

Retouradres: Postbus 80015, 3508 TA Utrecht

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectdirectie Gastransitie
Groningen
T.a.v. mevrouw [REDACTED]
Postbus 20401
2500 EK DEN HAAG

**Onderwerp**

Advies vaststellingsbesluit Groningen gasveld 2020/2021

Geachte mevrouw [REDACTED]

Per brief met kenmerk DGKE-PGG / 20067835 d.d. 31 maart 2020 heeft u aan TNO-AGE, conform de mijnbouwwet, gevraagd te adviseren over de 'verwachte bodembeweging' in relatie tot de 'gevolgen daarvan voor omwonenden en gebouwen', en daarbij in het bijzonder aandacht te besteden aan de volgende aspecten:

1. Nadere duiding van de twee door NAM voorgestelde inzetstrategieën vanuit het oogpunt van veiligheid.
2. Beoordeling van de aangepaste modelonderdelen die ten grondslag liggen aan de uitkomst van HRA 2020.
3. Beoordeling van de gemodelleerde bodemdaling in relatie tot de GPS meetgegevens.

In de bijgevoegde notitie treft u ons advies aan. De hoofdpunten hiervan zijn hieronder puntsgewijs samengevat:

1. Op basis van de voorgelegde documentatie en de resultaten uit de aangepaste modellen ziet TNO geen aanleiding de huidige operationele strategie te wijzigen en adviseert daarom voortzetting van operationele strategie 1 voor gasjaar 2020-2021.
2. TNO heeft bezwaren tegen het nieuw geïntroduceerde seismologisch model versie 6 en wijst het gebruik hiervan in de huidige vorm af. Hoewel het nieuwe model fysisch goed is onderbouwd, komt de empirische en statistische onderbouwing, ook in relatie tot de door NAM onderzochte alternatieve modellen, onvoldoende naar voren. Het nieuwe model beschrijft de waargenomen seismiciteit goed, maar de voorspellende waarde van het model is zwak. Het effect hiervan op de risicoschatting is groot. De prognoses van dit model zijn zeer gevoelig voor de hoogst waargenomen magnitude. De maximale magnitude verdeling zoals opgenomen als onafhankelijke risicofactor in de beslisboom speelt nagenoeg geen rol meer. TNO is van mening dat de maximale magnitude verdeling aan herziening toe is en stelt voor om dit expliciet en transparant te herzien in de beslisboom.

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Contactpersoon**E-mail****Doorkiesnummer****Projectnummer**

060.43342/01.07.04

Uw referentie

DGKE-PGG / 20067835

Op opdrachten aan TNO zijn de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, zoals gedeponeed bij de Griffie van de Rechtbank Den Haag en de Kamer van Koophandel Den Haag van toepassing. Deze algemene voorwaarden kunt u tevens vinden op www.tno.nl.
Op verzoek zenden wij u deze toe.

Handelsregisternummer 27376655.

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

2/34

TNO adviseert het gebruik van het geactualiseerde grondbewegingsmodel versie 6. Dit model komt beter overeen met geregistreerde bodembewegingen dan versie 5, die gebruikt is voor de HRA 2019. TNO adviseert de geconstateerde gebreken ten aanzien de 'kleine rek demping' en de invloed hiervan op de seismische dreiging nader te onderzoeken.

Ten aanzien van het schademodel zijn in versie 7 de kwetsbaarheid en consequentie modellen voor een zevental gebouwtypologieën aangepast. Over het algemeen zijn deze aanpassingen een verbetering. Wel zijn er een aantal inconsistenties geconstateerd in de afleiding van de kwetsbaarheidsfuncties. Correctie hiervan leidt tot een verhoging van het risico.

TNO adviseert om ook de overige gebouwtypologieën volgens de nieuwe risico aanpak uit te voeren en onzekerheden expliciet en eenduidig mee te nemen.

Op basis van de beoordeling van de modellen die ten grondslag liggen aan de HRA 2020 resultaten schat TNO het seismisch risico hoger in dan gerapporteerd in HRA 2020. Binnen het beperkte tijdsbestek van dit adviestraject is het voor TNO niet mogelijk om dit te kwantificeren in een aantal huizen dat niet aan de gestelde risiconorm voldoet.

Wel kan een bandbreedte van de verwachtingswaarde van het Plaatsgebonden Individueel Risico aangegeven worden. Hierbij is de uitkomst van de HRA 2020 feitelijk de absolute ondergrens van deze bandbreedte. TNO verwacht dat het risico dat bepaald is in HRA 2019 voor gasjaar 2019-2020 een aannemelijke bovengrens van de bandbreedte vormt.

Vooralsnog heeft TNO geen indicatie dat een hogere inschatting van het seismisch risico invloed heeft op haar overwegingen om de huidige operationele strategie ook komend gasjaar voort te zetten.

3. De GPS-stations die over een meetreeks vanaf 2014 beschikken laten in het algemeen een goede passing zien ten opzichte van het bodemdalingsmodel. Uitzondering hierop is de meetreeks van het GPS-station Ten Post. TNO adviseert de oorzaak van de afwijkende trend in deze bodemdalingsmeetreeks nader te onderzoeken. Dit komt ten goede van de kwaliteit van het bodemdalingsmodel en daarmee de bodemdalingsprognose.

Met vriendelijke groet,

TNO advies operationele strategieën & HRA Groningen gasjaar 2020-2021

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

3/34

In dit advies worden hoofd- en deelvragen behandeld zoals aan TNO gesteld op 31 maart jl.

Uitgangspunt voor de beantwoording van de vragen is de door NAM opgestelde dreigings- en risicoanalyse. TNO heeft controle-berekeningen uitgevoerd.

TNO heeft voor de beantwoording van deze vragen de volgende aanvullende documenten verkregen van de NAM:

- NAM (2019) Stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken 2019 – Toelichting methodiek en toepassing op de meetregisters “Noord Nederland, Groningen en Waddenzee 2018” en “Zuid-Holland 2017”. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 12 juli 2019, EP20190621048
- Jaarlijkse realisaties van de bodemdaling tussen 1965 en 2020 uit het bodemdalingsmodel gebruikt voor de HRA 2020.
- Exposure Database v6-HRA 2019
- Aanvullende documentatie m.b.t. gebouwtypologieën en Exposure Database v7.

1 Operationele Strategie gasjaar 2020-2021

1.1 Vraagstelling

Welke operationele strategie voor het gasjaar 2020 - 2021 geniet vanuit het oogpunt van veiligheid de voorkeur?

- a. In hoeverre leidt de keuze voor één van de operationele strategieën tot verschillen op regioniveau?
- b. Hoe kunnen (mogelijke) verschillen van de operationele strategieën op regioniveau worden verklaard?

1.2 Beantwoording

Alvorens de hoofdvraag te beantwoorden, behandelt TNO eerst de basisdefinitie van veiligheid in relatie tot Operationele Strategie (OS) en vervolgens de feitelijke consequentie van de door NAM voorgelegde Hazard and Risk Assessment (HRA).

1.2.1 Veiligheidsnorm in relatie tot Operationele Strategie

Het gasproductiescenario volgens een vast te stellen OS voor gasjaar 2020-2021 heeft invloed op het plaatsgebonden veiligheidsrisico en de algehele versterkingsopgave. De verwachte seismische dreiging, risico en kans op schade is de modelmatige uitkomst van de HRA van NAM (2020).

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
4/34

Met betrekking tot veiligheid is de gehanteerde risicomaat het aantal gebouwen dat niet voldoet aan de veiligheidsnorm (jaarlijkse kans op overlijden van 10^{-5}) volgens de verwachtingswaarde (P_{mean}) van het Plaatsgebonden Individueel Risico (Local Personal Risk, LPR) gedurende een gasjaar met gemiddelde temperatuur. TNO benadrukt nogmaals (TNO 2018, 2019a) dat alle modelonzekerheden in de P_{mean} zitten en dat het al dan niet expliciet maken van epistemische onzekerheden in de beslisboom een aanzienlijk mate van willekeur bevat, waardoor het opschalen van P_{mean} naar P_{90} niet-eenduidig is. Daarom is het onjuist om "voorzichtigheidshalve" een P_{90} risicomaat te hanteren. Het gebruik van P_{90} als risicomaat geeft een onverantwoorde, subjectieve en niet-éénduidige voorstelling van onveiligheid. Dientengevolge vindt TNO het onverstandig een vast te stellen OS te baseren op het aantal boerderijschuren (URM1F_B) dat niet aan P_{90} voldoet.

TNO adviseert te allen tijde de P_{mean} van de gebruikte risicomaat te hanteren. Een alternatief voor het huidige gebruik van de P_{90} ligt in de toetsing van de modelresultaten aan een signaleringsnorm (bijvoorbeeld een P_{mean} LPR > 10^{-6}) of het gebruik van een koud winter scenario (met een P_{mean} LPR > 10^{-5})

OS1 voor gasjaar 2020-2021 is een feitelijke voortzetting van de huidige OS voor gasjaar 2019-2020, hoewel de volumeverdelingen per cluster aanzienlijk afwijken (NAM 2019, 2020). OS2 is vergelijkbaar met OS1 zonder inzet van het Bierum cluster, waarbij dat volume over de resterende clusters wordt verdeeld. Ook voor OS2 is de volumeverdeling per cluster aanzienlijk afwijkend ten opzichte van gasjaar 2019-2020. Beide OS vergen voor gasjaar 2020-2021 een grotere volumebijdrage uit het Zuidoost cluster en een kleinere bijdrage uit het Zuidwest cluster dan voor gasjaar 2019-2020.

Uit de voorgelegde documentatie (NAM 2020) volgt dat OS1 en OS2 in praktijk dezelfde dreiging, risico en kans op schade opleveren. Alle gebouwen met woonfunctie voldoen aan de veiligheidsnorm zowel voor een warm, gemiddeld en koud scenario voor gasjaar 2020-2021 als voor de 10-jaarsverwachting.

1.2.2 Consequentie opeenvolgende HRA uitkomsten

De uitkomst van NAM 2020 is opmerkelijk. Uit een recente studie (TNO 2020) met andere uitgangspunten dan de voorgelegde NAM documentatie is gebleken dat voor alléén gasjaar 2020-2021 het aantal gebouwen dat niet aan de norm voldoet voor OS2 (Bierum uit) zo'n 40% lager is dan voor OS1 (Bierum aan). De resultaten van de NAM (2020) voor gasjaar 2020-2021 wijken tevens sterk af van de resultaten van de NAM (2019) voor datzelfde gasjaar 2020-2021.

Onderstaande opsomming geeft een kwantitatieve vergelijking¹ tussen de opeenvolgende HRA uitkomsten (NAM (2020) ten opzichte van NAM (2019)) voor hetzelfde gasjaar 2020-2021 voor een gemiddeld temperatuurverloop:

- De GTS-raming voor het benodigd gasvolume voor gasjaar 2020-2021 is met zo'n kwart verlaagd van 12.2 bcm (NAM 2019) naar 9.3 bcm (NAM 2020). Als

¹ Onafhankelijk van de OS: 1) Epistemische onzekerheid geeft een grotere variatie in de modeluitkomst dan het verschil tussen de OS. 2) De cluster volumeverdelingen van OS1 (resp. OS2) volgens NAM 2019 wijken aanzienlijk af van de cluster volumeverdelingen van OS1 (resp. OS2) volgens NAM 2020.

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

5/34

gevolg van voortgaande productie daalt de absolute reservoirdruk weliswaar, maar is huidige prognose van de reservoirdruk in NAM (2020) navenant iets hoger dan de verwachting was in NAM (2019).

- De kans op een beving met magnitude $M \geq 3.6$ is volgens NAM (2020) een factor twee lager dan in NAM (2019). Voor $M \geq 4.0$, $M \geq 4.5$ en $M \geq 5.0$ zijn de kansen zelfs afgenomen met een factor 3, 5 en 7, respectievelijk.
- De verwachte maximale grondversnelling (max PGA) voor 475 jaar herhalingsjijd is grofweg met een vijfde gedaald van 0.14 g naar 0.12 g.
- Het aantal gebouwen dat niet aan de norm voldoet is gedaald van grosso modo 400 naar 0.
- De omvang van verwachte DS1 (Damage State) schadegevallen is met een kwart afgenomen. De kans dat een tiental gebouwen zwaardere schade oploopt binnen het gasjaar is gedaald van 8% naar <3% voor DS2 schadestaat en van 4% naar <1% voor DS3. De kans op zwaardere schade voor een 500-tal gebouwen is gedaald van 2.4% naar 0.4% voor DS2 en van 0.6% naar < 0.1% voor DS3 schadestaat. Uit NAM (2020) volgt dus dat de kans op zware schade aan een aanzienlijk aantal gebouwen binnen het gasjaar 2020-2021 met een factor 6 is afgenomen ten opzichte van de verwachting uit NAM (2019).

Voor de zeer sterk afwijkende verwachting van het veiligheidsrisico zijn vier oorzaken samengevat:

1. De lager geraamde gasproductie in NAM (2020) dan in NAM (2019) leidt tot een beperkt lager risico.
2. Seismisch Bronmodel SSM-V6 in NAM (2020) leidt tot een aanzienlijk lager risico dan het SSM-V5 in NAM (2019).
3. Grondbewegingsmodel GMM-V6 in NAM (2020) leidt tot een hoger risico dan het GMM-V5 in NAM (2019).
4. Schademodel DM-V7 + verschuivingen in de gebouwendatabase in NAM (2020) leiden tot een aanzienlijk lager risico dan DM-V6 in NAM (2019).

Uit de NAM documentatie (NAM 2020) is onduidelijk welk aandeel elke oorzaak exact heeft in de totale vermindering van het risico ten opzichte van de verwachting in NAM (2019) voor gasjaar 2020-2021. Wel is de variatie in de P_{mean} van de LPR per logictree vertakking gekwantificeerd. Uit de gevoeligheidsanalyse kan worden opgemaakt dat de aanpassing in het "magnitude-frequentie model" een bijzonder groot aandeel heeft in de vermindering van het aantal zware bevingen ten opzichte van de verwachting in NAM (2019). Daarnaast hebben de onzekerheid in de "Mmax verdeling" en het "Fragility model" een aanzienlijke invloed. Deze modelaanpassingen hebben tot gevolg dat de verwachte kans op zware schade zeer sterk is afgenomen en ook dat het aantal gebouwen dat niet aan de norm voldoet onverwacht sterk verminderd is. De consequentie hiervan is dat het ontstane "beoogde effect voor de veiligheid" deels door versnelde gasafbouw kan worden verklaard (bovengenoemde oorzaak 1), maar met name voortkomt uit modelaanpassingen (oorzaken 2-4). De invloed van de aangepaste modellen (NAM 2020 tov NAM 2019) wordt in de beantwoording van vraag 2 gedetailleerd beschreven.

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
6/34

1.2.3 Verklaring regionale verschillen

Naast dat het gasproductiescenario volgens de gekozen OS invloed kan hebben op het seismisch risico, kan dit ook leiden tot regionale verschillen. Uit NAM (2020) blijkt dat de regionale verschillen in dreiging, risico en kans op schade, die voortvloeien uit een keuze van de vast te stellen OS niet-significant zijn. De verklaring hiervoor is dat de inzet van Bierum bij OS1 en de hogere bevolkingsdichtheid in het zuidwesten (Groningen stad) geen significante invloed hebben ten opzichte van de autonome drukvereffening van het veld. Dit is een direct gevolg van de lage geraamde gasproductie (bovengenoemde oorzaak 1).

TNO ziet geen aanleiding (op basis van de voorgelegde documentatie en de resultaten uit de aangepaste modellen) de huidige OS te wijzigen en adviseert een voortzetting van OS1 voor gasjaar 2020-2021.

2 Beoordeling modellen

2.1 Vraagstelling

In de HRA van NAM worden nieuwe modellen ingezet voor de verschillende onderdelen (seismologisch model, grondbewegingsmodel en schademodel). Geef een beoordeling van deze aangepaste modellen. In hoeverre zijn de aanpassingen van deze modellen te prefereren boven de modellen die gebruikt zijn in de HRA 2019?

2.2 Beoordeling seismologisch model

In deze beoordeling richten we ons met name op *veranderingen* in het seismisch bronmodel ten opzichte van de versie die gebruikt is voor HRA 2019, maar zullen ook enkele onderwerpen behandeld worden die ook relevant zijn voor oudere versies van het seismisch bronmodel.

Voor de beoordeling van het seismisch bronmodel (Seismic Source Model, SSM) als gebruikt in de HRA ten behoeve van het vaststellingsbesluit 2020 maken we gebruik van de referentie "Evolution of induced earthquake magnitude distributions with increasing stress in the Groningen gas field", by S.J. Bourne and S.J. Oates, November 2019, Restricted Draft, als meegeleverd met de adviesvraag. We verwijzen naar dit document met de afkorting BO19. De versie van het SSM beschreven in BO19 duiden we aan met versienummer V6. Het bronmodel SSM-V6 is een doorontwikkeling van SSM-V5, de versie die is gebruikt voor de HRA ten behoeve van het vaststellingsbesluit 2019. Twee varianten van SSM-V5 zijn eerder gerapporteerd in de wetenschappelijke literatuur (Bourne & Oates, 2017; Bourne et al., 2018). Een technisch rapport met een beschrijving van de implementatie van V5 is beschikbaar in Bourne et al. (2019).

In dit advies wordt de afkorting SSM-V6 gebruikt om het gehele bronmodel mee aan te duiden. SSM-V6 wijkt af van SSM-V5 op de volgende hoofdpunten:

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

7/34

- De uitbreiding van het model voor de frequentie-magnituderelatie met de mogelijkheid voor een spanningsafhankelijke exponentiële taper.
- Het toevoegen van een beslisboomvertakking voor de HRA om zowel een model mét als een model zonder taper in te zetten, met een voorgestelde weging van 80%, respectievelijk 20%.
- Het kalibreren van de frequentie-magnitudemodellen op een ander spanningsveld dan het *activity rate* model.

Andere componenten van SSM-V6 zoals het seismische activiteitsmodel, het *aftershock* model (ETAS) en het *finite rupture* model zijn ongewijzigd ten opzichte van SSM-V5.

2.2.1 Modellen

Aan de basis van de seismische bronmodellen SSM-V5 en SSM-V6 staan twee fysisch-mathematische concepten, te weten het *elastic thin sheet* geomechanisch model voor de spanningstoestand in het gasreservoir ten gevolge van gasonttrekking en het *extreme threshold failure* model voor de kans op falen van bestaande breukelementen – en dus de kans op aardbevingen – ten gevolge van veranderingen in spanningstoestand.

Een belangrijke rol is hierbij weggelegd voor heterogeniteiten in de geologische structuur en/of samenstelling van de gesteenten. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen zogenaamde “gekende” (*resolvable*) en “ongekende” (*unresolvable*) heterogeniteiten. De gekende heterogeniteiten, zoals de grootschalige topografie en breukstructuren van het reservoir, worden opgenomen in het deterministische *elastic thin sheet* (ETS) model dat de plaats- en tijdafhankelijke spanningsverandering simuleert.

De ongekende heterogeniteiten van diverse aard (zoals initiële spanningstoestand, breukgeometrie, gesteente eigenschappen, etc.), worden gerepresenteerd in het probabilistische *extreme threshold failure* (ETF) model. Dat model is gebaseerd op de idee dat het overschrijden van drempelwaarden (*thresholds*) van de spanningstoestand die leiden tot falen/bevingen (*failure*) aanvangt bij exceptionele (*extreme*) ongunstige omstandigheden ten gevolge van de heterogeniteiten. Bij toenemende spanningen komen deze omstandigheden steeds vaker voor, wat leidt tot een exponentiële toename van de seismisch activiteit als ook geobserveerd in Groningen. De modelparameters van het ETF model worden gekalibreerd aan de hand van de geobserveerde aardbevingscatalogus.

Een cruciaal derde onderdeel van de bronmodellen is de probabilistische verdeling van de sterktes van aardbevingen in termen van een seismische-magnitudeverdeling (SSM-V5) en/of een seismisch-momentverdeling (SSM-V6). Dankzij de één-op-één relatie tussen magnitude (momentmagnitude) en seismisch moment zijn deze verdelingen zonder ambiguïteit in elkaar om te zetten.

In SSM-V5 en eerdere versies is voor de beschrijving van de magnitudeverdeling gekozen voor de Gutenberg-Richter (GR) relatie op basis van twee parameters, te weten de b-waarde, die de verhouding tussen lagere en hogere magnitudes bepaalt en de maximale magnitude, een afkapwaarde van de verdeling. De

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
8/34

maximale magnitude is als fundamentele modelonzekerheid vertegenwoordigd als vertakking in de HRA beslisboom. De b-waarde daarentegen wordt gekalibreerd aan de data. Deze wordt spanningsafhankelijk verondersteld, waarbij voor Groningen de b-waarde lijkt te dalen (en het aandeel hogere magnitudes stijgt) bij toenemende spanning. De relatie tussen de b-waarde en de spanning wordt beschreven door het b-waardemodel, waarvan de parameters worden gekalibreerd aan de data. In SSM-V5 is hierbij gekozen voor een *inverse power law*. In SSM-V3 was dit eerder het *hyperbolic tangent* model. Beide modellen komen terug in BO19. In SSM-V6 speelt de zogenaamde *power-law* verdeling van seismische momenten exact dezelfde rol als de GR relatie voor magnitudes. De rol van b-waarde wordt daar overgenomen door de *power-law* exponent β . De onderlinge relatie is eenvoudig:

$$\beta = \frac{2}{3}b.$$

De grootste verandering in SSM-V6 ten opzichte van eerdere versies is de toevoeging van een *exponentiële taper* in de magnitudeverdeling. Een dergelijk taper is vergelijkbaar met een *low-pass* filter voor magnitudes (of momenten) en heeft als doel de relatieve frequentie van hogere magnitudes te verlagen ten opzichte van de GR verdeling. Uitgangspunt daarbij is dat, volgens BO19, op basis van fysische overwegingen gesteld kan worden dat de hogere magnitudes mogelijk oververtegenwoordigd zijn in de standaard GR verdeling. Het taper wordt beschreven met één extra modelparameter, de *exponential taper exponent* ζ , die gerelateerd kan worden aan een typische kantelmagnitude M_c (*corner magnitude*; in BO19 wordt gerefereerd aan het *corner moment*, of kantelmoment, dat omgerekend kan worden in een magnitude). Voor de kantelmagnitude geldt de relatie:

$$M_c = M_0 - \frac{2}{3} \log_{10} \zeta,$$

waar M_0 in dit geval staat voor de compleetheidsmagnitude. Enkele overeenkomstige waarden voor $M_0=1.5$, als in BO19, zijn gegeven in Tabel 1. Net als voor de b-waarde in SSM-V5 al het geval was, wordt in SSM-V6 ook deze kantelmagnitude in zijn algemeenheid spanningsafhankelijk verondersteld.

Tabel 1: Enkele overeenkomstige waarden van de “exponential taper exponent” en de kantelmagnitude, onder de aanname van een compleetheidsmagnitude van 1.5.

<i>exponential taper exponent</i> ζ	kantelmagnitude M_c
1	1.5
10^{-3}	3.5
10^{-6}	5.5
0	∞

De belangrijkste eigenschappen van het SSM-V6 magnitudemodel die TNO in dit advies aan een kritische toets onderwerpt zijn:

- De parameterisatie van het magnitudemodel: hoe wenselijk, dan wel noodzakelijk is de aanwezigheid van het exponentiële taper?
- De spanningsafhankelijkheid: in hoeverre is spanningsafhankelijkheid van de parameters van het magnitudemodel wenselijk, dan wel noodzakelijk?

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

9/34

In de volgende secties gaan we in op zowel de fysische onderbouwing als de empirische en statistische onderbouwing van de modelkeuze.

2.2.2 Fysische onderbouwing

De fysische onderbouwing van de SSM-V6 modelaanpassing wordt in BO19 gegeven in Secties 3, 4 en 7. Secties 3 en 4 geven een overzicht van artikelen in de seismologische literatuur die het al dan niet variëren van de b-waarde (of de *power-law exponent* β) van de frequentie-magnituderelatie onder invloed van variërende spanningscondities bespreken. Tegenover de empirische bewijsvoering voor spanningsafhankelijkheid van de b-waarde van de studies in Sectie 3 worden mogelijke alternatieve verklaringen aangevoerd in Sectie 4, waar de nadruk ligt op mogelijke artefacten ten gevolge van beperkte datasets of analysemethoden. Het belangrijkste fysische alternatief, het spanningsafhankelijke taper, wordt uitgewerkt in Sectie 6 met behulp van een zeer uitgebreide literatuurstudie op het gebied van *statistical mechanics*. Uit deze studie komt overtuigend naar voren dat het voorgestelde *power-law* model met spanningsafhankelijke exponentiële taper vrij universeel toepasbaar is.

In het kader van de toepassing voor de geïnduceerde seismiciteit in Groningen sluit het voorgestelde model conceptueel goed aan bij het ETF model voor de seismische activiteit. Waar het aantal geactiveerde breuksegmenten exponentieel toeneemt in relatie tot de spanningstoename, zal ook de onderlinge connectiviteit van die segmenten toenemen, waardoor geleidelijk de (relatieve) kans op grotere bevingen toeneemt.

De spanningstoestand op basis waarvan de magnitudeverdeling varieert, wordt net als in SSM-V5 berekend op basis van het ETS spanningsmodel. Een interessant punt om op te merken is wel dat het ETS model op twee manieren geconditioneerd wordt alvorens het toe te passen, waarbij de fysische onderbouwing beperkt is. De eerste conditionering is het filteren van breukstructuren op basis van de verhouding tussen breukverzet en reservoirdikte, waarbij breuken met waarden hoger dan een drempelwaarde uit het model worden gelaten. De tweede conditionering is het ruimtelijk uitsmeren (*smoothen*) van lokaal bepaalde spanningswaarden. Wat opvalt is dat de conditioneringsparameters verschillend zijn gekozen voor het ETF model voor seismische activiteit enerzijds en het *power-law* met exponentiële tapermodel voor de magnitudeverdeling anderzijds. Voor beide toepassingen zijn de conditioneringsparameters apart geoptimaliseerd. In feite wordt er dus met twee verschillende spanningsmodellen gewerkt. Dit lijkt de fysische basis van het model enigszins te compromitteren. De auteurs merken aan het eind van Sectie 5 overigens op dat het gebruik van één enkel spanningsmodel voor beide componenten buiten de strekking van het huidige onderzoek lag, maar wel tot een beter forecast-resultaat zou kunnen leiden.

2.2.3 Empirische onderbouwing

Enkele observaties op basis van eenvoudige analyses van de Groningen bevingscatalogus in relatie tot de spanningsontwikkeling volgens het ETS spanningsmodel staan beschreven in BO19 Sectie 6. In Sectie 6.1 wordt de empirische verdeling van magnitudes bestudeerd op basis van een splitsing van

Datum
11 mei 2020

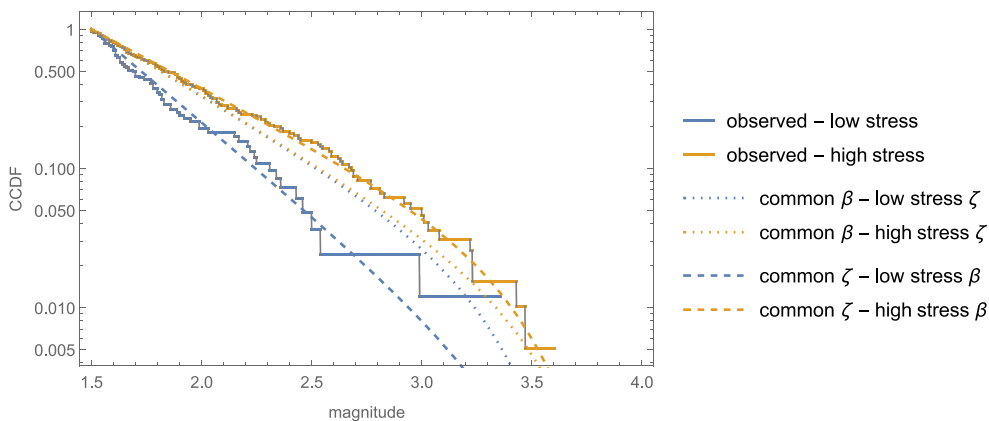
Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
10/34

de bevingen die plaatsvonden onder (relatief) lage en hoge spanningscondities. Figuren 4 en 5 in BO19 tonen aan dat voor een opsplitsing met een drempelwaarde van 0.7 MPa in het spanningsmodel er volgens de *Kolmogorov-Smirnov* test significante verschillen optreden tussen de twee empirische magnitudeverdelingen.

Hoewel TNO de significantie van deze verschillen onderschrijft, merken we op dat het niet zonder meer duidelijk is dat de verschillen samenhangen met de spanningstoestand. Als ook opgemerkt door de auteurs valt de tweedeling samen met een verschillende ruimtelijke verdeling (Figuur 5-rechts in BO19). Het is dus even goed mogelijk dat de verschillen in de empirische magnitudeverdeling veroorzaakt worden door ruimtelijke heterogeniteit.

De empirische magnitudeverdelingen van BO19 Figuur 5-links zijn ook opmerkelijk in het licht van de uiteindelijke conclusie van BO19. Aangezien uiteindelijk als beste model een constante b-waarde en spanningsafhankelijke taper wordt voorgesteld, zou het te verwachten zijn dat de verdeling voor lagere spanningen een getaperde versie van de verdeling bij hogere spanningen zou zijn. Op het oog is een verschil in b-waarde (richtingscoëfficiënt) echter veel waarschijnlijker dan een verschil in taper. Dit is door TNO bevestigd in een statistische analyse: een optimaal model met gemeenschappelijk taper maar een verschil in b-waarde is voor deze tweedeling ongeveer 200 maal zo waarschijnlijk dan een model met gemeenschappelijke b-waarde en een verschillend taper (zie Figuur 1). Dit zou op zichzelf een reden kunnen zijn om het door BO19 geprefereerde model met een constante b-waarde af te wijzen.



Figuur 1: De empirische verdelingen van magnitudes bij een tweedeling in lage en hoge spanningsomstandigheden laten zich aanzienlijk beter beschrijven door een verschil in b-waarde (β) dan door een verschil in taper (ζ).

In BO19 Sectie 6.2 wordt gekeken naar de variaties met geleidelijk toenemende spanning van zowel de *power-law* exponent β als *exponential taper exponent* ζ . In beide gevallen zijn er aanwijzingen voor een dalende trend bij toenemende spanning (Figuur 6 in BO19), hoewel de trends relatief zwak zijn ten opzichte van de grootte van de betrouwbaarheidsintervallen. Voor β is de tweedeling zichtbaar die eerder in Sectie 6.1 werd geadresseerd. Links en rechts van de drempelwaarde 0.7MPa is geen duidelijke trend te zien. Voor ζ geldt dat de trend vrij zwak is ten opzichte van de fluctuaties in de zwarte curve (waarvan niet duidelijk is of het de modus, het gemiddelde of de mediaan van de distributie is).

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

11/34

Ook lijken de dalen in Figuur 6b (in BO19) samen te vallen met het optreden van de sterkste bevingen. Dit geeft een eerste indicatie dat de ζ -parameter vrij gevoelig is voor individuele bevingen. Daarover meer in de volgende paragraaf.

TNO concludeert dat het empirisch bewijs voor de gehanteerde spanningsafhankelijkheid van de magnitudeverdeling beperkt is. TNO onderschrijft dat een tweedeling in lagere en hogere spanningstoestanden een significant onderscheid in magnitudeverdelingen oplevert. Het is echter ook mogelijk dat dit onderscheid veroorzaakt wordt door ruimtelijke heterogeniteit. Het onderscheid zelf laat zich beter beschrijven door een verschil in b-waarde dan door een verschil in kantelmagnitude.

2.2.4 Statistische onderbouwing

Op basis van de fysische overwegingen in BO19 Sectie 7 en ondersteund door de empirische bewijsvoering in Sectie 6, wordt in Sectie 8 een reeks modellen gedefinieerd die op verschillende wijze de spanningsafhankelijkheid van de magnitudeverdeling vorm geven. In Sectie 9 worden de waarschijnlijkheidsverdelingen van de modelparameters op basis van de Groningen dataset rigoureus geschat met behulp van *Bayesian inference*.

In Sectie 11 in BO19 worden de prestaties van de verschillende modellen uiteindelijk vergeleken door middel van een *out-of-sample forecast* competitie. In deze procedure wordt de Groningen dataset grofweg in twee gelijke delen gesplitst, met bevingen van voor, respectievelijk na 1 januari 2013. Vervolgens worden de modelparameters geschat op basis van het eerste deel van de dataset en wordt de kwaliteit van een forecast op basis van deze modelparameters geëvalueerd aan de hand van de tweede, *out-of-sample* dataset.

De modelcompetities van Sectie 11 leiden uiteindelijk tot de conclusie dat de best presterende modellen gekenmerkt worden door een spanningsafhankelijke exponentiële taper en een constante *power-law* exponent. Vervolgens wordt er een voorstel gedaan om twee modellen op te nemen in de beslisboom: één model met een spanningsafhankelijke *power-law* exponent zonder taper en één met een spanningsafhankelijk taper en een constante *power-law* exponent, voorzien van gewichten van respectievelijk 20% en 80%.

Bij deze conclusie in BO19 plaatst TNO in de volgende sectie enkele kanttekeningen, ondersteund door de resultaten van enkele numerieke experimenten.

2.2.5 Kanttekeningen bij de evaluatie van het tapermodel.

Om de prestatie van het exponentiële tapermodel beter te kunnen begrijpen en te duiden heeft TNO een vijftal numerieke experimenten uitgevoerd.

2.2.5.1 Experiment 1

Dit experiment betreft het bepalen van de *a posteriori* waarschijnlijkheidsverdeling van de parameters van het spanningsafhankelijk frequentie-magnitude-model met een exponentiële taper. De frequentie-magnitude verdeling van dit model wordt gegeven door:

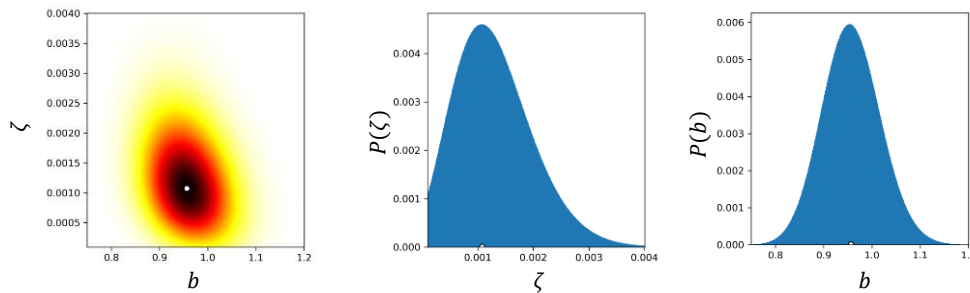
Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
12/34

$$P(m \geq M) = 10^{-b(M-M_{min})} \times e^{-\zeta(10^{1.5(M-M_{min})}-1)}$$

(N.B.: deze formulering is de magnitude-equivalent van de door NAM gehanteerde formulering in termen van seismisch moment (vergelijking 11 in BO19)).



Figuur 2: *A posteriori* waarschijnlijkheidsverdeling van ζ - en b -waarde. Alle bevingen van M1.5 en hoger over de periode 1-1-1995 tot 22-5-2019 zijn hiervoor gebruikt (totaal 279).

De *a posteriori* waarschijnlijkheidsverdeling voor een model met exponentiële taper geeft de hoogste waarschijnlijkheid aan een ζ -waarde boven de nul (zie Figuur 2, equivalent met de derde rij in Figuur 12 van BO19). De waarschijnlijkheid bij $\zeta = 0$ (effectief géén taper) is relatief hoog. Aangezien de fysische onderbouwing van het model negatieve waarden van ζ niet toelaat, zal de gemiddelde *a posteriori* waarde van ζ altijd hoger zijn dan 0, ongeacht of er een taper van toepassing is. De piekwaarde van de verdeling van ζ ligt in de buurt van 0.001, volgens Tabel 1 overeenkomstig met een kantelmagnitude van 3.5. Deze kantelmagnitude ligt dicht in de buurt van de hoogste geobserveerde magnitude van 3.6 (Huizinge). TNO claimt dat de statistische bepaling van de kantelmagnitude tot bias leidt. Dit wordt nader bestudeerd in de volgende experimenten.

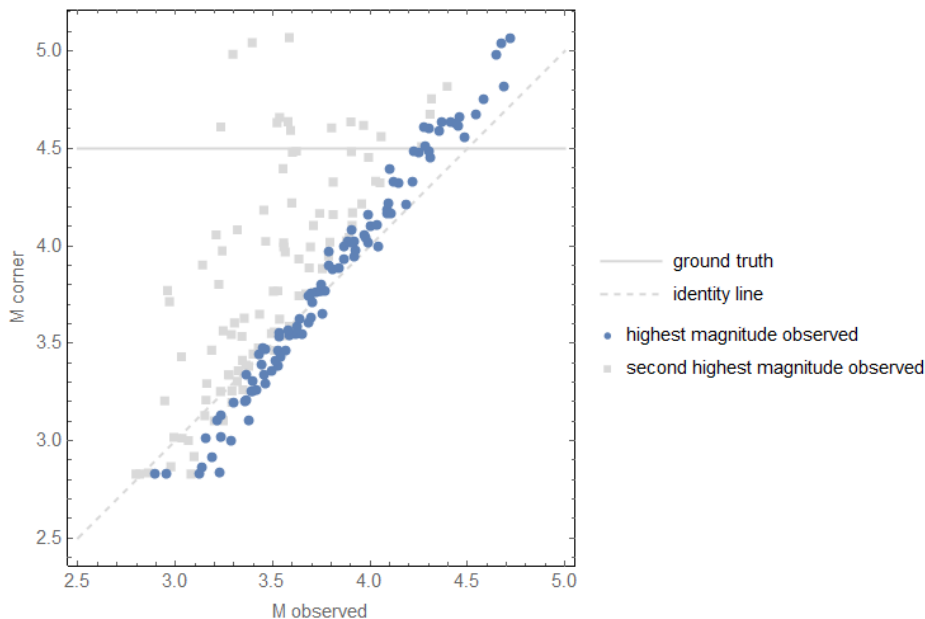
2.2.5.2 Experiment 2

Om de bias in de parameterschatting van het tapermodel nader te bestuderen is een synthetisch experiment uitgevoerd waarbij 100 aardbevingscatalogi ter grootte van de Groningen trainingsdataset zijn gesimuleerd op basis van de “*ground truth*” magnitudeverdeling met een taper met een kantelmagnitude van 4.5. Voor elk van deze catalogi is de kantelmagnitude met maximum *a posteriori* waarschijnlijkheid bepaald en uitgezet tegen zowel de hoogste als de één-na-hoogste magnitude in de catalogus in Figuur 3. Hoewel de “*ground truth*” geldig is voor elke catalogus, wordt de statistisch bepaalde optimale kantelmagnitude voor elke catalogus in zeer sterke mate bepaald door de hoogste aanwezige magnitude. Dit is te zijn aan de sterke correlatie (oplijning) in Figuur 3. Correlatie met de één-na-hoogste magnitude is veel minder sterk.

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
13/34



Figuur 3: Resultaat van Experiment 2. De kantelmagnitude corresponderend met de maximum *a posteriori* waarschijnlijkheid van ζ uitgezet tegen de hoogste (blauwe punten) en de één-na-hoogste (grijze punten) magnitude in 100 synthetische catalogi. De catalogi zijn gesimuleerd op basis van een “*ground truth*” model met kantelmagnitude 4.5.

Dit experiment laat zien dat in ieder geval de piek (modus) in de waarschijnlijkheidsverdeling sterk gebiast is en zich richt naar de hoogste magnitude die in de dataset aanwezig is. Dit gebeurt evenzeer als de “*ground-truth*” kantelmagnitude hoger ligt of zelfs afwezig is. Voor een beoordeling van de bias in de gehele waarschijnlijkheidsverdeling, dus niet alleen in de piek, kijken we naar het volgende experiment.

Het SSM-V6 exponentiële tapermodel heeft, wanneer het getraind wordt op data, een zeer sterke bias. De kantelmagnitude van het taper wordt in hoge mate bepaald door de hoogste magnitude aanwezig in de data.

2.2.5.3 Experiment 3

We bestuderen de inherente bias in het tapermodel aan de hand van een forecastprestatiecompetitie naar voorbeeld van de competities in BO19. Waar BO19 zich volledig richt op prestaties met betrekking tot de Groningen dataset kijken we hier naar groot aantal (1000) synthetische datasets gesimuleerd op basis van een “*ground truth*” model waar in géén taper zit, een *b*-waarde ter hoogte van de optimale *b*-waarde van Groningen, en een maximale magnitude (*M*_{max}) van 5. (We verwachten geen kwalitatief andere uitkomsten voor andere waarden van *M*_{max}). We beschouwen hier ook geen spanningsafhankelijkheid, omdat dit voor het bestuderen van de bias niet relevant is.

Elke synthetische dataset heeft het gelijke aantal bevingen als Groningen en wordt op identieke wijze opgesplitst in een trainingsdataset en een (“*out-of-sample*”) testdataset. Vervolgens wordt elke dataset getraind en getest met zowel een model zonder taper als een model met taper. Hierbij wordt de kwaliteit van de prestatie gekwantificeerd met de gemiddelde waarschijnlijkheid (*likelihood*) van de

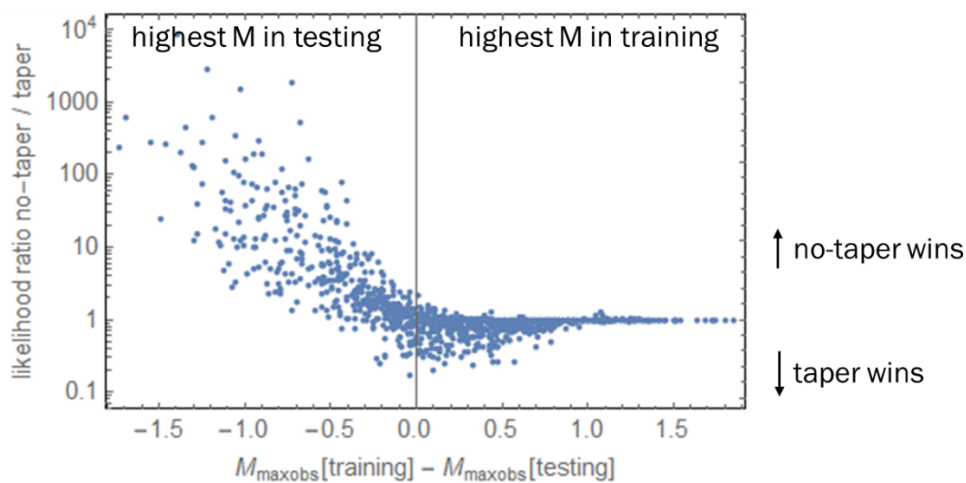
Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
14/34

testdataset op basis van de gehele *a posteriori* waarschijnlijkheidsverdeling afkomstig uit de training. Deze metriek komt overeen met de toepassing van de modellen in de praktijk. Dit is anders, en in onze perceptie meer relevant, dan de competitievorm in BO19, waarbij telkens individuele realisaties uit de *a posteriori* verdelingen met elkaar vergeleken worden. De relatieve prestaties van het taper en het no-taper model worden uitgedrukt in termen van de verhouding in waarschijnlijkheid, de *likelihood ratio*.

In Figuur 4 zijn de gevonden *likelihood ratio*'s uitgezet tegen het verschil in de hoogst magnitudes van respectievelijk de trainings- en de testdatasets.



Figuur 4: Relatieve prestaties (*likelihood ratio*) van modellen zonder en met taper, na training en (*out-of-sample*) testing op 1000 willekeurige datasets gesimuleerd op basis van een “*ground truth*” model zonder taper. De prestaties zijn uitgezet tegen het verschil in de hoogste magnitudes in respectievelijk de training en de testdataset. Links staan de catalogi waarbij de hoogste magnitude in de trainingsdataset zat, rechts de catalogi waarbij de hoogste magnitude in de testdataset optrad.

Uit Figuur 4 blijkt dat het tapermodel vrijwel altijd wint of minimaal gelijk scoort als de hoogste magnitude in de trainingsdata zit (rechterkant van de Figuur). Dit is opmerkelijk omdat de “*ground truth*” helemaal geen taper bevat. Hier is duidelijk sprake van een bias in het voordeel van het tapermodel. Als de hoogste magnitude daarentegen in de testdataset optreedt (linkerkant van de Figuur) dan wint het model zonder taper veel vaker en ook veel overtuigender. Een belangrijke observatie is voorts dat voor de toepassing in Groningen in BO19 de hoogste magnitude (3.6, Huizinge) zich bevindt in de trainingsdataset. Dit correspondeert dus met de rechterkant van Figuur 4. Het is dus op voorhand te verwachten dat een modelcompetitie met een dergelijke opzet leidt tot een voorkeur voor een tapermodel, zelfs als dat niet van toepassing is.

In de volgende twee experimenten kijken we naar de implicaties voor Groningen.

Het exponentiële tapermodel lijkt goed te presteren zo lang als de testdata geen magnitudes bevat die hoger zijn dan de trainingsdata.

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

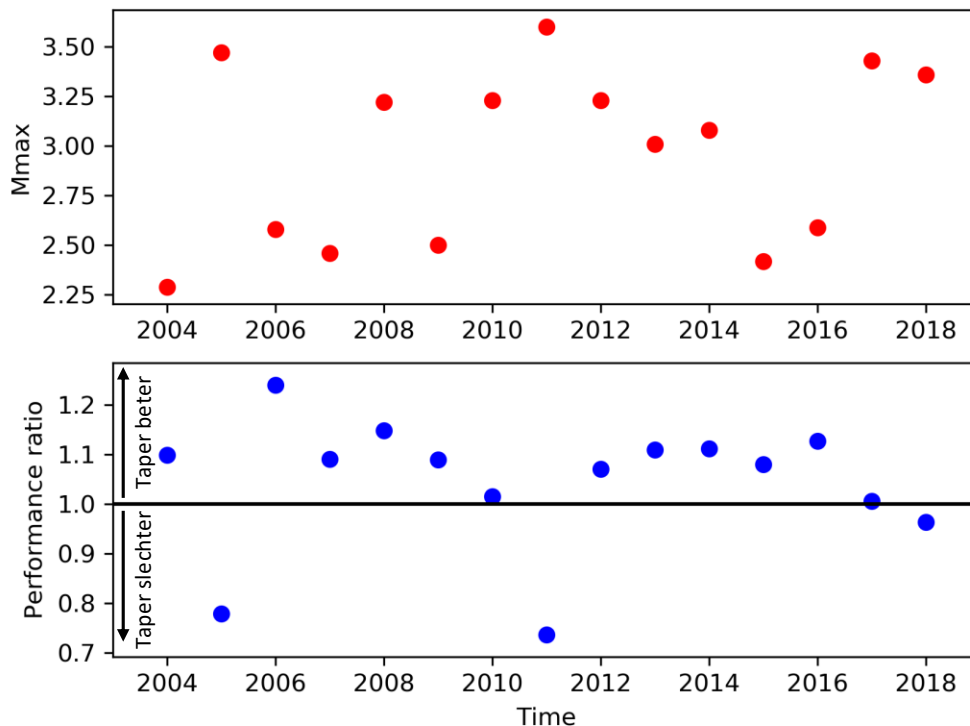
Blad
15/34

2.2.5.4 Experiment 4

Gezien de uitkomst van Experiment 3, waaruit blijkt dat de forecastprestatie van het tapermodel sterk afhankelijk is van de conditie of een nieuw geobserveerde magnitude hoger of lager is dan de hoogste magnitude in de trainingsdata, is het volgende experiment met betrekking tot Groningen uitgevoerd:

- 1) Train zowel het exponentiële taper model als het SSM-V5 b-waardemodel op data van 1995-01-01 tot 2004-09-31.
- 2) Integreer de *a posteriori* verdeling van elk model en voorspel de frequentie-magnitudeverdeling van het gasjaar 2004/2005.
- 3) Vergelijk beide voorspellingen met de data van gasjaar 2004/2005. Dit levert een relatieve prestatie op: één model doet het beter dan de ander².
- 4) Herhaal stappen 1) t/m 3), waarbij telkens het volgende gasjaar voorspeld wordt met alle beschikbare data tot het begin van het gasjaar.

Het resultaat van dit experiment is samengevat in Figuur 5. In jaren waarin een beving voorkomt die groter is dan alle tot dan toe geobserveerde bevingen doet het tapermodel het slechter dan het SSM-V5 b-waardemodel. In andere jaren doet het tapermodel het beter.



Figuur 5: Voor elk gasjaar van 2004/2005 t/m 2018/2019: de maximaal geobserveerde magnitude in dat gasjaar (bovenste figuur, rood), de relatieve performance van de modellen (onderste figuur, blauw). Elk punt komt overeen met 1 gasjaar. Op de horizontale as wordt het eerste kalenderjaar van het gasjaar gebruikt (2004/2005 wordt geplot op 2004).

² Voor deze vergelijking maken we gebruik van de volledige voorspelling van de frequentie-magnitude verdeling (i.e. conform Metriek 1, later in dit document)

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

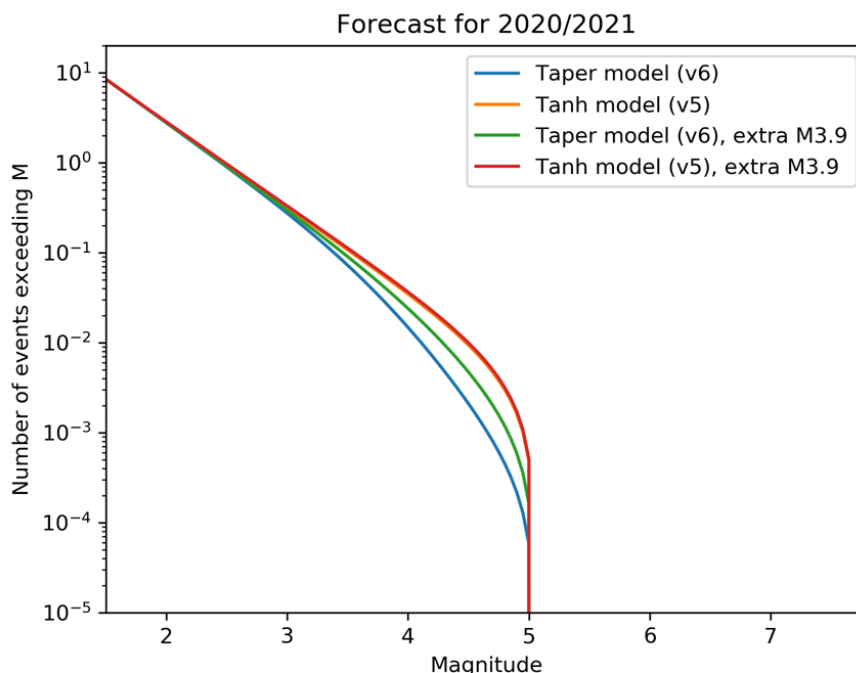
Blad
16/34

Het exponentiële tapermodel heeft moeite de waarschijnlijkheid van hoge magnitudes in te schatten voordat deze gebeurd zijn. Omdat de voorspellende waarde van dit model bij gevolg voor zeldzame gebeurtenissen zeer beperkt is, raadt TNO het gebruik af in de context van een HRA.

2.2.5.5 Experiment 5

Aangezien uit voorgaande experimenten is gebleken dat de prestatie van het tapermodel zeer sterk afhankelijk is van de hoogste magnitude in de trainingsdata is elke toepassing van het model potentieel ook zeer gevoelig voor het optreden van individuele bevingen. In het volgende experiment wordt de gevoeligheid van de forecast van de magnitudeverdeling bestudeerd voor zowel een model mét taper als zonder taper (vergelijkbaar met V5), corresponderend met de twee modellen in de V6 logic tree. Figuur 6 en Figuur 7 laten de invloed zien van het al dan niet optreden of uitblijven van de beving van Huizinge (3.6) in het verleden, of een extra beving van magnitude 3.9 aan het eind van de trainingsperiode. Hierbij is uitgegaan voor een volledige spanningsafhankelijk model met een M_{max} van 5 en volledige integratie over de *a posteriori* waarschijnlijkheidsverdelingen. De twee vergeleken modellen corresponderen met de twee modellen in de V6 beslisboomvertakking.

Uit de Figuren is op te maken dat het tapermodel zeer gevoelig is voor een verandering in de hoogste geobserveerde magnitude in de trainingsdataset. Het model zonder taper is daarentegen nauwelijks gevoelig. De implicatie is dat een HRA op basis van een tapermodel zeer gevoelig zal zijn en bij het optreden van een nieuwe zwaardere beving drastisch zal wijzigen.

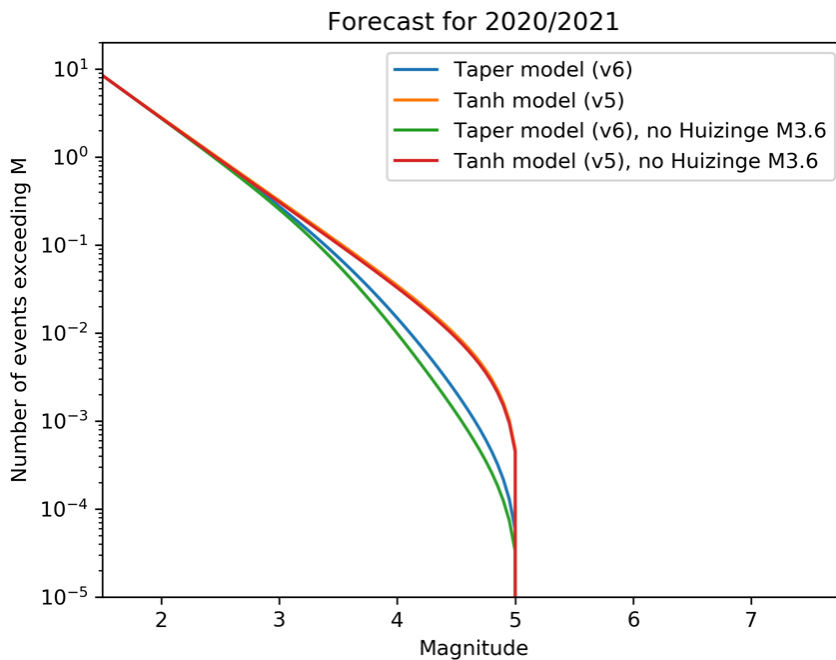


Figuur 6 Frequentie-magnitude verdelingen voor het V5 en V6 model na kalibratie met en zonder een extra 3.9 beving. N.b. de oranje curve valt onder de rode curve.

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
17/34



Figuur 7 Frequentie-magnitude verdelingen voor het V5 en V6 model na kalibratie met en zonder de Huizinge beving met magnitude 3,6. N.b. de oranje curve valt onder de rode curve.

SSM-V6 voorspellingen (forecasts) voor de toekomst zijn sterk afhankelijk van het optreden dan wel uitblijven van een enkele beving met een hogere magnitude. Dit gaat ten koste van de robuustheid van de HRA.

2.2.6 Kanttekening bij het voorstel voor de gewichten in de beslisboom

Om de prestaties van het SSM-V6 frequentie-magnitude model te vergelijken met de prestaties van andere frequentie-magnitude modellen zijn verschillende metrieken mogelijk. In BO19 worden vier metrieken voorgesteld. Deze metrieken gaan in beginsel uit van een *out-of-sample* principe; men kalibreert het model op een deel van de data (geobserveerde bevingen) en test vervolgens hoe goed het model erin slaagt het andere deel van de data te voorspellen.

Metriek 1: De volledige frequentie-magnitude verdeling en subsets van hogere magnitudes.

Metriek 2: De voorspelling voor 'hoogst geobserveerde magnitude tot nu toe'.

Metriek 3: Ontwikkeling van totaal seismisch moment door de tijd.

Metriek 4: Aantal bevingen in verschillende magnitude-klassen door de tijd (niet *out-of-sample*).

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
18/34

Voor de uiteindelijke beslisboomweging wordt alleen Metriek 2 gebruikt. De argumentatie voor deze keuze wordt niet toegelicht in BO19. Opmerkelijk is dat Metriek 1, die ons inziens het meest voor de hand ligt, geen voorkeur geeft voor spanningsafhankelijke modellen.

De implementatie van Metriek 2 is niet expliciet uitgewerkt in BO19 en daarom lastig te reconstrueren. Opmerkelijk is dat, aangezien de hoogste magnitude voor Groningen al in de trainingsdataset zit, de tijdreeks voor hoogste geobserveerde magnitude voor de hele testperiode constant is.

Metrieken 3 en 4 worden in BO19 niet volledig uitgewerkt en voornamelijk gebruikt voor visuele ondersteuning. Voor beide metrieken geldt dat verschillen tussen modellen en observaties vaak al met één of twee sterkere bevingen teniet zouden kunnen worden gedaan. Hierbij kan toeval dus een grote rol spelen.

Bij zowel Metriek 1 als Metriek 2 wordt gekeken naar competitie tussen modellen. Beide modellen worden gekalibreerd met dezelfde data en proberen vervolgens herhaaldelijk de niet gebruikte data te voorspellen door telkens een trekking te doen uit hun *a posteriori* parameter verdeling. Iedere keer komt daar één model als winnaar uit (op basis van de gekozen metriek), en dat model krijgt een punt. De uiteindelijke verdeling van punten bepaalt de wegging van de modellen in de beslisboom.

Hierbij merkt TNO het volgende op:

- 1) De puntenverdeling bij Metriek 2 suggereert een beslisboomweging van 75%-25%, waar in de HRA gebruik gemaakt wordt van 80%-20%
- 2) De keuze voor competitie tussen losse samples uit de *a posteriori* parameterverdeling is niet de meest principiële keuze, aangezien de HRA gebruik maakt van de *gemiddelde* bronverdeling. Modellen kunnen vergeleken worden door te kijken naar de prestaties van de *gemiddelde* voorspelling van elk afzonderlijk model. Er komt dan echter geen beslisboomweging uit de competitie, maar enkel een winnend en een verliezend model. Dit principe is wel toegepast in Experiment 3 (Sectie 2.2.5.3).
- 3) De prestaties van elk model zijn in meer of mindere mate afhankelijk van de precieze samenstelling van de geobserveerde aardbevingscatalogus. Deze catalogus heeft een vrij beperkte omvang. Het gevolg is dat het winnen/verliezen van een model voor niet onbelangrijk deel bepaald kan zijn door toeval.

2.2.7 Discussie

TNO is van mening dat een nieuwe modelkeuze met grote impact moet worden ondersteund met overtuigend bewijs. Het nieuwe seismisch bronmodel SSM-V6 is een doorontwikkeling van SSM-V5, waarbij met name het frequentie-magnitude model een aanpassing heeft ondergaan.

De competitieprocedure die wordt voorgesteld om de kwaliteit van de modelvariëaties te beoordelen op basis van de prestaties in het voorspellen van *out-of-sample* data voor Groningen is niet overtuigend:

- De relatieve prestaties van de verschillende modellen worden beoordeeld op basis van tweekampen. Hiertoe worden uit de *a posteriori* verdelingen van de modelparameters op basis van Monte Carlo steeds twee realisaties getrokken.

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

19/34

De winnaar van elke tweekamp wordt bepaald op basis van de *likelihood* van de *out-of-sample* dataset. Het model dat het hoogste aantal overwinningen scoort wordt als beter beoordeeld. Echter deze procedure is niet in lijn met de toepassing van de modellen in de praktijk. In de praktijk wordt de volledige *a posteriori* verdeling ingezet voor de voorspelling. Het zou dus beter zijn om modellen te vergelijken op basis van de gemiddelde *likelihood*. Dit zou ook beter recht doen aan de grootte van de overwinning (vgl doelsaldo). Toepassing op slechts één dataset (Groningen) zou daarbij echter niet leiden tot een kansverdeling, maar slechts tot één uitslag (met doelsaldo).

- De dataset van Groningen is slechts één realisatie van een stochastisch systeem. Het bepalen van de kwaliteit van modellen op basis van de prestatie ten aanzien van slechts één realisatie is niet robuust. Een synthetisch experiment waarbij de *ground truth* bekend is en waarvoor veel realisaties getest kunnen worden geeft daarom meer informatie (zie Experiment 3, Sectie 2.2.5.3).

Tot slot zijn de wegingsfactoren in de voorgesteld beslisboom gebaseerd op de prestaties in één metriek die niet duidelijk geformuleerd is. Het wordt niet duidelijk gemaakt waarom deze metriek belangrijker is dan andere metrieken. De meest voor de hand liggende Metriek 1 geeft een voorkeur voor modellen waarin geen spanningsafhankelijkheid zit.

Zonder de spanningsafhankelijkheid is een exponentieel taper in feite vergelijkbaar met een gladde variant van een maximale magnitude. De inherente bias in de bepaling van de kantelmagnitude van het taper is te vergelijken met de bias in het bepalen van M_{max} op basis van alleen de geobserveerde data. In feite is dit niet goed mogelijk. Zowel M_{max} als de kantelmagnitude horen daarom in het epistemische domein en vervullen een vergelijkbare rol. De kantelmagnitude kan gezien worden als een gladde, fysisch beter onderbouwde versie van M_{max} . Het voorgestelde spanningsafhankelijke tapermodel van SSM-V6 overruled in de praktijk de bestaande M_{max} distributie. Gezien de inherente bias is dat niet verstandig. Indien gewenst zou de M_{max} distributie vervangen kunnen worden door een distributie van kantelmagnitudes. Dit zou passen in een herevaluatie van de M_{max} distributie als eerder voorgesteld in TNO (2019c).

TNO plaatst serieuze vraagtekens bij de keuze van het SSM-V6 model, met name de competitieprocedure in modelvarianties en de beslisboomweging.

2.2.8 Conclusie

Het empirisch bewijs voor spanningsafhankelijkheid van de frequentie-magnitude relatie in SSM-V6 is beperkt. De parameterschatting van een exponentieel tapermodel geeft een sterke bias in de richting van een sterke taper. De kantelmagnitude wordt in hoge mate bepaald door de hoogste magnitude in de trainingsdata.

De gekozen methode van de forecastcompetitie om de prestatie van de modellen te vergelijken is gebiast in het voordeel van het tapermodel en bovendien niet representatief voor toepassing van de modellen in de praktijk. De forecastcompetitie geeft feitelijk geen onderbouwing voor spanningsafhankelijkheid van de magnitudeverdeling. Zonder de

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
20/34

spanningsafhankelijkheid is de kantelmagnitude van het exponentiele tapermodel vergelijkbaar met een gladde en fysische beter onderbouwde versie van Mmax. Beide kunnen slecht bepaald worden op basis van de geobserveerde dataset.

Ter beoordeling van het gebruik van het seismisch bronmodel SSM-V6 adviseert TNO de beslisboom op het niveau van het frequentie-magnitudemodel te herzien. De voorgestelde wijziging is fysisch goed onderbouwd, maar komt empirisch en statistisch in relatie tot alternatieve modellen onvoldoende naar voren. Het nieuwe model wordt zeer sterk beïnvloed door de hoogste magnitude in de trainingsdata en is daardoor niet goed in staat toekomstige hogere magnitudes te voorspellen.

TNO adviseert het taper uit de magnitudeverdeling te verwijderen door in de beslisboom het toegekende gewicht van 80% te reduceren tot 0%. In aanvulling daarop kan, indien gewenst, de Mmax verdeling vervangen worden door een Mc verdeling. TNO benadrukt dat deze verdeling niet met behulp van de data kan worden gekalibreerd en geeft nogmaals aan (cf. TNO, 2019c) dat een herevaluatie van de Mmax verdeling gewenst is.

2.3 Beoordeling grondbewegingsmodel

In de HRA ten behoeve van het vaststellingsbesluit 2020 is gebruik gemaakt van het grondbewegingsmodel (Ground Motion Model, GMM) V6 (Bommer et al, 2019). Het GMM-V6 is een doorontwikkeling van GMM-V5 (Bommer et al, 2017), de versie die is gebruikt voor de HRA ten behoeve van het vaststellingsbesluit 2019.

2.3.1 Vergelijk GMM-V5 en GMM-V6

Voor de beoordeling van het GMM wordt terug gevallen op eerder onderzoek dat door TNO uitgevoerd is binnen het KEM-02 consortium naar de kwaliteit van V5 en V6 grondbewegingsmodellen (KEM, 2020). Hiertoe is de KNMI data van geregistreerde bevingen met magnitude groter dan 2.0 vergeleken met resultaten van GMM-V5 en GMM-V6. De gebruikte KNMI data betreft de meetstations aan het maaiveld met de gecorrigeerde ijkfactor voor de G0 stations.

Uit dit vergelijk kan geconcludeerd worden:

- Het GMM-V5 onderschat de bodembewegingen. Op hypocentrale afstanden kleiner dan 5 km is er een onderschatting van de bodembeweging tot een factor 2,5. Voor grote hypocentrale afstanden is er een onderschatting van de bodembeweging tot ca. een factor 1,6. De mate van afwijking hangt af van de spectrale periode en magnitude. In zijn algemeenheid geldt: hoe groter de spectrale perioden en magnitudes, hoe kleiner de afwijking.
- Het GMM-V6 komt veel beter overeen met de meetgegevens dan het V5 model. Voor hypocentrale afstanden groter dan 5 km en bevingen met magnitude groter dan 2,5 is er nagenoeg geen afwijking en als die er is, neigt deze naar een hogere voorspelde bodembewegingen dan gemeten. Voor hypocentrale

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

21/34

afstanden kleiner dan 5 km is er een onderschatting van de bodembewegingen, met name voor de spectrale perioden onder de $T=0,5$ s.

Eén van de oorzaken van de onderschatting van de bodembeweging in GMM-V5 is toe te schrijven aan een te hoge “kleine rek demping” (*small strain damping*) in het *site response* model. Dit leidt tot lagere bodembewegingen aan het maaiveld. Omdat in GMM-V5 is gebruik gemaakt van KNMI data op 200 m diepte leiden modelfouten in de *site response*, zoals in de kleine rek demping, direct tot een fout in de voorspelling aan het maaiveld. Ook het GMM-V6 *site response* model gebruikt een te hoge demping, maar omdat KNMI registraties aan het maaiveld gebruikt worden is het bodembewegingsmodel minder gevoelig voor modelfouten in de *site response*. Voor GMM-V5 werkt deze te hoge demping door naar magnitudes die relevant zijn voor de HRA. Voor het GMM-V6 is nog onduidelijk wat het effect van extrapolatie is op hogere magnitudes.

TNO adviseert het gebruik van GMM-V6. Dit model komt beter overeen met geregistreerde bodembewegingen dan GMM-V5. Daarnaast wordt geadviseerd om te onderzoeken wat de impact is van de geconstateerde gebreken ten aanzien van de kleine rek demping in GMM-V6: Is dit van invloed op de extrapolatie naar hogere magnitudes? En wat is het effect van de onderschatting van de grondbeweging op hypocentrale afstanden kleiner dan 5 km op de extrapolatie naar hogere magnitudes. Dit in het bijzonder omdat uit disaggregatie volgt dat deze korte afstanden maatgevend zijn in de seismische dreiging en het risico.

2.3.2 Implicatie GMM-V6 op de HRA resultaten

Met de TNO modelketen is onderzocht wat het effect op de seismische dreiging is bij het gebruik van GMM-V6 ten opzichte van GMM-V5. Daaruit volgt dat de seismische dreiging bij 2475 jaar herhalingsperiode in het V6 model ten opzichte van het V5 model zo'n 10% hoger ligt in het gebied rondom Loppersum en tot ca. 30% hoger aan de randen van het Groningen veld. Een beperkte risicoanalyse voor de typologie URM4L leverde in het centrumgebied een toename van 38% op.

2.3.3 Implementatie GMM in NAM HRA

TNO heeft eerder geconstateerd (TNO, 2019b) dat in de NAM HRA implementatie (Bourne et al, 2019) van GMM-V5 de correlaties tussen spectrale perioden in het bodembewegingsmodel worden toegepast op zowel NS_B niveau als in de site amplificatie factor. In Bommer et al (2019), tabel 5.3 is beschreven dat deze correlaties alleen toegepast moeten worden op NS_B niveau. Het is voor TNO niet duidelijk waarom hiervan is afgeweken, en of deze extra correlatie ook aanwezig is in GMM-V6. Het al dan niet toepassen van deze extra correlatie heeft mogelijk een aanzienlijk effect op de seismische dreiging.

TNO adviseert te onderzoeken wat de rationale achter, en het effect van, het afwijken van de GMM specificatie (Bommer et al, 2019) is in de softwarematige implementatie door NAM.

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
22/34

2.4 Beoordeling schademodel

De HRA ten behoeve van het vaststellingsbesluit 2020 maakt gebruik van het schademodel (*Fragility and Consequence Model, F&C*) V7 zoals beschreven in Crowley et al (2020). Het F&C-V7 is een actualisatie van F&C-V6 (Crowley et al, 2019), de versie die is gebruikt voor de HRA ten behoeve van het vaststellingsbesluit 2019.

De actualisaties hebben betrekking op aanpassingen in zowel de kwetsbaarheid (*fragility*) als de consequentie (*consequence*) voor de volgende gebouwtypologieën:

- typologieën Metselwerk woningen:
 - URM3L en 4L (rijtjeswoningen),
 - URM3M_B en URM3M_U (meerlaagse bouw)
- typologieën voor boerderijen:
 - Drie typologieën uit V6 (W1, URM1_F en URM1_O) zijn vervallen
 - Drie nieuwe typologieën zijn vastgesteld: twee typologieën voor de woonhuis-schuur combinatie (URM1F_HA, URM1F_HB), een typologie voor vrijstaande schuur (URM1_B).

De kwetsbaarheid en consequentie modellen voor de overige gebouwtypologieën zijn onveranderd.

Uit de HRA 2020 volgt dat er geen gebouw een individueel risico kent dat groter is dan 10^{-5} voor 2020 en daarop volgende jaren. NAM geeft daarnaast de aantallen gebouwen waarvoor het zogenoemde P_{90} risico hoger is dan 10^{-5} . Dit betreft uitsluitend panden met typologie URM1F_B: vrijstaande schuren. In 2020 is er sprake van ongeveer 160 panden voor OS1 en 80 voor OS2. Dit aantal neemt met de jaren af, en in 2023 is dit aantal tot nul gereduceerd. In 2024 is een klein aantal schuren volgens OS2 boven de P_{90} grens.

In deze beoordeling gaan we in op de verschillen tussen V6 en V7 voor de aangepaste typologieën.

TNO heeft de volgende uitgangspunten en uitkomsten nader bekeken:

1. Vergelijking van de bijdrage aan het LPR van V6 F&C model en V7 F&C model.
2. De bijdrage van het V7 F&C model op de berekening van het LPR voor de typologieën die zijn aangepast. Voor deze typologieën is gekeken naar de achtergrond bij de veranderingen in de fragiliteitsfuncties en het consequentiemodel.
3. Er is een aantal verschuivingen geconstateerd in aantallen gebouwen per typologie. Dit is niet expliciet benoemd of toegelicht in de HRA-rapportage noch in het V7 F&C rapport. Dit betreft een aanpassing van de Exposure Database (v7). Er is sprake van een verschuiving van ongeveer 30.000 panden van URM4L naar URM3L, en ongeveer 6000 van URM3M_D naar URM3M_B. Dit

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

23/34

betreft een verschuiving van een zwakkere naar een sterkere typologie (wat tot een lager berekend risico leidt voor de betreffende panden).

4. De achtergronden bij de fragiliteitsfuncties voor de nieuw geïntroduceerde typologieën van boerderijen.

Hieronder wordt per punt de beoordeling en advies van TNO gegeven.

2.4.1 *Verskil in risico voor de typologieën van metselwerk woningen*

TNO heeft onderzocht wat de bijdrage is aan de verandering van het berekend risico van toepassing van de V7 modellen ten opzichte van V6. Dit is gedaan door het toepassen van een run van de TNO modelketen, gegeven de instellingen voor SMM en GMM volgens de HRA 2019 (zowel voor SMM als GMM met versie 5). Dit is gedaan zonder toepassing van de exposure database. Per gridcel wordt het lokaal persoonlijk risico (LPR) berekend, voor de situatie dat de gegeven typologie op die locatie aanwezig is. De maximum LPR waarde over het hele grid is vergeleken met V6 en levert een verschil in maximaal berekend risico op dat lager is dan de berekening met V6:

- URM4L: 35% lager
- URM3M_B: 43 % lager
- URM3L: 20% lager
- URM3M_U: 8% lager.

Deze verlaging van het berekende risico (zuiver ten gevolge van veranderingen in het *fragility* en *consequence* model) is het gevolg van meerdere aanpassingen:

- De gebruikte indexgebouwen zijn verschillend in V7 ten opzichte van V6 voor URM4L, URM3L en URM3M_B. Bij URM4L is gebruik gemaakt van 2 (in plaats van 1) indexgebouwen, bij URM3L van 4 (in plaats van 2), en bij URM3M_B is een ander indexgebouw gebruikt.
- Voor de typologie URM3M_B is een ander index gebouw gebruikt vergeleken met V6. Het in V7 gebruikte index gebouw (Schuitenzandflat, of Sflat) is hetzelfde gebouw dat in het V5 fragility model was gebruikt. Voor V6 was gebruik gemaakt van een index gebouw "Georg van Saksenstraat". Dit gebouw is in V7 niet meer gebruikt (opgemerkt wordt dat een afbeelding van dit index gebouw in figuur 2.2. van het V7 rapport is weergegeven). Het is TNO niet duidelijk welke overwegingen ten grondslag liggen aan deze verandering van indexgebouw en waarom het V6 indexgebouw niet is gebruikt.
- Er zijn aangepaste *fragility* en *consequence* modellen gebruikt. TNO plaatst diverse kanttekeningen met betrekking tot de uitwerking van de fragiliteitsfuncties.

Het blijkt dat de verlagingen - zuiver ten gevolge van de aanpassingen aan het *fragility* en *consequence* model - aanzienlijk zijn. In de onderstaande paragrafen wordt dit nader geduid en worden enkele adviezen geformuleerd.

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
24/34

2.4.2 Aanpassingen in het Fragility en Consequence model

Er zijn aanpassingen gemaakt aan zowel het fragiliteit als het consequentie model. Deze aanpassingen in het model zijn wat TNO betreft qua gevolgde methodologie een verbetering van de V6 modellen. De uitwerking van deze V7 modellen in het F&C V7 rapport roept echter een aantal vragen op, die hieronder geadresseerd worden alvorens een advies te formuleren. Enkele van deze vragen zijn ook schriftelijk aan NAM (per e-mail d.d. 24 april) voorgelegd; NAM heeft hierop per mail d.d. 29 april 2020 gereageerd; in het onderstaande wordt deze correspondentie ook meegenomen.

Gevolgde aanpak bij afleiding fragility functions

TNO vindt de methode om de fragiliteitsfuncties te baseren op meerdere index gebouwen per typologie een waardevolle uitbreiding. Zeker omdat zo beter de gebouw-tot-gebouw variatie binnen een typologie kan worden vastgesteld. Ook de in V7 uitgevoerde vergelijking tussen fragiliteitsfuncties gebaseerd op enerzijds berekeningen met simulaties van de index gebouwen als *Multiple Degree of Freedom* (MDOF) systeem en anderzijds schematisaties tot *Single Degree of Freedom* (SDOF) systeem geeft waardevolle inzichten.

Echter, met betrekking tot dit laatste punt heeft TNO enkele bemerkingen met betrekking tot het V7 F&C rapport. Om de MDOF versus SDOF verschillen te verdisconteren wordt in het V7 F&C rapport (paragraaf 6.1.2) een mediaan-shift geïntroduceerd voor de fragiliteitsfuncties, waarmee de curve 15% verschuift naar links (waarmee de typologie minder sterk wordt). TNO heeft op dit punt de tekst in het V7 F&C rapport, de in het rapport gerapporteerde parameterwaarden en de ontvangen coëfficiëntenfiles naast elkaar gezet, en komt op inconsistenties.

Tabel 6.1 en tabel 6.2 uit het V7 F&C rapport laten zien dat in de uiteindelijke fragiliteitsfunctie (tabel 6.2) de genoemde mediaanshift is doorgevoerd voor URM3L en 4L, URM1F_HA, URM1F_HB en URM1_B. Echter niettegenstaande de tekst in paragraaf 6.1.2 is dit niet doorgevoerd voor URM3M_B en URM3M_U (meerlaagse bouw) omdat daar voor de mediaan in tabel 6.1 en 6.2 dezelfde waarde gerapporteerd is. Hier worden twee opmerkingen over gegeven:

Opmerking A:

De in de HRA 2020 geïmplementeerde fragiliteitsfuncties voor URM3M_B en URM3M_U (meerlaagse bouw) zijn daarmee mogelijk onjuist omdat daar de mediaanshift niet is toegepast.

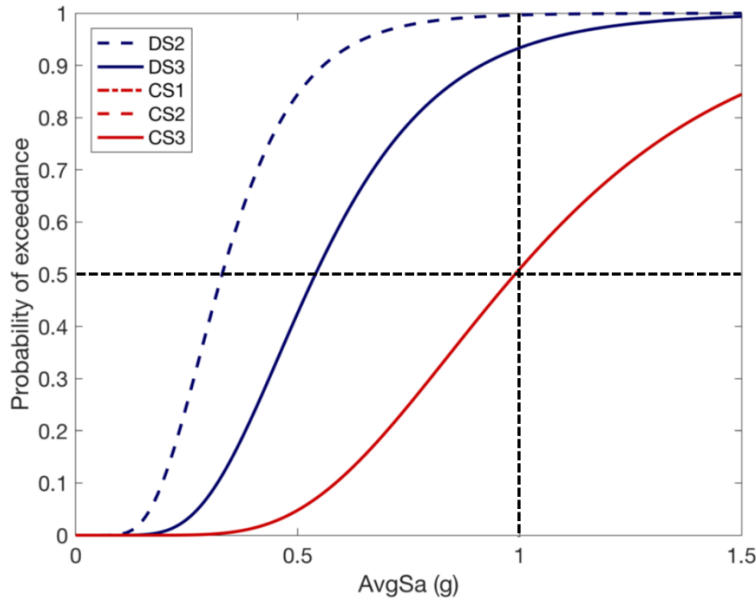
Opmerking B:

Daarenboven is tabel 6.2 niet in lijn met de parameters voor de *middle branch* fragiliteitsfuncties in tabel 6.3 (met de parameters voor alle fragiliteitsfuncties die ook verwerkt zijn in de .csv coëfficiëntenfile voor het V7 model) en bijlage C van het V7 F&C rapport. Dit wordt als voorbeeld toegelicht voor URM3L. In Figuur 8 is de CS3 fragiliteitsfunctie voor URM3L overgenomen uit Bijlage C van het V7 F&C rapport; deze figuur blijkt consistent te zijn met de parameterwaarden uit Tabel 6.3.

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
25/34



Figuur 8 CS3 fragiliteitsfunctie voor URM3L (Crowley et al, 2020; Appendix C, figuur C.4-a)

Deze fragiliteitsfunctie laat duidelijk een mediane waarde zien dichtbij 1.0g (gestippelde lijnen). Tabel 6.1 geeft een mediane waarde 0.99 wat hiermee overeenkomt. Echter in tabel 6.2 levert de 15% reductie een mediane waarde van 0.84. Deze verlaagde waarde lijkt dus niet verwerkt te zijn voor de *middle branch* in tabel 6.3; noch in de aan TNO geleverde .csv inputfile, noch in Bijlage C van het V7 F&C rapport.

Bovenstaande constatering is per e-mail voorgelegd aan NAM. NAM heeft hierop het volgende antwoord gegeven op 29-04-2020:

A 15% median shift was applied to account for the bias that was introduced from the use of a single median building to represent the class. These fragility functions were however then taken as the upper branch of the logic tree (see paragraph after Figure 6.2 where we state that the fragility obtained in this Chapter refers to the upper bound models), and then the model uncertainty due to the modelling approach was removed to get the middle branch (and then again to get the lower branch). The middle branch fragility functions are then provided in the Appendix.

It turns out that, due to the value of the model uncertainty for URM buildings, the final middle branch fragility functions presented in the Appendix (and provided in the input files etc.) actually have a value similar to the original fragility function obtained from the median building.

Het blijkt dus (zoals reeds verwoord in het V7 F&C rapport in de paragraaf na figuur 6.2) dat de op basis van de NLTH's (*nonlinear time history*) voor de indexgebouwen afgeleide fragiliteitsfuncties niet meer als *middle branch* zijn geïmplementeerd maar als *upper branch*. Dit betekent dat er geen extra modelonzekerheid meer is meegenomen (dit was in V6 nog wel het geval) en er dus een kans van 0 is dat de op de index gebouwen (NLTH) gebaseerde fragiliteitsfuncties ongunstiger uitvallen: de numerieke modellen zouden dus de

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

26/34

werkelijkheid categorisch en systematisch onderschatten. Hierop wordt ook gehint in het NAM V7 F&C rapport (paragraaf 6.1.3):

“the fragility and fatality models obtained for the vulnerability classes using the procedure outlined in this Chapter do not represent the best-estimate models for collapse, but are instead upper bound models. This judgment has been made from our knowledge that numerical models tend to underestimate the ultimate capacity of buildings, as also demonstrated in the many blind prediction exercises”.

TNO vindt de gevolgde procedure onvoldoende onderbouwd, er is geen bewijs geleverd dat er een kans van 0 is dat numerieke uitkomsten ongunstiger uitvallen dan de werkelijkheid en evenmin dat er precies zoveel overschatting is als de afstand tussen de *middle* en *upper branch*. Het verdient aanbeveling de modelonzekerheid conform het V6 F&C model te verwerken (deze is in lijn met FEMA 58).

TNO adviseert de MDOF versus SDOF verschillen te consistent te verdisconteren in de *middle branch fragility curve* en additioneel een modelonzekerheid in rekening te brengen conform het v6 F&C model. Dit levert een verhoging van het risico op, de risicoberekening dient uit te wijzen hoeveel dit is en of huizen onveilig worden.

Wijze van implementeren gebouw tot gebouw variatie.

In het V7 F&C rapport (zie paragraaf 6.1.2 en de laatste kolom van tabel 6.2) wordt de gebouw tot gebouw variatie vergroot door middel van het vergroten van de parameter β . In het V6 F&C (uitdrukking 5.1 in dat rapport) is gekozen om de gebouw tot gebouw variatie te implementeren door middel van het vergroten van de parameter σ_s ; in beide gevallen zonder een duidelijke motivering. Beide aanpakken zijn niet dezelfde. Sommige typologieën worden nog beoordeeld conform V6 en andere conform V7.

Het V7 F&C rapport vermeldt in paragraaf 6.1.2 dat de ‘*within building variability*’ wordt verwaarloosd.

TNO adviseert een gelijke aanpak voor het verwerken van de gebouw-tot-gebouw variatie voor alle typologieën en adviseert een duidelijke motivatie te formuleren waarom voor de ene dan wel de andere aanpak wordt gekozen. De gemaakte keuzes voor de ‘*within building variability*’ en ‘*between building variability*’ zouden in een nadere studie onderbouwd moeten worden. Als blijkt dat deze niet verwaarloosbaar geacht mogen worden, moeten deze worden geïmplementeerd in de risicoberekening.

Aanpassingen gedaan aan het consequence model voor de hier beschreven typologieën

Voor typologieën URM3L en URM4L is er nu één fragiliteitsfunctie voor de berekening van het risico (in plaats van 3). Die voor CS1 en CS2 zijn gelijk gesteld aan die voor CS3, waarmee het risico alleen wordt bepaald door volledige

Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
27/34

instorting (CS3). Ditzelfde geldt voor de nieuwe typologieën voor de boerderijen URM1F_B, URM1F_HA en URM1F_HC. TNO beoordeelt deze aanpak als redelijk, gezien de beschikbare informatie.

2.4.3 *Verschuivingen in de Exposure database*

TNO kan uit de beschikbare informatie niet afleiden hoe de waargenomen verschuivingen zijn te verklaren. Deze zijn, gezien de resulterende waarden voor het LPR voor deze typologieën, niet langer relevant in de beoordeling van de veiligheid. Mogelijk dat dit wel relevant wordt als bovenstaande adviezen worden opgevolgd en de aangepaste resultaten daartoe aanleiding geven.

2.4.4 *Boerderijen*

Het V7 F&C rapport gaat voor typologieën URM1F_HA en URM1F_HC uit van constructieve ontkoppeling tussen woonhuis- en schuurgedeelte van boerderijen en levert een aparte fragiliteitsfunctie voor beide op. Onduidelijk is of dit inderdaad altijd het geval is.

Ook is het V7 F&C rapport in het *fatality* model niet precies duidelijk hoe het individueel risico wordt berekend voor de schuren. In de schuren is er namelijk in voorkomende gevallen geen sprake van permanente aanwezigheid van mensen. In het V6 F&C rapport wordt uitgegaan van een kans van 10% dat een individu in het schuurgedeelte aanwezig is (V6 rapport paragraaf 6.2.1). Onduidelijk is of dit ook is aangenomen in het V7 *fatality* model. Dit dient opgehelderd te worden om precies te kunnen beoordelen hoe het individueel risico wordt berekend voor een boerderij opgebouwd uit een woning en schuurgedeelte.

TNO adviseert, in lijn met het advies geformuleerd in 2019, om bij de beoordeling van schuren eerst na te gaan wat het feitelijk gebruik van deze schuren is.

2.5 **Implicatie modelbeoordeling op HRA 2020 resultaten**

In bovenstaande paragrafen komt TNO tot de conclusie dat het gebruikte seismisch model (versie 6) op dit moment niet voldoet. Deze modelversie representeert in onvoldoende mate de eerder geïdentificeerde onzekerheden met betrekking tot de frequentie-magnitude verdeling, en met name de inschatting van de maximale magnitude. Dit heeft een grote impact op de inschatting van de seismische dreiging. Daarnaast zijn er in het fragiliteit en consequentiemodel (versie 7) tekortkomingen geconstateerd die leiden tot een onderschatting van het risico.

Op basis van deze beoordeling schat TNO het seismisch risico hoger in dan gerapporteerd in HRA 2020. Binnen het beperkte tijdsbestek van dit adviestraject is het voor TNO niet mogelijk om dit te kwantificeren in een aantal huizen dat niet aan de gestelde risiconorm voldoet.

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

28/34

Wel kan een bandbreedte van de verwachtingswaarde van het Plaatsgebonden Individueel Risico aangegeven worden. Hierbij is de uitkomst van de HRA 2020 feitelijk de absolute ondergrens van deze bandbreedte. TNO verwacht dat het risico dat bepaald is in HRA 2019 voor gasjaar 2019-2020 een aannemelijke bovengrens van de bandbreedte vormt.

Met betrekking tot de voorgestelde operationele strategieën is het aannemelijk dat deze, in lijn met de resultaten van HRA 2019 en het TNO advies (TNO, 2019a), resulteren in een vergelijkbare seismische dreiging en seismisch risico. Op regionaal niveau kan het echter wel verschillen in dreiging en risico. De keuze voor één van de twee operationele strategieën leidt niet zozeer tot een verplaatsing van het zwaartepunt van het seismisch risico, maar tot verschillen in de spreiding van het dreiging- en risicogebied.

3 Bodemdaling

3.1 Vraagstelling

In hoeverre past de gemeten bodemdaling (o.a. van de GPS stations boven het gasveld) bij de gemodelleerde bodemdaling?

3.2 Beantwoording

In de HRA 2020 presenteert de NAM haar bodemdalingsmodel en de kalibratie daarvan aan de peilmerk-gegevens over de periode 1972 – 2018. Voor vijf peilmerken wordt de passing van de gemodelleerde bodemdaling aan de peilmerkgegevens grafisch weergegeven. Diezelfde figuur laat de consistentie zien tussen de InSAR waarnemingen en de peilmerken. GPS-data worden in de HRA 2020 echter niet besproken.

De adviesvraag valt uiteen in twee deelvragen:

1. De kwaliteit van het bodemdalingsmodel;
2. De passing van de gemodelleerde bodemdaling aan de meetgegevens, met name GPS-data als onafhankelijke meetgegevens.

3.2.1 Bodemdalingsmodel

In het Groningen winningsplan 2016 (NAM, 2016) is de werkwijze beschreven voor de bepaling van de prognose van bodemdaling door gaswinning uit het Groningen veld. In de HRA 2020 geeft NAM aan dat zij sindsdien een aantal verbeterpunten in de bodemdalingsmodellering heeft doorgevoerd. Hieronder worden alleen die punten genoemd en voorzien van een beoordeling door TNO-AGE.

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

29/34

Drukdaling reservoir

NAM heeft het dynamisch reservoirmodel geactualiseerd (V6; NAM, 2018) en noemt als belangrijkste aanpassingen:

- (Opgelost) gas in het watervoerend deel van het reservoir; De aanname van Gas Below Free Water Level levert een betere passing op met de gemeten bodemdaling en de waargenomen stijging van het Gas Water Contact t.o.v. V5, met name in het noordwestelijk deel van het veld.
- Het (expliciet) meenemen van Carboon in het dynamisch reservoirmodel; Het Carboon wordt nu als een aparte reservoirlaag beschouwd, deels gas- en deels watervoerend.
- Additionele depletie van de Lauwerszee aquifer door gaswinning in de velden Roden, Vries, Pasop en Faan, ten westen van het Groningen veld.

TNO beoordeelt deze verbeterpunten aan het dynamisch reservoirmodel als zinvol.

Kalibratie parameters compactiemodel

NAM kiest net als voorheen (Winningsplan 2016) voor het RTCiM model om de reservoir compactie te modeleren. De modelparameters worden gekalibreerd met de bodemdalingsgegevens (i.e. waterpas en InSAR). Deze inversie methodiek werd door NAM geïntroduceerd in het Winningsplan 2016. De belangrijkste modelparameter is de gesteente-compressibiliteit (C_m). De eerste inschatting van deze parameter werd destijds bepaald op basis van een relatie tussen aan gesteentemonsters bepaalde C_m en porositeit. Porositeitskaarten – met een zekere mate van geologische interpretatie - werden gebruikt om een ruimtelijke C_m verdeling te genereren als een *prior* voor de inversie methodiek.

In 2015 kwam een nieuwe bron van informatie beschikbaar, namelijk directe meting van de compactie (*strain*) van het reservoir met behulp van *fibre optic cable* technologie. Deze techniek werd toegepast in de toen net geplaatste boring Zeerijp-3A (ZRP-3A). Een analyse van de resultaten is beschreven in Kole et al (2020). Een belangrijk resultaat is een lineaire relatie tussen C_m en de *compressional slowness* (DTC) bepaald uit de Sonic log over het Slochteren zandsteen interval in ZRP-3A.

NAM heeft de in ZRP-3A gevonden relatie toegepast om een *prior* grid te berekenen voor de C_m over het Slochteren zandsteen interval. Hiervoor is gebruik gemaakt van de seismische snelheden afgeleid uit de seismic cube van het Groningen veld. NAM prefereert het gebruik van deze aanpak boven de relatie uit de C_m met de porositeit.

NAM toont een duidelijke correlatie tussen de DTC en C_m uit *strain* metingen in de Zeerijp-3A put, met een hoge verticale resolutie over een groot interval. TNO ziet het als verbetering dat er een directe relatie is met een meetbare grootte t.o.v. een indirecte grootte als porositeit. TNO ziet echter ook enkele praktische beperkingen en heeft de volgende opmerkingen over de toepasbaarheid van deze relatie op het hele Groningen veld:

- De relatie is voor het Groningen veld toegepast door de C_m over het Groningen veld te bepalen uit de seismic cube. Deze heeft een verticale resolutie in de

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

30/34

order van 20 meter, wat significant lager is dan de resolutie van de log-metingen in de ZRP-3A put.

- Het gebruik van de relatie met de DTC leidt er toe dat er geen invloed is van de geologische overwegingen en kennis (b.v. sedimentaire facies) op de inschatting van de C_m die er wel was bij de relatie met porositeit.
- In Figuur 4.5 van de HRA 2020 toont het NAM C_m *posterior* grid, als resultaat van de inversie, voor zowel het Rotliegend als het Carboon reservoirinterval. De *posterior* wijkt significant af van het *prior* grid, in zowel de hoogte, spreiding en gradiënt van de C_m . De modelparameter(s) en daarmee de bodemdalingsresultaten lijken daarom grotendeels te worden bepaald door de bodemdalingsmeetgegevens en de invloed van het *prior* grid lijkt beperkt.

Conclusie

De *fibre optic cable* technologie toegepast in ZRP-3A is veelbelovend en een duidelijke verbetering ten opzichte van eerdere in situ compactie-meettechnieken. Echter, de extrapolatie van die lokale informatie naar het gehele Groningen veld geeft aanleiding tot een aantal vragen, waardoor de meerwaarde van deze nieuwe techniek boven de tot dusver toegepaste methode nog niet voldoende vaststaat. Wel is het bemoedigend, dat het nieuwe compactiemodel leidt tot een in het algemeen goede passing met de GPS-data.

3.2.2 Passing van de gemodelleerde bodemdaling aan de GPS meetgegevens

NAM laat in de HRA 2020 voor 5 peilmerken zien dat de waterpasmetingen en InSAR data binnen de 95% onzekerheidsbandbreedte past bij gemodelleerde bodemdaling. Een vergelijk tussen de GPS-metingen en de prognose van het bodemdalingsmodel wordt niet getoond. Aangezien de GPS-metingen niet zijn gebruikt ter kalibratie van het bodemdalingsmodel is de passing van de GPS metingen met het model een onafhankelijke toets op het bodemdalingsmodel.

Data

Vanaf 2014 worden er continue GPS-metingen gedaan vanaf verschillende locaties boven het Groningen gasveld. Op verzoek van TNO heeft NAM de prognose van het bodemdalingsmodel beschikbaar gesteld om een vergelijk met de GPS-data mogelijk te maken. TNO heeft de GPS-data van alle GPS meetstations vergeleken met de uitkomst van het bodemdalingsmodel op de locatie van het GPS-meetstations. Er is door TNO een kwalitatieve vergelijking met nadruk op de bodemdalingstrend en orde grootte bodemdaling.

Vergelijking model en GPS-data

De GPS-stations die over een langere meetreeks beschikken laten over het algemeen een goede passing zien zowel in trend als in hoeveelheid bodemdaling ten opzichte van het model. Een vergelijk met de recent geplaatste GPS-meetstations (begin 2018 of 2019)³ is niet zinvol aangezien de datareeks te kort is om een gedegen vergelijk te maken met het model.

³ Dit betreft de GPS-stations: Barnheem, Bedum, Bierum, Borgsweer, Delfzijl, Heiligerlee, Hoogezand, Kolham, Leermens, Midlaren, Nieuwe-Scheemda, Oldorp, Ooswold, Ranum,

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

31/34

Er zijn 2 locaties die niet dezelfde trend en magnitude van bodemdaling laten zien als het model. Op de GPS-locatie Veendam laat de GPS-data een veel hogere dalingsnelheid en totale bodemdaling zien dan het bodemdalingsmodel. Ook op de GPS-locatie Ten Post lijkt er een hogere dalingsnelheid en totale daling vanaf de start van de metingen t.o.v. bodemdalingsmodel.

Voor de GPS-locatie Veendam is de discrepantie tussen de GPS-data en het model te verklaren door de aanwezige zoutwinning (Figuur 9). De zoutwinning in Veendam veroorzaakt significante bodemdaling welke door NAM niet wordt meegenomen in haar modelering.

Het verschil tussen metingen en model op GPS-locatie Ten Post is minder significant als bij Veendam. Er lijkt sinds de start van de metingen een hogere dalingsnelheid en totaal grotere daling te zijn (zie Figuur 10). Nader kwantitatief onderzoek hiernaar ligt niet binnen de reikwijdte van dit advies. TNO beperkt zich tot een opsomming van mogelijk verschillende oorzaken die geobserveerde discrepantie kunnen verklaren:

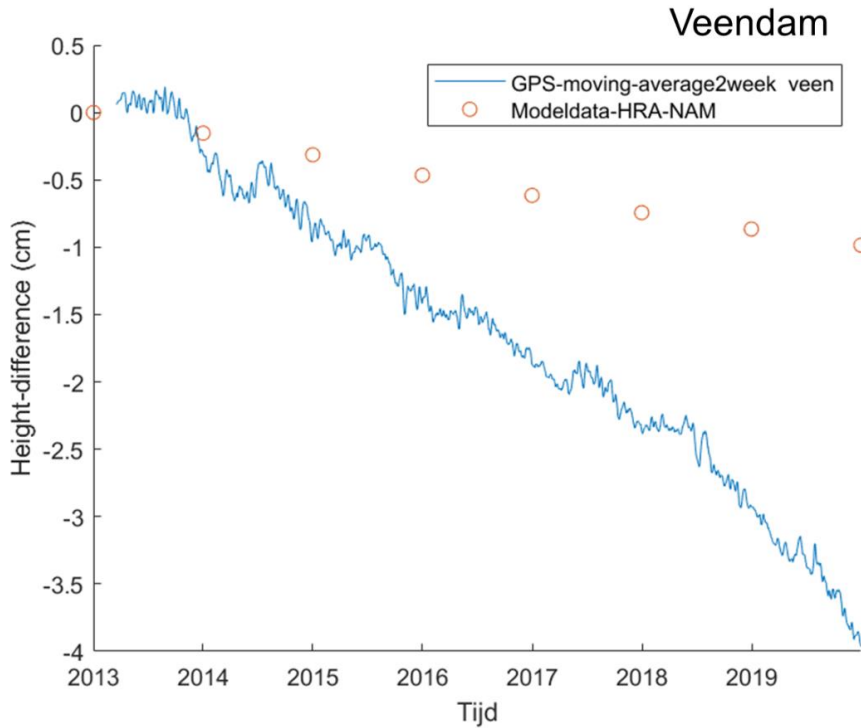
- Onjuiste inschatting van de reservoirdruk rond de Ten Post locatie. Mogelijk is de werkelijke reservoirdruk op de Ten Post locatie lager dan is gemodelleerd, waardoor het model de bodemdaling onderschat. Na insluiting van de Loppersum clusters is in oktober 2015 de laatste drukmeting in Ten Post uitgevoerd die gebruikt is voor de kalibratie van het reservoirmodel.
- Een bias in de GPS meetreeks. Het is onduidelijk of de GPS-reeks boven Ten Post een afwijkend signaal laat zien t.o.v. de InSAR en waterpasmetingen waar het model op gekalibreerd is.
- Een verkeerde inschatting modelparameters in het compactiemodel. Hoewel de omliggende GPS-stations met een vergelijkbare meetreeks (vanaf 2014) geen afwijking in dezelfde mate laat zien, kan het zijn dat specifiek voor de Ten Post locatie een andere -lokale- inschatting van de modelparameters tot een betere passing met het model leidt.

TNO adviseert de oorzaak van de afwijkende trend in de bodemdalingsmeetreeks van het GPS station Ten Post te onderzoeken. Dit komt ten goede aan de kwaliteit van het bodemdalingsmodel en daarmee de bodemdalingsprognose.

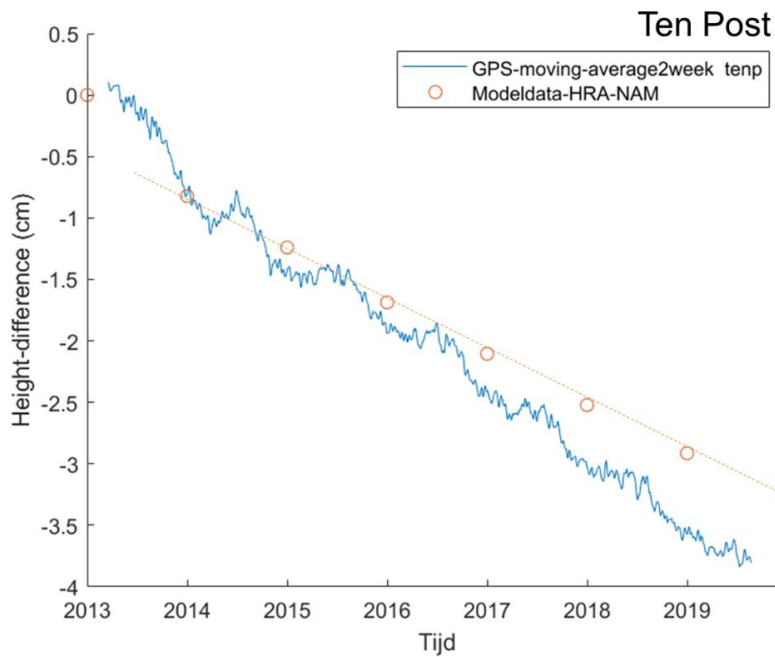
Datum
11 mei 2020

Onze referentie
AGE 20-10.043

Blad
32/34



Figuur 9 Vergelijk meetreeks GPS station Veendam (doorgetrokken blauwe lijn) met het bodemdalingsmodel (oranje cirkels).



Figuur 10 Vergelijk meetreeks GPS station Ten Post (doorgetrokken blauwe lijn) met het bodemdalingsmodel (oranje cirkels). De onderbroken oranje lijn geeft de trend van de bodemdaling uit het model weer.

4 Referenties

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

33/34

J. Bommer, B. Edwards, P. Kruiver, A. Rodriguez-Marek, P. Stafford, B. Dost, M. Ntinalexis, E. Ruigrok and J. Spetzler, 2017, "V5 Ground-Motion Model (GMM) for the Groningen Field", October 2017.

J. Bommer, B. Edwards, P. Kruiver, A. Rodriguez-Marek, P. Stafford, B. Dost, M. Ntinalexis, E. Ruigrok and J. Spetzler, 2019, "V6 Ground-Motion Model (GMM) for Induced Seismicity in the Groningen Field With Assurance Letter", December 2019.

S.J. Bourne and S.J. Oates, 2019, "Evolution of induced earthquake magnitude distributions with increasing stress in the Groningen gas field", Restricted Draft, NAM, November 2019.

S.J. Bourne and S.J. Oates, 2017, "Extreme Threshold Failures Within a Heterogeneous Elastic Thin Sheet and the Spatial-Temporal Development of Induced Seismicity Within the Groningen Field", JGR.

S.J. Bourne, S.J. Oates and J. van Elk, 2018, "The exponential rise of induced seismicity with increasing stress levels in the Groningen gas field and its implications for controlling seismic risk", GJI.

S.J. Bourne, S.J. Oates, R. Scheefhals, P. Castellanos Nash, A. Mar-Or, T. Storck, P. Omid, J. van Elk, 2019, "A Monte Carlo method for probabilistic seismic hazard and risk analysis of induced seismicity in the Groningen gas field", Shell, Alten Technical Software and NAM, May 2019.

H. Crowley, & R. Pinho, 2020, "Report on the Fragility and Consequence Models for the Groningen Field (version 7)", March 2020.

H. Crowley, R. Pinho & F. Cavalieri, 2019, "Report on the v6 Fragility and Consequence Models for the Groningen Field", March 2019.

KEM 2020, Evaluation, validation and improvement of the Site Amplification component of the Groningen Risk Model (KEM-02), F. Besseling, A. Bougioukos, J. de Greef, J. Pruiksmá, A. Tsouvalas, KEM 02 Research Question 2 report, Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, 1 April 2020.

P. Kole, M. Cannon, J. Tomic, S. Bierman, 2020, Analysis of and learnings from the first four years of in-situ strain data in Zeerijp-3A, March 2020.
EP201908210907

NAM 2016, Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2016 - Production, Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard and Risk Assessment in the Groningen Field, EP201603238413.

NAM 2018, Groningen Dynamic Model Update 2019, Q. de Zeeuw & L. Geurtsen, October 2018.

Datum

11 mei 2020

Onze referentie

AGE 20-10.043

Blad

34/34

NAM 2019, Operationele Strategieën voor het Gasjaar 2019-2020, EP201903202798, 22 maart 2019, incl. Appendix A: Seismic Hazard and Risk Assessment Groningen Field update for Production Profile GTS – raming 2019, EP2019.

NAM 2020, Operationele Strategieën voor het Gasjaar 2020-2021, EP202002207545, 13 maart 2020, incl. Appendix A: Seismic Hazard and Risk Assessment Groningen Field update for Production Profile GTS – raming 2020, EP202003201727.

TNO 2018, Advies veiligheid bouwwerken bij verlaagd niveau gaswinning, AGE 18-10.052, 27 juni 2018.

TNO 2019a, Advies vaststellingsbesluit Groningen gasveld 2019/2020, AGE 19-10.025, 7 mei 2019.

TNO 2019b, Comparative analysis of the NAM and TNO implementations in the Groningen Seismic Hazard and Risk Assessment, TNO2019_R11997, 19 december 2019.

TNO 2019c, Bias studie fase 2, kenmerk: AGE 19-10.057, 16 december 2019.

TNO 2020, Vergelijking van het seismisch risico van verschillende afbouwscenario's voor de gaswinning uit het Groningenveld, TNO2019_R12045, 23 januari 2020.