgatmetingen (Tabel 4.5). De andere manier is op basis van aannames over gemiddelde dichtheid en V_s en gebruikmakend van VELMOD voor de gebiedsdekkende kaart (Figuur 4.8). De twee methodes komen uit op dezelfde conclusie, namelijk dat de E-ratio kleiner is dan 1,01. Dit betekent dat op basis van de aanvullende informatie de kans op beven voor prospects Tanzaniet-Oost en voor N05-A-Südost verwaarloosbaar is.

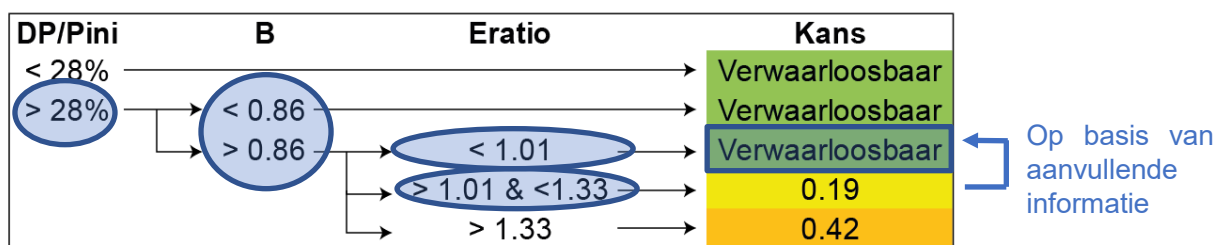
4.7 Samenvatting resultaten DHAIS stap 1A

De resultaten van de risicoscreening voor het N05-A-gasveld en de omliggende prospects zijn samengevat in

Tabel 4.6 en weergegeven in Figuur 4.9. Conform DHAIS is de kans op beven verwaarloosbaar voor N05-A, N05-A-Noord en Diamant en de kans op beven 19% voor Tanzaniet-Oost en voor N05-A-Südost. Op basis van de aanvullende informatie kan de kans op beven voor Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost echter bijgesteld worden tot verwaarloosbaar. Dit betekent dat de kans op beven voor alle prospects verwaarloosbaar is. Desalniettemin zijn stappen 1B en 2 van de DHAIS voor Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost uitgevoerd en beschreven in §4.8 en 4.9.

Tabel 4.6 Parameters ter bepaling kans op aardbevingen voor de verschillende prospects.

	N05-A	N05-A-Noord	N05-A-Südost	Tanzaniet-Oost	Diamant
Relatieve drukval	> 0,28	> 0,28	> 0,28	> 0,28	> 0,28
Breukdichtheid	< 0,86 Kans op beven verwaarloosbaar	< 0,86 Kans op beven verwaarloosbaar	> 0,86	> 0,86	< 0,86 Kans op beven verwaarloosbaar
Relatieve Stijfheid conform DHAIS	n.v.t	n.v.t	1,28 Kans op beven 19%	1,28 Kans op beven 19%	n.v.t
Relatieve Stijfheid op basis van aanvullende informatie	n.v.t	n.v.t	< 1,01 Kans op beven verwaarloosbaar	< 1,01 Kans op beven verwaarloosbaar	n.v.t



Figuur 4.9 Weergave van samenvatting van DHAIS resultaat stap 1A voor N05-A en omliggende prospects.

4.8 Stap 1B: Bepaling potentieel maximale magnitude

Ondanks dat uit aanvullende studie blijkt dat het risico op aardbevingen verwaarloosbaar is, is stap 1B uitgevoerd voor de twee prospects met een breukdichtheid groter dan 0,86 en een E-ratio conform DHAIS van groter dan 1,01, maar kleiner dan 1,33. Dit zijn Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost.

De potentieel maximale magnitude van de sterkste beving kan worden bepaald volgens twee methodes: op basis van 1) breukgeometrie en 2) op basis van de energiebalans. Hierbij geldt de aanname dat alle energie vrijkomt bij slechts één beving. Vandaar dat dit de potentieel maximale magnitude wordt genoemd. In deze seismische risicoanalyse worden beide methoden toegepast, gebruik makend van de in SodM (2016) voorgestelde parameters. Voor een conservatieve benadering van het aardbevingsrisico wordt in de classificatie de hoogste waarde van de berekende potentieel maximale magnitude gebruikt.

4.8.1 Methode 1: Breukgeometrie

De maximale magnitude die beweging langs een breuk kan genereren kan worden afgeleid uit de maximale energie die vrijkomt wanneer de breuk over zijn gehele lengte plotseling slijpt, het zgn. seismische moment (Hanks en Kanamori, 1979; Kanamori, 2001). Het seismische moment is evenredig met de "stress drop", of de spanning, opgebouwd langs een breukvlak, die tijdens een beving is ontlast en het gemobiliseerde oppervlak van die breuk, volgens de relatie:

$$M_0 = \frac{3}{8} * \pi * \Delta\sigma * (w^2 * L) [Nm] \quad (10)$$

waarin $\Delta\sigma$ de stress drop (de spanning die tijdens een beving is gerelaxeerd) is en w en L respectievelijk de gemobiliseerde hoogte en lengte langs het slipvlak van de breuk zijn. Voor de stress drop wordt in de berekening een waarde van 5 MPa gebruikt, conform de leidraad (Staatstoezicht op de Mijnen, 2016). Voor de screening wordt voor de gemobiliseerde hoogte en lengte van een breuk aan het depleterende reservoir grenzende deel van de breuk beschouwd: de hoogte en lengte van de breuk zijn afgeleid van de aan het reservoirgesteente grenzende delen van de breuken in het maximale gaswinningsscenario. De potentieel maximale magnitude wordt volgens Hanks en Kanamori (1979) gegeven door de relatie:

$$M_w = \frac{2}{3} * \log_{10}(M_0) - 6,07 \quad (M_0 \text{ in } Nm) \quad (11)$$

Tabel 4.7 biedt een overzicht van het berekende seismische moment en de potentieel maximale magnitude voor alle breuken voor Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost (maximale gaswinningsscenario). Op basis van de stress drop door slip langs de breuken is de potentieel maximale magnitude M_w gelijk aan 2,9.

Tabel 4.7 Seismisch moment en potentieel maximale magnitude berekend uit de dimensies van de breuken voor het Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost. Per prospect is het maximum dikgedrukt.

Prospect	Breuk	Seismisch moment M_0 (N*m)	Magnitude M_w
Tanzaniet-Oost	F2	3,10E+13	2,9
	F9	3,30E+13	2,9
N05-A-Südost	F4	6,11E+12	2,5
	F15	2,83E+13	2,9
	F17	2,78E+12	2,2

4.8.2 Methode 2: Energiebalans

De tweede methode is gebaseerd op de energie die in het fysieke systeem is opgeslagen in de vorm van opgebouwde spanning door compactie die bij een geïnduceerde beving vrij kan komen. De drukafname door de depletie van het gas en de daardoor optredende compactie van het reservoirgesteente kan dan uitgedrukt worden in een hoeveelheid potentiële seismische energie. Slechts een percentage van deze energie zal vrijkomen in de vorm van een aardbeving. Kostrov (1974) heeft een eenvoudige relatie opgesteld tussen de volumeverandering van gesteente en de daardoor opgebouwde seismische energie, uitgedrukt in het seismische moment M_0 . SodM (2016) geeft voor de potentieel maximale magnitude:

$$M_w = \frac{2}{3} \left(\log_{10} \left(\frac{2\mu}{3} \alpha |\Delta V(t)| \right) - 9,1 \right) \quad (12)$$

waarin μ is de glijdingsmodulus, ΔV is de volumeverandering in het reservoir door compactie en α is de reductiefactor (gelijk aan 0,01, let op dat dit een andere α is dan de Biot coëfficiënt), aandeel seismische energie van totale potentiële energie. De glijdingsmodulus μ is berekend met:

$$\mu = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (13)$$

waarin E = Young's modulus en ν = Poissons ratio.

Voor Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost zijn is de potentieel maximale magnitude bepaald waarbij uitgegaan is van de compactiecoëfficiënt uit de plug, het compactie volume bij de gemiddelde drukval en het volume van het reservoir (oppervlakte binnen GWC*gemiddelde dikte). De grootheid moment magnitude (M_w) is berekend formule (12) en de gegevens uit Tabel 4.8 en Tabel 4.9. Op basis van de berekende compactie kan er voldoende potentiële energie worden opgebouwd voor een aardbeving tot een potentieel maximale magnitude M_w van 2,7 (Tabel 4.9).

Tabel 4.8 Overzicht van de parameters gebruikt in methode 2.

Parameter	Beschrijving	Eenheid	Waarde uit plugs (effectieve waarden)
E	Young's modulus	GPa	$E^* = 28,5$
ν	Poisson ratio		0,083
μ	Glijdingsmodulus	GPa	13,2
α	Reductiefactor		0,01
C_m	Compactiecoëfficiënt	1/GPa	0,035 (= Biot* C_m)

Tabel 4.9 Overzicht van de eigenschappen van Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost en van de potentieel maximale magnitude volgens de energiebalans op basis van compactiecoëfficiënt van de plug data ($C_m = 0,035$).

	Tanzaniet-Oost	N05-A-Südost
A (m ²)	5,56E+06	2,77E+06
h (m)	29	31
dp (Pa)	3,31E+07	2,11E+07
M_w	2,7	2,4

4.9 Stap 2: screening risico

De berekende potentiële maximale magnitude voor Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost is groter dan 2,5. Daarom dient stap 2 uitgevoerd te worden om het risico van geïnduceerde aardbevingen verder vast te stellen (SodM, 2016). Op basis van een risico matrix worden de verschillende factoren semi-kwantitatief geanalyseerd. De factoren zijn verdeeld in:

de factoren die bepalen of een geïnduceerde beving kan resulteren in een sterke

grondbeweging (de invloedfactoren ondergrond,

- Tabel 4.10).
- de factoren die invloed hebben op de grootte van de mogelijke gevolgen (de invloedfactoren bovengrond, Tabel 4.11).

Op basis van de uitkomst per factor is een score toegekend. Deze 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 (14) en bovengrond (16). Vervolgens worden deze in de risicomatrix tegen elkaar uitgezet. Hiermee wordt de kwalitatieve risicocategorie bepaald (Figuur 4.11).

Tabel 4.10 Classificering van de invloedfactoren ondergrond (uit SodM, 2016).

	DHAIS	M	Ligging voorkomen	Opslingering
5		Alle methodes >4,5		
4	Bevend veld > 5 bevingen per jaar van $M \geq 1,5$	1 methode > 4,5 én/of Alle methodes 4,1 - 4,5		
3	Bevend veld < 5 bevingen per jaar van $M \geq 1,5$	1 methode 4,1 - 4,5 én/of Alle methodes 3,6 - 4,0		>60% slappe grond ($V_{s,30} = < 200\text{m/s}$) 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 ($V_{s,30} = < 200\text{m/s}$) 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 ($V_{s,30} = < 200\text{m/s}$) 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 $\leq 2,5$	Onder de lijn Amsterdam-Arnhem	<10 % slappe grond ($V_{s,30} = < 200\text{m/s}$) 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.

Tabel 4.11 Classificering van de invloedfactoren bovengrond (uit SodM, 2016).

	Bevolkingsdichtheid (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

Tabel 4.12 geeft de score van de ondergrond factoren. Hieronder volgt een uitleg voor de score.

- i. DHAIS: de kans op beving is volgens de DHAIS analyse 19% voor Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost.
- ii. M: de berekende potentieel maximale magnitude is 2,9 volgens de ene methode en 2,7 volgens de andere methode.
- iii. Ligging: het veld ligt boven de lijn Amsterdam-Arnhem.
- iv. Slappe lagen: uit de analyse van boringen in het gebied (DINOloket) blijkt dat geen dikke (> 1 m) klei en veen lagen aanwezig zijn in het bovenste sediment pakket. Mogelijk zijn er plaatselijk wel dunne lagen aanwezig, maar het is waarschijnlijk dat het percentage van slappe lagen kleiner is dan 10 %.

De totale genormaliseerde score voor de ondergrond factoren is 0,29.

Tabel 4.12 Score per categorie ondergrond.

	Score
DHAIS	1
Magnitude	1
Ligging	2
Slappe lagen	0
Totaal genormaliseerd	4/14 = 0,29

Tabel 4.13 Score per categorie bovengrond.

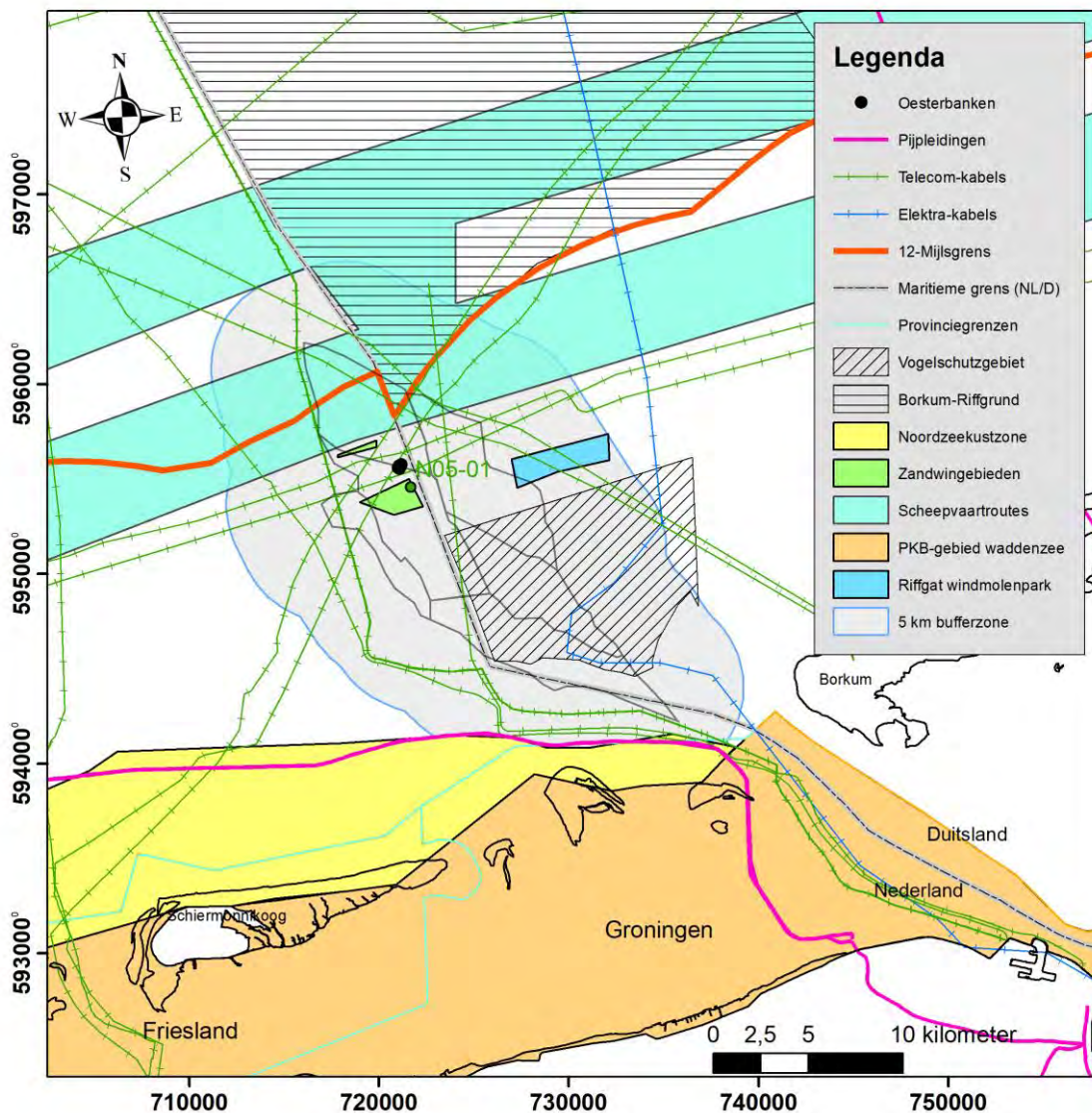
	Score
Bevolkingsdichtheid	0
Industriële inrichtingen	3
Specifieke gebouwen en vitale infrastructuur	0
Dijken	0
Totaal genormaliseerd	3/16 = 0,19

Bij de beschouwing van de bovengrondse aspecten, zijn de aanwezigheid van het windmolenpark, elektriciteits- en telecomkabels relevant (Figuur 4.10, Tabel 4.13). Hiervoor is een score 3 gegeven bij de categorie industriële inrichtingen. Overige objecten liggen meer

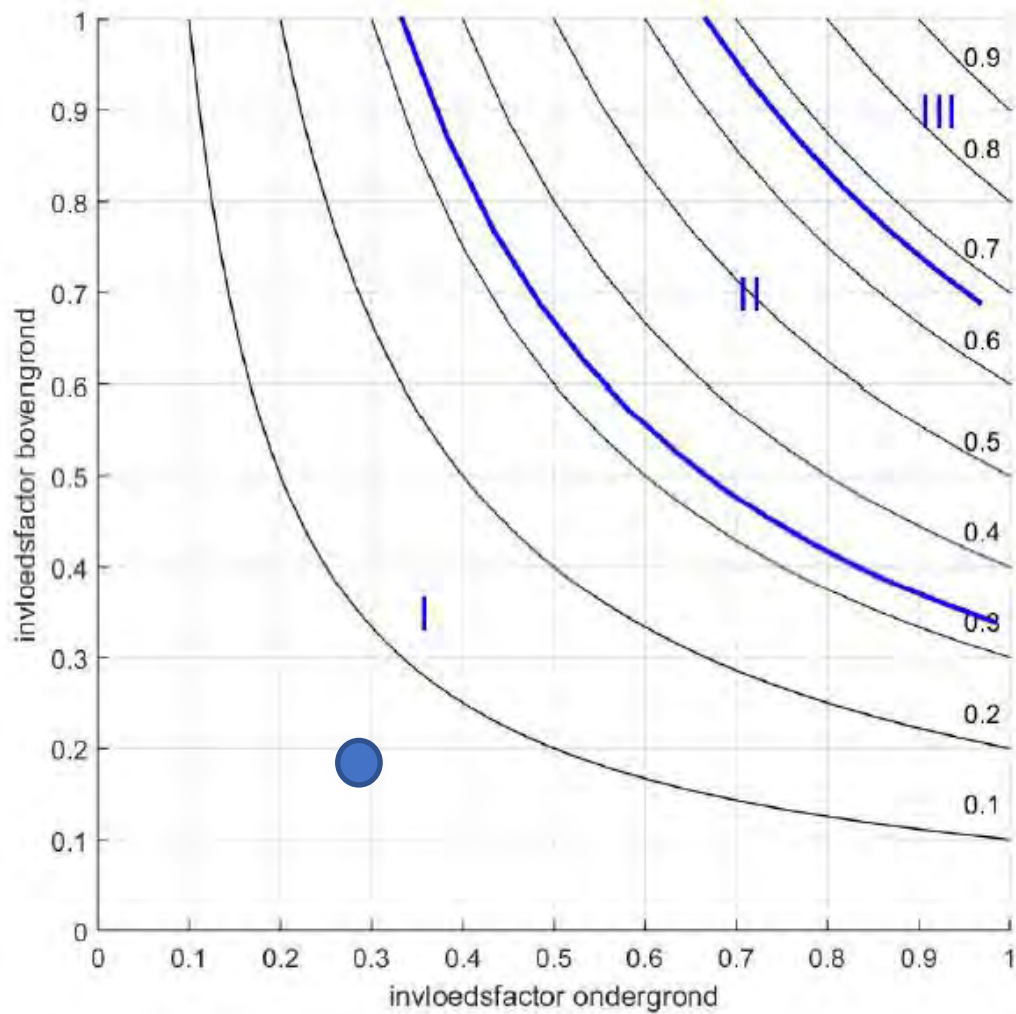
dan 5 km van het veld verwijderd. De genormaliseerde score voor de bovengrond bedraagt 0,19.

Op basis van de gecombineerde scores voor de ondergrond en de bovengrond valt het N05-A-gasveld en de omliggende prospects in de risicocategorie I (0,29 voor ondergrond en 0,19 voor bovengrond factoren, Figuur 4.11). Voor dit veld is geen kwantitatieve risicoanalyse (stap 3) nodig en kan worden volstaan met monitoring met het huidige gefoon- en accelerometer-netwerk van het KNMI. Hierbij wordt benadrukt, dat de kans op seismische activiteit verwaarloosbaar is.

Een mogelijk risico bij aardbevingen zijn tsunami's. Bij ondiepe bevingen (dat wil zeggen ondieper dan 20 km) wordt door experts geen rekening gehouden met tsunami's bij magnitudes kleiner dan 6 (pers. communicatie,).



Figuur 4.10 Omgevingselementen op en rond het N05-A-gasveld en de omliggende prospects. Industriële installaties in de vorm van een windmolenpark, een pijpleiding en enkele elektra- en telecom-kabels bevinden zich binnen de 5 km buffer gebied. Bron: ONE-Dyas.



Figuur 4.11 De risico matrix (SodM, 2016). De zwarte lijnen zijn lijnen van gelijk genormaliseerd risico. De verdeling in categorieën is gedaan op basis van $1/3$ en $2/3$ van het genormaliseerde risico. Het resultaat is weergegeven als een blauwe punt.

5 Bodemdalingstudie

5.1 Inleiding

De bodemdaling aan het maaiveld die veroorzaakt wordt door compactie van het reservoir wordt gemodelleerd door middel van de wiskundige methode van eindige elementen ('finite element analysis') m.b.v. Plaxis-software. Hierin wordt de daling van een aantal nucleus-reservoirs gesuperponeerd (de Lange & Luger, 2012). De nucleus-reservoirs met een eindige straal worden verdeeld over de totale oppervlakte van het gehele gasveld. In elke nucleus wordt de daling bepaald door het product van de drukkaling per tijdseenheid en de dikte van het compacterende gesteente (dPh) en de diepte/dikte van de overburden. De aanname bij de superpositie is dat de lagen horizontaal zijn en dat de vervorming van het gesteente lineair elastisch is. Het studiegebied wijkt van deze aannames af doordat in de West-Oostdoorsnede de lagen van de overburden sterk in dikte verschillen (Figuur 4.3). Ook is de Zechsteinzoutlaag zo dik dat dit mogelijk invloed heeft op de vervorming van de overburden. Omdat zout niet puur elastisch, maar in grote mate plastisch vervormt, is ook de invloed van de zoutlaag op de bodemdalingssom onderzocht.

De bodemdalingssom is berekend met het dPh (drukval x reservoirdikte) grid dat door ONE-Dyas geleverd is voor verschillende tijdstippen in het maximale gaswinningsscenario, beschreven in § 2.1. De winningsvergunning voor N04-N05-N08 is toegekend op 24 juli 2019 en heeft een looptijd van 30 jaar. Om het effect van bodemdaling zo goed mogelijk te simuleren is de gemodelleerde productieperiode langer dan de looptijd van deze winningsvergunning. De verwachte productiestop zal echter ruim voor het einde van de winningsvergunning liggen.

Vier bodemdalingsscenario's zijn doorgerekend met de vier verschillende compactiecoëfficiënten zoals beschreven zijn in § 3.4.

5.2 Eenheidsbodemdelingssom

5.2.1 Inleiding

Om de invloed van de variatie in laagdikte van de verschillende lagen over N05-A en de prospects te onderzoeken is uitgegaan van de laagopbouw zoals die door ONE-Dyas ter beschikking is gesteld. In een eerdere fase van het onderzoek zijn voor verschillende verticale doorsneden met de grootste verschillen in dieptes en diktes eenheidssommen gemaakt. Tevens is het effect van de afstand tot de rand van het rekenmodel onderzocht. Ten slotte is de invloed van de plastische vervorming van het Zechstein-zout op de schaal van het reservoir berekend in een aparte Plaxis-som.

5.2.2 De eenheidsbodemdelingssom

Met Plaxis zijn axiaal-symmetrische simulaties gemaakt voor een eenheidsreservoir met een straal van 113 m. In dit reservoir is een drukval opgelegd. Ten gevolge van de drukval ontstaat er bodemdaling in het omringende gebied. Om de invloed van randeffecten te bekijken zijn er naast simulaties van een modelgeometrie met een straal van 10 km, ook simulaties uitgevoerd voor een modelgeometrie met een veel grotere straal, namelijk 100 km. De parameters van de lagen boven en onder het reservoir zijn samengevat in Tabel 5.1. We zijn uitgegaan van de laagopbouw ter plaatse van N05-01-S1. In het model dient de laag onder het reservoir voldoende dik te zijn. We hebben hiervoor een dikte van 3000 m aangenomen. De parameters

voor het reservoir zijn weergegeven in Tabel 3.3. Er zijn vier simulaties van de eenheidssom gedraaid, met de invoerparameters uit Tabel 3.3 en een drukval van 400 bar.

In de doorsnede met de dikke zoutlaag (de oostelijke rand van het profiel in Figuur 4.3) liggen de maximale zakkings in de orde van 21-25 μm . De invloed van de dikte van de zoutlaag op de resultaten is beperkt, maar niet verwaarloosbaar. Omdat de laterale heterogeniteit in de laagdiktes geleidelijk verloopt, is op basis van deze sommen de configuratie met de grootste eenheidsdaling van de nucleus gekozen om de lineair elastische bodemdalingssommen voor de gevraagde scenario's te berekenen. De parameters waarmee de eenheidssommen zijn gemaakt zijn samengevat in Tabel 5.1. Hier zijn de waarden van E_{stat} voor de Zechstein Group en bovenliggende formaties berekend met Eissa&Kazi (1988) (formule (2) in § 3.2).

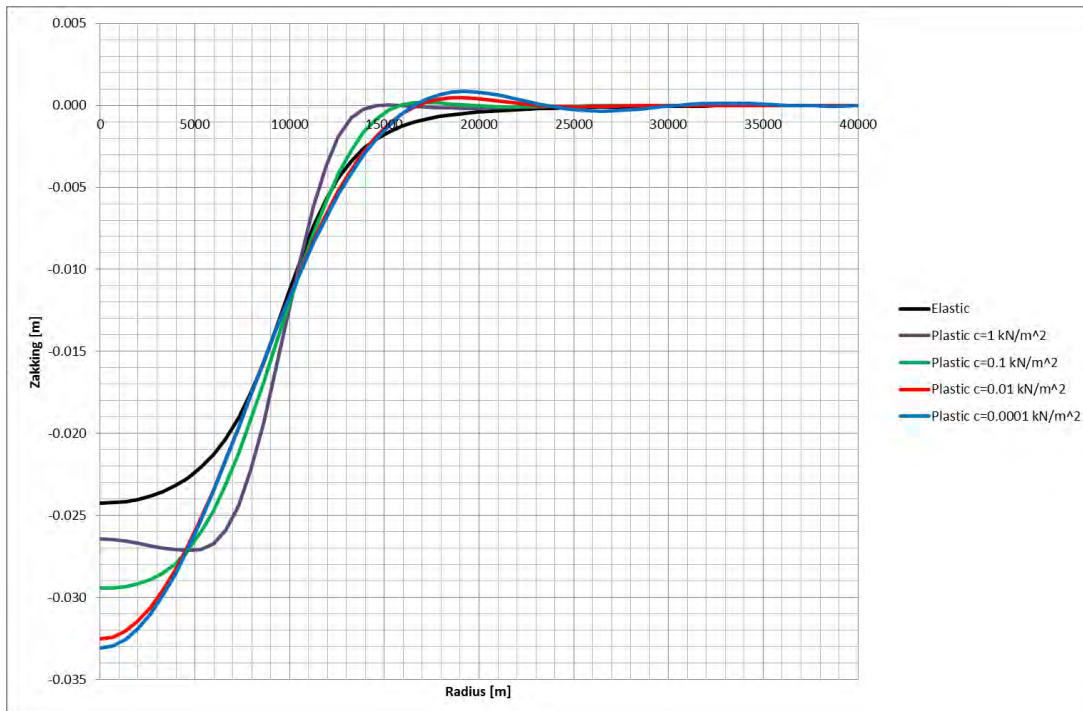
Tabel 5.1 Samenvatting van de parameters waarmee de eenheidsbodemdalingssommen zijn gemaakt.

Eenheid	Basis (m)	Dichtheid ρ (Mg m^{-3})	Poisson ν (-)	E_{stat} (GPa)
Zee/zeebodem	-26,0			
Tertiair	-564,2	2,00	0,38	1,5
Krijt	-1361,2	2,10	0,35	7,6
Onder Krijt	-1420,2	2,26	0,23	9,4
Trias	-1918,2	2,40	0,30	15,5
Zechstein	-3344,6	2,25	0,26	27,1
Basis Silverpit = Top Reservoir	-3831,5	2,62	0,26	27,2
Basis Reservoir = Top Carboniferous	-3862,5	2,54	Zie Tabel 3.3 in § 3.4 voor de 4 gebruikte cases	
Carboon	-6862,5	2,65	0,20	31,8

5.2.3 De invloed van de zoutlaag

De eenheidssommen geven ook inzicht in de grootte van de optredende maximale deviatorische spanning in het zout. Deze variëren in de eenheidssommen van 34 tot 141 kN/m^2 . Voor het gehele reservoir kan deze maximale deviatorische spanning cumulatief echter groter zijn. Hiervoor is een extra eenheidssom gemaakt waarbij voor de horizontale uitbreiding van de compacterende laag de werkelijke afmeting van het N05-A-gasveld en de omliggende prospects is gebruikt. Hierbij is de vervorming van het zout volledig plastisch gemodelleerd. Dit kan door in het geomechanisch model de cohesie c van het zout te verlagen.

In Figuur 5.1 is het effect van plastisch zout zichtbaar gemaakt. De zwarte lijn geeft het lineair elastisch gedrag weer. Naarmate het gedrag van de zoutlaag plastischer wordt, neemt de bodemdaling in het centrum toe. Bij gelijkblijvend bodemdalingsvolume zien we dat de randen van de bodemdalingssom steiler worden, waardoor de bodemdalingssom ook smaller wordt. De maximale deviatorische schuifspanningen in het zout treden dan op aan de grenzen van het reservoir. Uiteindelijk gaan de maximale daling en de schuifspanningen naar een maximumwaarde. De maximale deviatorische spanning in het zout is dan in de orde 300 kN/m^2 . Deze waarde is indicatief, omdat de laterale variaties in de laagopbouw en drukval niet zijn mee genomen. Deze indicatieve waarde is wel geschikt om de orde van grootte van de invloed op de bodemdalingssom in te schatten. Verwacht wordt dat bij deze orde van grootte van de schuifspanningen het aandeel van zoutkruip in de ontwikkeling van de bodemdalingssom gering zal zijn. Kruip kan wel voor een vertraging in de ontwikkeling van de bodemdalingssom zorgen.



Figuur 5.1 Effect van toenemende plasticiteit van de zoutlaag op de bodemdalingskom. De plasticiteit neemt toe naarmate de cohesieparameter verlaagd wordt. De bodemdaling in het centrum van de kom kan maximaal 35% hoger worden dan in de elastische berekening. De straal van de kom wordt kleiner.

5.3 Bodemdalingskom

5.3.1 Ontwikkeling in de tijd

De bodemdalingsberekeningen bestaan uit een oppervlakte-bodemdalings-grid die de bodemdalingskom weergeven rondom het depletierend N05-A-gasveld en de omliggende prospects. Twee situaties zijn doorgerekend:

1. Winning per prospect, met de meest waarschijnlijke compactiecoëfficiënt bepaald uit de gesteentemonsters van $0,035 \text{ GPa}^{-1}$ (Tabel 3.3).
2. Alle prospects zijn gasvoerend en er wordt gelijktijdige gas gewonnen uit alle prospects. Deze situatie is doorgerekend met een bandbreedte van compactiecoëfficiënten (Tabel 3.3).

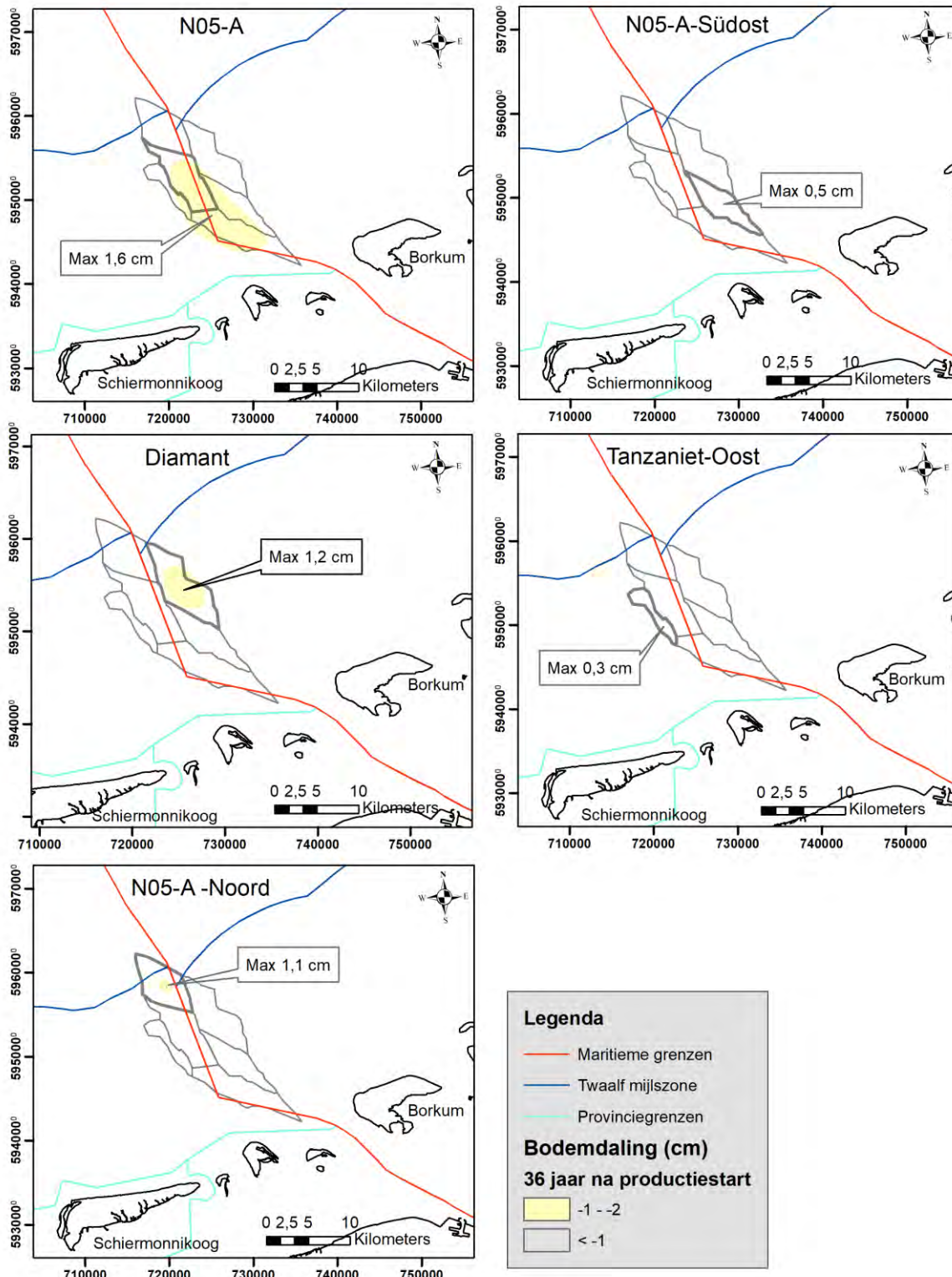
Bij de winning per prospect zijn N05-A en Smaragd samen genomen, omdat het watervoerende reservoir in Smaragd zeer waarschijnlijk in contact staat met het watervoerende deel van het reservoir in het N05-A-gasveld (bron: ONE-Dyas), waarbij drukverlaging kan plaatsvinden in Smaragd door onttrekking in het N05-A-gasveld. De overige prospects staan niet met elkaar in verbinding en zijn derhalve opzichzelfstaand beschouwd.

Het bodemdalingsgrid is berekend op basis van door ONE-Dyas geleverde dPh-grids van verschillende tijdstappen en in de eindsituatie na 36 jaar depletie en op basis van de vier compactiecoëfficiënten.

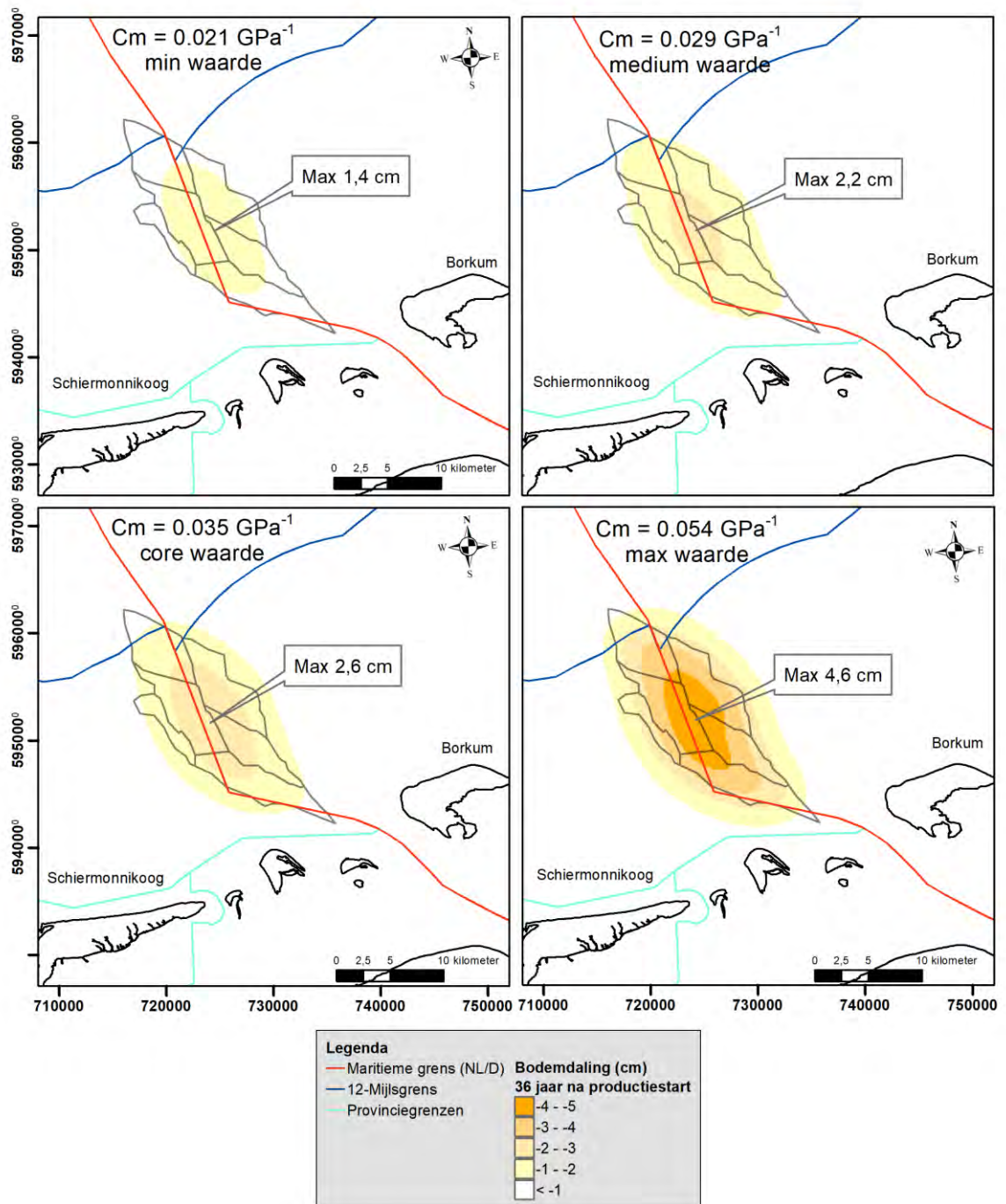
Figuur 5.2 toont de verwachte bodemdalingskom per prospect voor de meest waarschijnlijke compactiecoëfficiënt bepaald uit de gesteentemonsters van $0,035 \text{ GPa}^{-1}$. De grootste bodemdaling treedt op bij het N05-A-gasveld en bedraagt in het centrum van de kom 1,6 cm.

Figuur 5.3 (linksonder) toont voor de compactiecoëfficiënt van $0,035 \text{ GPa}^{-1}$ de bodemdaling voor de situatie van gasvoerende prospects en gelijktijdige winning uit alle prospects. In dit geval bedraagt de maximale bodemdaling in het centrum van de kom 2,6 cm. De overige panelen in deze figuur geven de bodemdaling weer voor de bandbreedte aan compactiecoëfficiënten. De bodemdaling voor $C_m = 0,054 \text{ GPa}^{-1}$ (rechtsonder) is te beschouwen als het worstcasescenario.

Figuur 5.2 en Figuur 5.3 geven de maximale uitbreiding van de bodemdalingskommen weer. Wanneer de zoutlaag volledig plastisch zou reageren, gecombineerd met de meest waarschijnlijke compactiecoëfficiënt van $0,035 \text{ GPa}^{-1}$ zou de daling in het centrum van de kom bij winning per prospect 0,6 cm bedragen bij N05-A bij gelijktijdige winning uit alle prospects 0,9 cm (zie Figuur 5.1). De omvang van de kom wordt theoretisch kleiner, maar verwacht wordt dat verschillen met de voorspelde elastische contouren zo klein zijn dat deze niet meetbaar zijn.

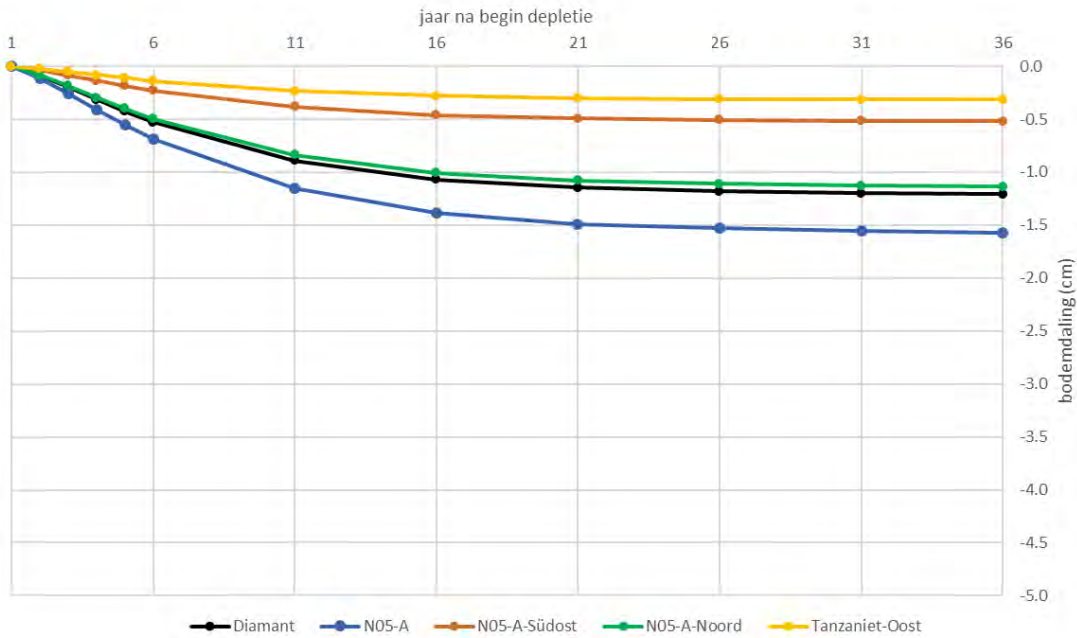


Figuur 5.2 Bodemdaling (cm) voor het N05-A-gasveld en omliggende prospects bij winning per prospect, tijdstip = einde productie met maximale gaswinningsscenario voor de meest waarschijnlijke compactiecoëfficiënt uit de gesteentemonsters van $\alpha_{C_m} = 0,035 \text{ GPa}^{-1}$. Het centrum van de bodemdalingskom is aangegeven met een pijl.

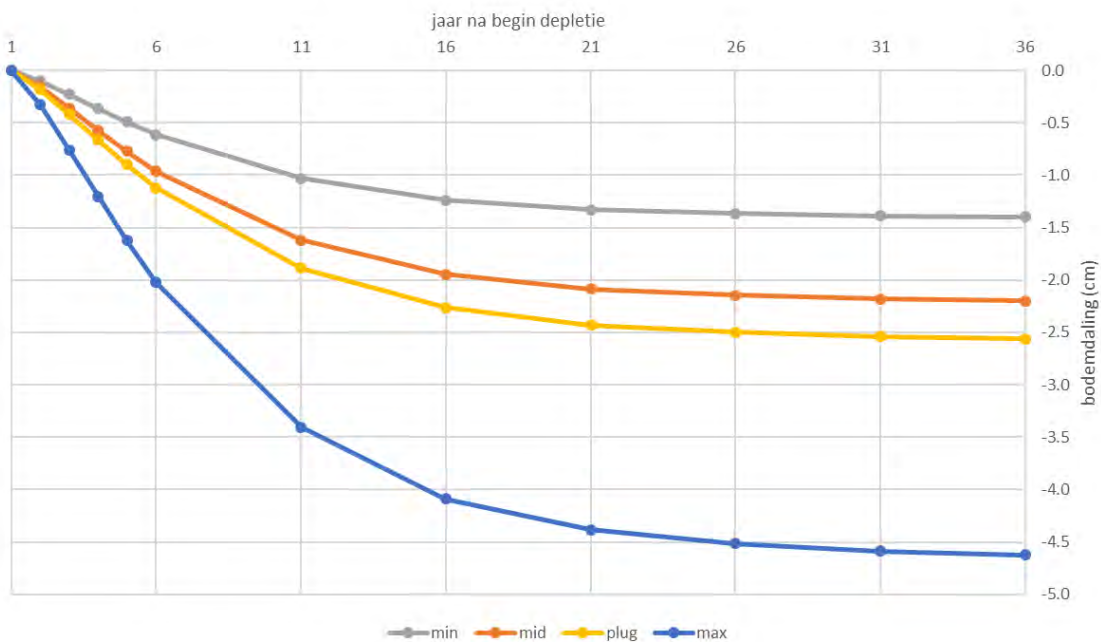


Figuur 5.3 Bodemdaling (cm) voor het N05-A-gasveld en omliggende prospects bij gasvoerende prospects en gelijktijdige winning uit alle prospects, tijdstip = einde productie met maximale gaswinningscenario voor de vier verschillende compactie coëfficiënten: $C_m = 0,021 \text{ GPa}^{-1}$ (boorgatmetingen), $C_m = 0,029 \text{ GPa}^{-1}$ (boorgatmetingen), $\alpha C_m = 0,035 \text{ GPa}^{-1}$ (gebaseerd op geomechanische gesteentepug data), $C_m = 0,054 \text{ GPa}^{-1}$ (Routine kernanalyse).

Het tijdsverloop van de bodemdaling per prospect voor de meest waarschijnlijke compactiecoëfficiënt van $0,035 \text{ GPa}^{-1}$ is weergegeven in Figuur 5.4 en voor gelijktijdige winning uit alle prospects voor de range aan compactiecoëfficiënten in Figuur 5.4. In beide figuren is dezelfde verticale schaal aangehouden.



Figuur 5.4 Bodemdalingcurven voor het centrum van de kom bij winning per prospect en de meest waarschijnlijke compactiecoëfficiënt op basis van de gesteentemonsters.



Figuur 5.5 Bodemdalingcurven voor het centrum van de kom bij gelijktijdige winning uit alle prospects voor de vier verschillende opties voor compactiecoëfficiënten en overige gesteentemechanische parameters voor N05-A en omliggende prospects, maximale gaswinningsscenario.

5.3.2 Volume bodemdalingskom

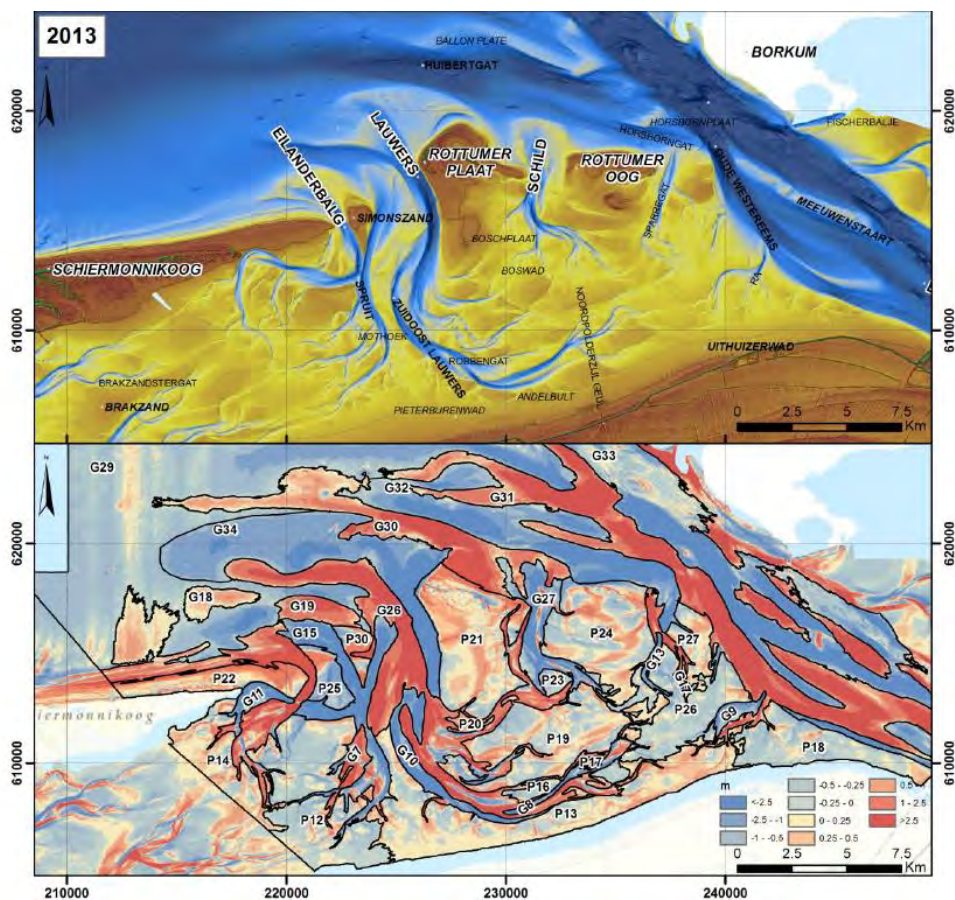
Het volume van de bodemdalingskom voor de verschillende situaties is opgenomen in Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Volume bodemdalingskom na 36 jaar gaswinning voor verschillende situaties

Situatie		Volume (10 ⁶ m ³)	Volume (10 ³ m ³ / jaar)
Per prospect, $C_m = 0,035 \text{ GPa}^{-1}$	N05-A	2,4	69
	N05-A-Noord	0,8	23
	N05-A-Südost	0,5	12
	Tanzaniet-Oost	0,2	7
	Diamant	1,2	33
Gasvoerend, gelijktijdige winning uit alle prospects, $C_m = 0,035 \text{ GPa}^{-1}$		4,5	124
Gasvoerend, gelijktijdige winning uit alle prospects, $C_m = 0,054 \text{ GPa}^{-1}$ (worst case)		5,3	147

Over 36 jaar gemiddeld bedraagt het volume maximaal $0,124 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per jaar voor gasvoerende prospects en gelijktijdige winning uit alle prospects bij een C_m van $0,035 \text{ GPa}^{-1}$. Door de natuurlijke dynamiek van de zeebodem treedt er sedimenttransport op. Uit de studie van Vermaas & Marges (2017) blijkt dat tussen 1990 en 2013 variaties in de zeebodemhoogte plaats hebben gevonden in het gebied ten noordwesten van de Rottumerplaat (Figuur 5.6) in de orde van +0,5 tot -0,5 m. De belangrijkste trend is afname van sedimentvolume in geulen en een toename op platen. De netto sedimentvolume verandering tussen 1990 en 2013 bedroeg in dit gebied maximaal $1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per jaar.

Uitgaande van de dynamiek van de zeebodem en de gemeten variaties in sediment volume lijkt het onwaarschijnlijk dat het netto-effect van de bodemdaling als gevolg van gaswinning meetbaar is.



Figuur 5.6 Morfologie van de zeebodem ten zuiden van het N05-A-gasveld en omliggende prospects. rond 1990 en 2013 (samengestelde dataset 2012 – 2014, voor het dit gebied komt de data uit 2013) en verschilkaart met gebiedsnummers voor platen en geulen (Uit Vermaas en Marges, 2017). De natuurlijke variatie van de zeebodem ligt tussen +2,5 en -2,5 m tussen 1990 en 2013. In het noordoosten van dit gebied, richting de gasveld, liggen de waarden tussen +0,5 en -0,5 m.

5.3.3 Helling zeebodem Riffgat

Ter plaatse van het windpark Riffgat is de helling van de zeebodem op basis van de grootste bodemdalingsskom berekend. De maximale helling bedraagt 0,0004 graden. Gezien de morfodynamiek van zeebodem is deze helling verwaarloosbaar.

5.3.4 Vergelijking met andere velden

De verwachte bodemdaling voor het N05-A-gasveld en omliggende prospects is vergeleken met de verwachte bodemdaling voor diverse andere kleine velden in Nederland. Het resultaat is samengevat in Tabel 5.3. Met uitzondering van het ter vergelijking toegevoegde Q16-Maasveld dat een Boven-Triasreservoir betreft, zijn het velden en clusters van een vergelijkbare uitbreiding met Rotliegend-reservoirsteente van vergelijkbare ouderdom. Hieruit blijkt dat een kleine bodemdaling verwacht wordt in vergelijking met de andere kleine velden. Deze relatief geringe bodemdaling is voornamelijk te verklaren door de geringere dikte van het reservoir en de lagere initiële reservoirdruk in N05-A ten opzichte van deze referentievelden. De gasvoorkomens Nes, Moddergat, Lauwersoog, Anjum, N07-FA en Ameland hebben alle hogere initiële drukken (480 – 570 bar) en grotere reservoirdikte (50 tot >110m, inclusief Munnikezijl) (nlog.nl).

Tabel 5.3 Vergelijking verwachte berekende bodemdaling van kleine velden. Bron: nlog.nl.

Gasveld	Maximum bodemdaling (cm, afgerond)	Straal 2 cm contour (km)	Opmerking
N05-A en omliggende prospects, alle prospect gasvoerend, gelijktijdige winning	2,6	6-12	Cluster
N05-A en omliggende prospects, per prospect	1,6	Niet van toepassing	
N07-FA, Ameland	totaal 40	6	Cluster
Lauwersoog	2	3	
Moddergat, Nes, Anjum	19	5	Cluster
Munnikezijl	11	5	
Blija-Zuidoost	2	1	Afwijkende drukval: ca 150 bar
Middelie	5	5	
Q16-Maas	2	6	Boven-Trias

6 Conclusies

Dit rapport beschrijft de inschatting van het aardbevingsrisico en de bodemdalingsprognose voor het N05-A-gasveld en omliggende prospects. De aanleiding voor de studie is het voornemen van ONE-Dyas om een winningsplan in te dienen voor het N05-A-gasveld.

Aardbevingsrisico

Aan de hand van de Methodiek voor Risicoanalyse over geïnduceerde bevingen door gaswinning (DHAIS, van Eijs et al.; 2004, van Thienen-Visser et al., 2012; Staatstoezicht op de Mijnen, 2016) is een analyse gemaakt van de kans op een aardbeving. Deze analyse is gemaakt voor het maximale gaswinningsscenario. Samengevat gaat dit scenario uit van maximale schatting van depletie in N05-A en alle omliggende prospects en die vanaf de N05-A platformlocatie kan worden aangeboord. Uit de strikte toepassing van DHAIS blijkt dat de kans op het optreden van een aardbeving verwaarloosbaar is voor prospects N05-A, N05-A-Noord en Diamant en 19% bedraagt voor prospects Tanzaniet-Oost en N05-A-Südost. Op basis van aanvullende informatie ter plaatse van de prospects, gericht op de Young's modulus van het reservoir en de overburden, kan echter worden vastgesteld dat de kans op het optreden van een aardbeving naar beneden bijgesteld kan worden tot verwaarloosbaar voor alle prospects.

Bodemdalingsprognose

Er is een prognose gemaakt van de bodemdaling aan het oppervlak (zeebodem) voor het depleterend veld in het maximale gaswinningsscenario aan het eind van de productie. De bodemdaling is gemodelleerd door de daling van een aantal nucleus-reservoirs te superponeren en vervolgens te verdelen over de totale oppervlakte van het gasveld. De berekening is uitgevoerd voor een bandbreedte van compactiecoëfficiënten. Op basis van deze berekeningen bedraagt de verwachte bodemdaling bij een compactiecoëfficiënt van $0,035 \text{ GPa}^{-1}$ in het centrum van de kom 1,6 cm voor het gasveld N05-A afzonderlijk en 2,6 cm inclusief de omliggende prospects.

Het reservoirgesteente wordt bedekt door een dikke laag Rotliegend-kleisteel/zout en Zechstein-zout. Het effect daarvan op de bodemdaling is onderzocht. Dat is gebeurd in een modelberekening waarin het zout volledig plastisch vervormt. In dit uiterste geval kan in het centrum van de bodemdalingsskom een 35% grotere daling optreden, wat voor de meest waarschijnlijke compactiecoëfficiënt van $0,035 \text{ GPa}^{-1}$ neerkomt op een maximale bodemdaling van 2,2 cm voor gasveld N05-A afzonderlijk of 3,5 cm inclusief omliggende prospects. In beide gevallen zal de straal van de bodemdalingsskom kleiner worden.

7 Referenties

Burgess, C.L., Clever, J.E., Corcoran, O.J., Cram, F.M., Hall, N.T. and Lunn, S.F (2018). Seismic discrimination of an overlooked basal Rotliegend reservoir opens a new play in the Dutch offshore, First Break December 2018

van Eijs, R.M.H.E., F.M.M. Mulders, M. Nepveu (2004). Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit. TNO rapport NITG 04-171-C d.d. 7 april 2004.

de Lange, G., & Creusen, A. (2017). Bodemdaling en aardbevingsrisico Q16-Charlie-Noord. Deltares; rapportnummer 11200728-002-BGS-0002.

de Lange, G., & Luger, D. (2012). Bodemdalingstudie ONE Q16 Maasveld. Deltares; rapportnummer 1206772-000-BGS-0012.

de Lange, G., Kruiver, P.P., et al. (2013). Nadere analyse trillingsrisico gasveld Q16-Maas - voor kademuur en waterkering. Deltares; rapportnummer 1208139-000-BGS-0009.

Eissa, E.A., & Kazi, A. (1988). Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 25-6.

Dietl, C. (2019). Poroelastic parameters N05-01-S1. Heiligenstadt, Duitsland: Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns.

Fjaer, E. H. (2008). Petroleum related rock mechanics (2nd edition ed., Vol. Developments in Petroleum Science 53). Amsterdam: Elsevier.

Hanks, T., and H. Kanamori (1979), Moment magnitude scale, J. Geophys. Res. 84, 2348-2350.

Hettema, M., de Pater, C. (1998). The poromechanical behaviour of Felser sandstone: stress- and temperature-dependent. SPE/ISRM Eurock, (pp. 347-355). Trondheim Norway.

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.

Staatstoezicht op de Mijnen. (2016). Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning. Den Haag: Staatstoezicht op de mijnen.

Pluymaekers, M.P.D., J.C. Doornenbal, H. Middelburg (2017). Velmod-3.1. TNO report 2017 R11014 with erratum page 67 Final. Data van nlog.nl

van Thienen-Visser, K., Nepveu, M., Hettelaar, J. (2012). Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland. TNO; rapportnummer 2012 R10198. www.nlog.nl

Vermaas, T., Marges, V. (2017). Volumeanalyse oostelijke Wadden. Deltares; rapportnummer 1230043-003-ZKS-0001.

Software

Plaxis (2018), versie 2018

A Samenvattingstabellen gesteenteonderzoek

Tabel 5 en 6 uit het rapport (Dietl, 2019) zijn opgenomen in deze bijlage.



1836 Poroelastic parameters N05-01-S1

Table 5: Summary results of the compressibility tests.
 In case of specimen 1836_PSD4_06 the Biot coefficient had to be calculated based on c_{sp} , because c_{bc} was not determined. The relevant α value is shown in red. Consequently, for core sample 1836_PSD4 four compressibility tests were done.

specimen	grain compressibility	bulk compressibility at constant pore pressure	bulk compressibility at constant confining pressure	Biot coefficient	Pore volume compressibility at changing pore pressure (suffix letter "d" for depletion and "i" for inflation)				Constant compaction coefficient (suffix letter "d" for depletion and "i" for inflation)				Horizontal depletion constant	
	c_g [MPa ⁻¹]	c_{bc} [MPa ⁻¹]	c_{sp} [MPa ⁻¹]		c_{spd} [MPa ⁻¹]	c_{spid} [MPa ⁻¹]	c_{spd} [MPa ⁻¹]	c_{spid} [MPa ⁻¹]	c_{ind} [MPa ⁻¹]	c_{mid} [MPa ⁻¹]	c_{ind} [MPa ⁻¹]	c_{mid} [MPa ⁻¹]	γ 01	γ 02
1836_PSD2_01	1.33E-04	2.77E-04	1.95E-04	0.52	2.15E-03	2.10E-03	2.11E-03	2.11E-03	2.00E-04	1.02E-04	1.18E-04	1.01E-04	0.83	0.76
1836_PSD2_02	9.05E-05	1.65E-04	1.22E-04	0.45	2.72E-03	2.67E-03	2.68E-03	2.68E-03	1.42E-04	9.13E-05	9.61E-05	9.18E-05	0.74	0.65
1836_PSD2_04	1.38E-04	1.97E-04	1.28E-04	0.30	2.22E-03	2.15E-03	2.15E-03	2.15E-03	1.28E-04	8.33E-05	8.68E-05	8.10E-05	0.68	0.69
1836_PSD4_06	6.79E-05	-	8.28E-05	0.18	1.95E-03	1.94E-03	1.90E-03	1.90E-03	4.02E-05	5.39E-05	4.99E-05	4.61E-05	0.60	0.59
1836_PSD4_07	1.20E-04	1.33E-04	8.87E-05	0.10	1.62E-03	1.59E-03	1.60E-03	1.59E-03	6.66E-05	4.29E-05	4.80E-05	4.10E-05	0.62	0.58
1836_PSD4_08	1.11E-04	1.13E-04	7.49E-05	0.02	1.59E-03	1.57E-03	1.57E-03	1.57E-03	7.70E-05	5.56E-05	5.87E-05	5.42E-05	0.74	0.69
1836_PSD4_09	7.40E-05	1.25E-04	8.43E-05	0.41	1.84E-03	1.82E-03	1.81E-03	1.81E-03	7.10E-05	3.66E-05	4.03E-05	3.54E-05	0.71	0.67



Generaal Dr. Eberhard Jahnke

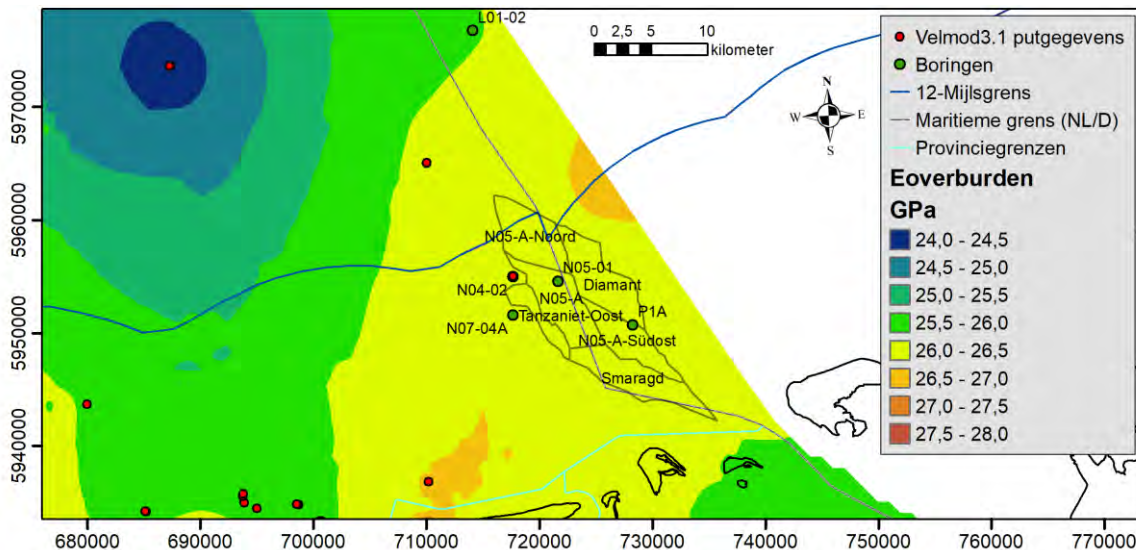
1836 Poroelastic parameters N05-01-S1

Table 6: Compilation of all strength test results.

Green background: Brazilian tests; beige background: single-stage tests. Dimensional data are measured immediately before testing. All strength data – besides the ones determined by Mohr-Coulomb analysis (i.e. cohesion and [internal] friction angle) – were calculated based on total stress; Mohr-Coulomb data were determined based on effective stress. Effective stresses for the determination of the peak Mohr-Coulomb parameters were calculated applying the Biot coefficients gained from compressibility testing. Only in case of specimen 1836_PS02_03 an average Biot coefficient from the three measured ones of 0.42 was used. For the residual Mohr-Coulomb data a Biot coefficient of 1 was assumed, since pore pressure effectiveness on an already established fracture plane can be assumed to be at 100%. In case of core sample 1836_PS04 the Mohr-Coulomb analysis under residual conditions is based on only three Mohr circles, because the Mohr circle for plug 1836_PS04_09 has a very big diameter and does not fit very well with the three remaining Mohr circles (see also Appendix F). Consequently, only a linear and not a bilinear shear straight was calculated leading to only one residual data set.

specimen	length [mm]	diameter [mm]	start test mass [g]	test density [g/cm ³]	confining pressure [MPa]	pore pressure [MPa]	tensile strength [MPa]	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	peak compressive strength [MPa]	residual compressive strength [MPa]	peak friction angle (residual in brackets) [°]	peak friction coefficient (residual in brackets) [°]	peak cohesion (residual in brackets) [MPa]	peak unconfined compressive strength (residual in brackets) [MPa]
1836_PS02_01	50.72	25.30	58.94	2.31	15	10	-	3.40	0.22	49.44	38.96	φ 1: 35.3 ± 1.5° φ 2: 9.1 ± 5.6° (φ 1: 38.7 ± 1.0° φ 2: 24.3 ± 2.1°)	μ 1: 0.71 μ 2: 0.16 (μ 1: 0.80) (μ 2: 0.42)	S_0 1: 1.9 ± 1.3 S_0 2: 35.9 ± 8.5 (S_0 1: 2.0 ± 0.7) (S_0 2: 15.0 ± 2.2)	C_0 1: 7.35 C_0 2: 84.22 (C_0 1: 8.33) (C_0 2: 46.46)
1836_PS02_02	50.71	25.29	59.14	2.32	30	20	-	5.33	0.07	102.23	73.56				
1836_PS02_03	50.63	25.30	58.41	2.29	45	25	-	7.02	0.05	142.26	119.59				
1836_PS02_04	50.82	24.51	60.46	2.52	60	30	-	8.53	0.07	163.47	148.61				
1836_PS02_05	18.36	25.42	20.95	2.25	-	-	1.43								
1836_PS04_06	50.84	25.32	64.12	2.50	15	10	-	7.78	0.11	126.87	43.96				
1836_PS04_07	50.72	25.32	63.95	2.50	30	20	-	9.86	0.11	165.61	73.89				
1836_PS04_08	50.71	25.34	64.03	2.50	45	25	-	11.67	0.06	220.49	108.51	φ 1: 47.3 ± 4.1° φ 2: 34.6 ± 2.0° (φ : 32.1 ± 1.9°)	μ 1: 1.08 μ 2: 0.69 (μ : 0.63)	S_0 1: 7.6 ± 3.1 S_0 2: 17.9 ± 4.0 (S_0 : 5.2 ± 1.1)	C_0 1: 38.89 C_0 2: 68.19 (C_0 : 18.80)
1836_PS04_09	50.71	25.34	64.06	2.50	80	40	-	12.47	0.05	321.94	245.40				
1836_PS04_10	19.46	25.34	24.43	2.49	-	-	5.94								

B Relatieve stijfheid berekeningen kaarten en aanvullende data



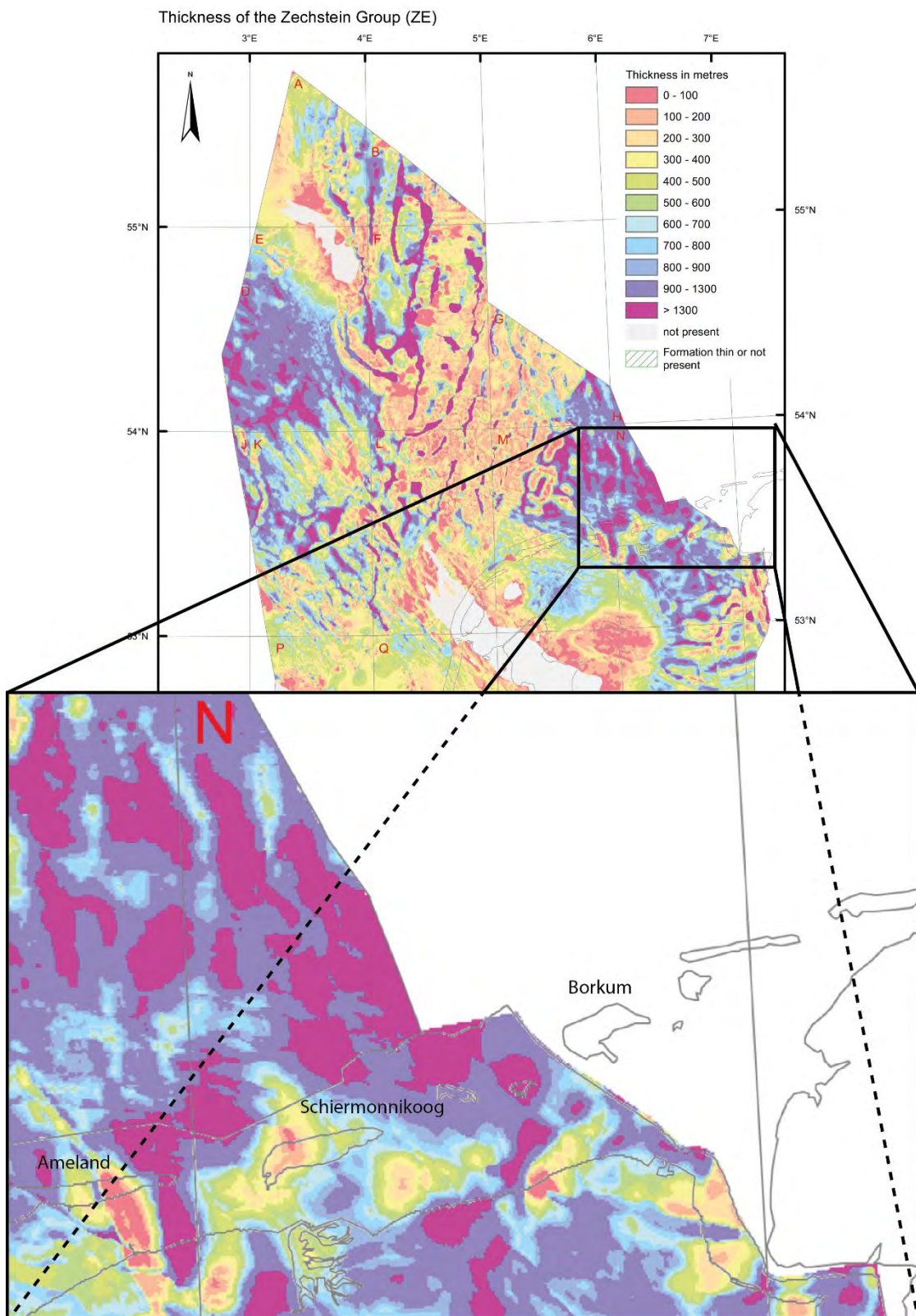
Figuur B.1 Statische Young's Modulus van de overburden, gebruikmakend van VELMOD 3.1 (nlog.nl) en gegevens van toegevoegde putten.

Tabel B.1 Vp (m/s) van de Zechstein Group en Silverpit Fm. in de twee putten in Duitse wateren en nieuwe Nederlandse put

	Vp Zechstein	Vp Silverpit
N05-01-S1	4588	4231
P1A	4500	4298
L01-02	4454	4098

Tabel B.2 Parameters van de Zechstein Group en Silverpit Fm. gebruikt voor de E-ratio berekeningen

Parameter	Waarde
Zechstein dichtheid (kg/dm ³)	2,25
Zechstein Poisson ratio (-)	0,26
Zechstein V _s (m/s)	2585
Silverpit dichtheid (kg/dm ³)	2,62
Silverpit Poisson ratio (-)	0,26
Silverpit V _s (m/s)	2396



Figuur B.2 Diktekaart van de Zechstein Group (Bron: https://www.nlog.nl/sites/default/files/ze_thick_jan2012_offsh.pdf). De gebieden met hoge E_{stat} waarden in figuur B.2 bij Ameland, Schiermonnikoog en ten zuidwesten ervan zijn het gevolg van de geringe dikte van Zechstein Group.