



Staatstoezicht op de Mijnen
*Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat*

Validatie van het seismisch netwerk van het KNMI in Groningen

Eindrapportage, maart 2021

Inhoud

1. Inleiding	4
1.1 Wat ging aan dit rapport vooraf?	5
1.2 Wat was de scope van het SodM validatie-onderzoek?	6
1.3 Leeswijzer	8
2. Wat zijn de doelen van de SodM validatie?	9
3. Hoe heeft SodM de validatie aangepakt?	10
3.1 Wie hebben bijgedragen?	10
3.2 Welke onderzoeken zijn betrokken bij de validatie?	10
3.4 Toelichting	12
4. Bevindingen inspectie meetketen	16
4.1 Instellingsproblemen van de G0-meters (bevinding 1)	16
4.2 De metingen met de G1-G4 seismometers kennen geen problemen (bevinding 2)	18
4.3 Installatie issues pre-B0- en B0-meters (bevinding 3).....	18
4.4 Een deel van de B0-meters meet bij frequenties boven 3 – 5 Hz lagere grondversnellingen dan nabije G0-meters (bevinding 4).....	20
4.5 Demping grondversnellingen pre-B0-versnellingsmeters (bevinding 5).....	21
4.6 Problemen met de kwaliteitsborging van het seismisch netwerk (bevinding 6)	22
4.7 Onduidelijkheden in rollen en verantwoordelijkheden (bevinding 7)	23
4.8 Aanvankelijk onjuiste verwerking van een deel van de G4-metingen (bevinding 8)	23
4.9 Overige bevindingen	23
5. Zijn de seismische metingen nu op orde?	25
5.1 G0-metingen (2014 – heden)	25
5.2 Pre-B0- en B0-metingen (1995 – heden).....	26
5.2 G4-metingen (ML=2,6 Slochteren beving 27 mei 2017)	28
6. Gevolgen van de geconstateerde afwijkingen	29
6.1 Gevolgen voor eerder vastgestelde groundbewegingen en shake maps	29
6.2 Gevolgen voor de empirische GMPE-vergelijking	29
6.3 Effecten op schadeafhandeling en subsidieregelingen.....	30
6.4 Gevolgen voor de berekende seismische dreiging en risico's.....	30
6.4.1 Effect gebruik afwijkende G0-metingen.....	31
6.4.2 Effect gebruik verkeerd verwerkte G4-metingen.....	31
6.4.3 Effect gebruik metingen pre-B0- en B0-meters in gebouwen.....	32

6.4.4 Effect overige zaken op berekende seismische dreiging en risico's.....	33
6.5 Gevolgen voor het versterkingsprogramma	33
6.6 Gevolgen voor wetenschappelijke onderzoeken	33
6.7 Andere gevolgen.....	34
7. Samenvatting, conclusies en aanbevelingen.....	35
Welke meetproblemen zijn gevonden en zijn deze nu opgelost?	36
Impact van de meetproblemen; welke vervolgacties en onderzoeken zijn nog nodig?.....	37
Achterliggende oorzaken van de meetafwijkingen; wat hebben we geleerd? Hoe kunnen meetafwijkingen in de toekomst voorkomen worden?.....	39
Status opvolging SodM aanbevelingen	40
8. Referenties	41
9. Termen, afkortingen en definities	47
Bijlage: KEM-11, phase 2A: “Assessing data collection methods for the purpose of GMPE calculations at Groningen”, comments from KNMI, 5 October 2020	51

1. Inleiding

Het optreden van seismiciteit in Groningen wordt gemonitord met seismometers en versnellingsmeters. De data van de seismometers in ondiepe (200 m) meetputten worden o.a. gebruikt voor de vaststelling van het tijdstip, de locatie en de sterkte van de bevingen, terwijl de versnellingsmeters gebruikt worden om de beweging van het oppervlak als gevolg van een beving vast te stellen. De metingen van de grondbewegingen (grondsnelheid en grondversnelling) in Groningen worden gebruikt voor het beoordelen en afhandelen van schadedossiers, het toepassen van ministeriële (subsidie)regelingen, de berekeningen van seismische dreiging door het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (verder: het KNMI) en de Nederlandse Aardolie Maatschappij (verder: NAM), de berekening van het seismisch risico door NAM (met het HRA model¹), de omvang en prioritering van het versterkingsprogramma en als input voor wetenschappelijke studies. Het is daarvoor van belang dat alle gerapporteerde metingen correct zijn. Dat geldt voor de aantallen bevingen, het tijdstip, de locatie en de sterkte van de bevingen en met name ook voor de grondbewegingen die optreden aan het oppervlak.

Versnellingsmeters worden gebruikt om de grondbeweging van een beving aan het oppervlak te kunnen vaststellen. De grondversnelling is belangrijk voor het seismisch risico. Schade wordt voornamelijk bepaald door de snelheid van de beweging aan het oppervlak (welke uit de versnelling kan worden afgeleid). De grondbeweging wordt niet alleen bepaald door de afstand tot en de magnitude van een aardbeving, maar ook door bijvoorbeeld de lokale bodemgesteldheid. Zo veroorzaakt een beving van 3,0 op de schaal van Richter op veengrond meer schade dan op zandgrond. Op veen wordt ook een hogere grondversnelling gemeten.

In februari 2019 meldde het KNMI bij navraag dat zij een instellingsprobleem geconstateerd én inmiddels gecorrigeerd had bij alle 79 meters uit het G-netwerk die gebruikt worden om de grondversnellingen vast te stellen. Omdat de data van het seismische monitoringsysteem in Groningen belangrijk zijn, bijvoorbeeld voor het bepalen van de omvang van de versterkingsopgave alsmede voor het wetenschappelijk onderzoek naar het Groningen-gasveld, is het Staatstoezicht op de Mijnen (verder SodM) vervolgens een onafhankelijke validatie gestart

naar het gehele seismische monitoringsysteem in Groningen. In juli 2019 heeft SodM een tussentijdse rapportage van dit onderzoek gepubliceerd. Het huidige eindrapport bevat alle resultaten van het validatieonderzoek. Het gaat in op de gevonden afwijkingen, of deze afwijkingen inmiddels verholpen zijn en de (mogelijke) gevolgen van de gevonden afwijkingen. Tenslotte bevat dit rapport aanbevelingen om vergelijkbare problemen in de toekomst zo veel mogelijk te voorkomen.

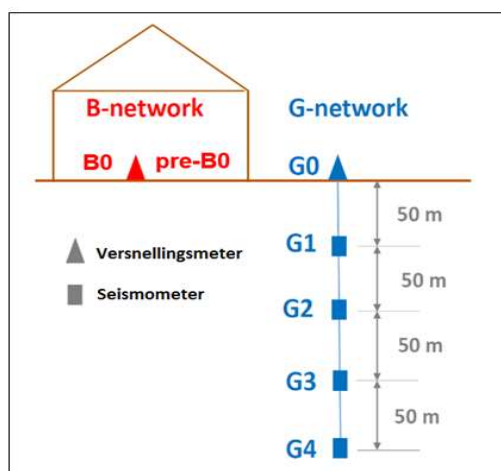
De minister van Economische Zaken en Klimaat (verder: EZK) en ten dele de operator NAM dragen verantwoordelijkheid voor de veiligheid van de gaswinning in Groningen. SodM is de toezichthouder op de veiligheid van onder andere de gaswinning in Groningen. NAM blijft onder de Mijnbouwwet verantwoordelijk voor het meten van de grondbewegingen in Groningen. NAM heeft hiervoor meetapparatuur laten installeren. Deze meters zijn opgenomen in het landelijke meetnetwerk voor aardbevingen in Nederland. Het KNMI is beheerder van dit landelijke seismisch netwerk. NAM blijft onder de Mijnbouwwet de aansprakelijke partij voor het correct meten van de bevingen. SodM houdt daar toezicht op. SodM is niet de toezichthouder op het KNMI. Het agentschap KNMI is namens de minister van Infrastructuur en Waterstaat (verder IenW) verantwoordelijk voor het

¹ Het Hazard and Risk model waarmee NAM de seismische dreiging en risico voor het Groningen-gasveld berekent. Vanaf 2021 komt de HRA in publiek beheer en voert TNO de publieke seismische dreiging en risicoanalyse uit (EZK, 2020).

meten van natuurlijke en geïnduceerde aardbevingen in Nederland en voor het onverwijd informeren van het publiek daarvan. Naar aanleiding van de melding op 5 februari 2019 dat er instellingsproblemen waren met een deel van de versnellingsmeters, heeft SodM een onafhankelijke

Het KNMI gebruikt voor het meten van aardbevingen een netwerk van seismometers en versnellingsmeters in Nederland. De versnellingsmeters bevinden zich aan het aardoppervlak en meten de versnelling van de groundbeweging. De grondsnelheid kan daaruit worden afgeleid. De seismometers bevinden zich in een ondiepe put (200 m) op verschillende diepten onder de grond. Deze meters worden gebruikt om de locatie en sterkte van de bevingen te bepalen. Alle meters die aan het aardoppervlak of in gebouwen zijn geïnstalleerd krijgen in dit rapport de annotatie 0 (= nul). De seismometers in de ondiepe putten worden van de oppervlakte naar beneden genummerd: 1 op 50 m diepte, 2 op 100 m, 3 op 150 m en 4 voor de meter op 200 m diepte. Het huidige netwerk van versnellingsmeters bestaat uit twee delen: de oudere meters van het KNMI B-netwerk in gebouwen (in dit rapport de B0-meters) en de nieuwere G0-meters van het KNMI G-netwerk in speciaal daarvoor ontwikkelde, relatief kleine, meetkasten verspreid over het veld. Een nog ouder deel van het KNMI B-netwerk met 13 versnellingsmeters (in dit rapport verder de pre-B0-meters) is in verschillende fasen geïnstalleerd in de periode vóór 2013 (grotendeels in dezelfde gebouwen als de latere B0-meters). Deze pre-B0-meters zijn in de periode 2013-2014 vervangen door het B0-meter netwerk met 17 meters. Hier zijn van 2014 tot eind 2017 80 G0-versnellingsmeters aan toegevoegd als onderdeel van het G-netwerk. Op dit moment zijn er nog 13 B0-versnellingsmeters en 79 G0-meters actief.

Voor 2013	Installatie pre-B0-meters
2013-2014	Vervanging pre-B0-meters door 17 B0-meters (KNMI B-netwerk) waarvan nog 13 in actief gebruik
2014-2017	Toevoeging 80 G0-meters (onderdeel KNMI G-netwerk) waarvan nog 79 in actief gebruik



Figuur 1: B- en G-netwerk Groningen

audit laten uitvoeren op de kwaliteit van de gemeten grondversnellingen van het KNMI. Hierbij heeft SodM gekeken naar het gehele seismische monitoringsysteem in Groningen (met nadruk op de versnellingsmeters aan het oppervlak), dus niet alleen naar de G0-metingen waarvoor het KNMI in februari 2019 de instellingsproblemen meldde. SodM benadrukt dat de in dit rapport beschreven problemen vrijwel geheel zijn terug te voeren op de wijze waarop de metingen zijn uitgevoerd en verwerkt. De seismische metingen worden ook gebruikt door het Hazard and Risk Assessment (verder HRA-model dat de seismische dreiging en het seismisch risico berekent. Het feit dat de waargenomen problemen de modeluitkomsten kunnen beïnvloeden, is niet het gevolg van het HRA-model, maar is toe te schrijven aan de meetinformatie waarmee het model gevoed wordt.

1.1 Wat ging aan dit rapport vooraf?

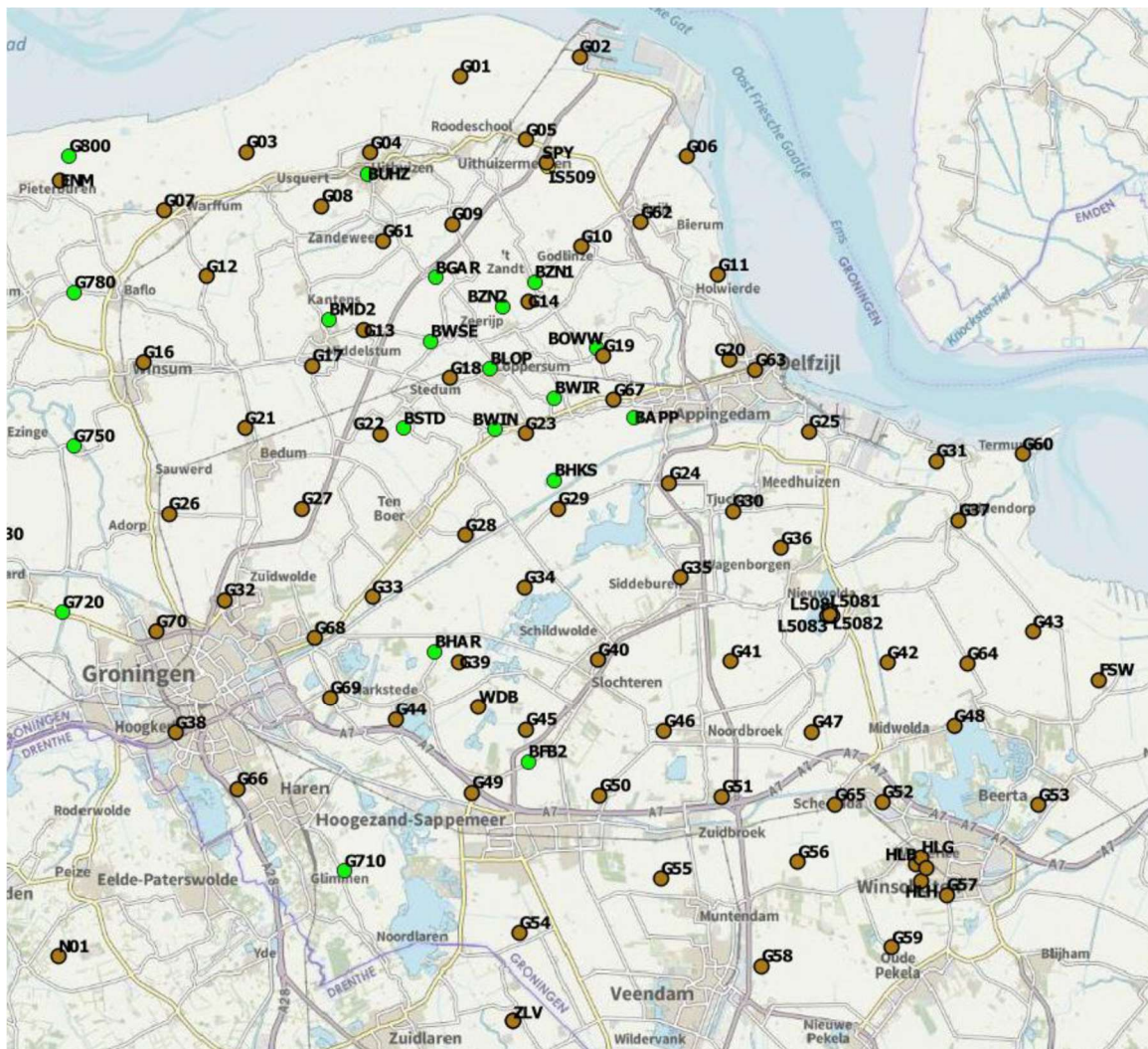
Wetenschappers die werken aan KEM-04, een onderzoek dat onder het Kennisprogramma Effecten Mijnbouw (verder: KEM) wordt uitgevoerd stellen SodM op 5 februari 2019 op de hoogte van problemen met de gerapporteerde waarden van de groundbewegingen tijdens de aardbevingen in Groningen. De onderzoekers zijn gestuit op inconsistenties in de metingen van de groundbewegingen. Volgens de onderzoekers zijn er systematische afwijkingen tussen de groundbewegingen gemeten met de B0-meters, geïnstalleerd in 2013 en 2014, en de later toegevoegde G0-meters. Andere onderzoekers die werken aan KEM-02 melden dat de data van de G0-meters op de KNMI-website eind 2018 zijn veranderd.

Bij navraag geeft het KNMI aan dat er sprake is geweest van afwijkende fabrieksinstellingen van de G0-meters (ten opzichte van eerder geleverde meters). Deze afwijking was onverwacht. De afwijking

tussen de grondbewegingen bij de B0- en G0-meters is in augustus 2018 door het KNMI ontdekt. De oorzaak daarvan is door het KNMI in november 2018 gevonden waarna de meetwaarden eind 2018 zijn gecorrigeerd. Het KNMI geeft aan dat door een menselijke fout daar op dat moment niet over gecommuniceerd is. De SodM validatie van de seismische metingen is in februari 2019, kort na de melding van de instellingsproblemen van de G0-meters gestart. In juni 2019 heeft SodM een tussenrapportage uitgebracht op basis van de tot op dat moment uitgevoerde onderzoeken en de conclusies die daar op dat moment uit getrokken werden (SodM, 2019e).

1.2 Wat was de scope van het SodM validatie-onderzoek?

De metingen met de seismometers van het KNMI waarmee de locatie en kracht van een beving bepaald worden zijn eerder (in 2018) binnen het KEM in opdracht van SodM beoordeeld door een onafhankelijke partij (NORSAR, 2018a en 2018b). In dat onderzoek zijn geen problemen naar voren gekomen die een significante invloed hebben op de kwaliteit van die metingen. De nadruk tijdens de huidige validatie lag daarom op de metingen van de grondbewegingen aan het oppervlak: piekgrondsnelheid (PGV) en piekgrondversnelling (PGA). Figuur 1 toont de locaties van de meters die daarvoor werden/worden gebruikt. SodM heeft in deze validatie gekeken naar de volledige meetketen van de installatie van apparatuur tot de rapportage van de metingen: type, installatie en kalibratie van de verschillende generaties en soorten versnellingsmeters, de verwerking van de meetsignalen, de operationele procedures, de kwaliteitsbewaking, de beschikbaarheid, kwaliteit, integriteit en betrouwbaarheid van het seismische netwerk, de beschikbaarheid van de meetgegevens en de rapportage van de resultaten van de metingen. Ook is gekeken naar kwaliteitscontroles, eventuele correcties en de selectie voor het betrouwbare gebruik van de metingen in diverse studies en modelketens.



Figuur 2: Overzicht pre-B0- en B0-versnellingsmeters in gebouwen (groen) en G0-versnellingsmeters bij boorgatlocaties (bruin). Bron: (Witteveen+Bos, 2019a Figuur 1.1)

In eerste instantie lag de nadruk van de validatie op een analyse van de gemelde afwijkingen van de G0-meters. Ook voerden inspecteurs van SodM een feitenonderzoek uit om vast te stellen wat er precies is gebeurd en wat we daarvan kunnen leren (SodM, 2019a).

Toen duidelijk werd dat er mogelijk ook andere problemen waren heeft dat geleid tot uitbreiding van het onderzoek. Voorbeelden zijn een aantal analyses van de beschikbaarheid (uptime) en de kwaliteit van de seismische meetinstrumenten en metingen in Groningen (Witteveen+Bos, 2019a; NAM, 2020d); onderzoeken naar de mogelijke invloed van gebouwen op een deel van de metingen met de eerder geïnstalleerde B0- en pre-B0-versnellingsmeters (Seister, 2019; Witteveen+Bos, 2019b en 2019c; Cavalieri, 2019, 2020a en 2020b) en onderzoek naar de mogelijke effecten van een aanvankelijk verkeerde verwerking van een (klein) deel van de G4-metingen (SodM, 2019b). Ook is nog een keer nauwkeurig gekeken naar de uitkomsten van de eerdere studie die grotendeels gericht was op het vaststellen van de kwaliteit van de G1 t/m G4 seismometers (NORSAR, 2018a en 2018b).

1.3 Leeswijzer

Dit rapport is de eindrapportage van het SodM-validatieonderzoek. Het bevat de uitkomsten van de uitgevoerde onderzoeken, de conclusies die daaruit getrokken kunnen worden en de (mogelijke) gevolgen daarvan. In deze eindrapportage zijn de resultaten van de acties en onderzoeken na het uitkomen van de tussenrapportage van juni 2019 gecombineerd met de resultaten die ten tijde van de tussenrapportage al beschikbaar waren. Deze rapportage sluit het gehele validatieonderzoek af en bevat alle eindconclusies en aanbevelingen daarvan. De indeling is als volgt:

- Hoofdstuk 2 beschrijft de doelen van de SodM-validatie;
- Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de aanpak van de validatie. SodM heeft voor het uitvoeren van de validatie verschillende organisaties opdracht gegeven op deelterreinen onderzoek te doen. In dit hoofdstuk wordt ook een overzicht gegeven van de onderzoeken die zijn uitgevoerd of nog worden uitgevoerd;
- Hoofdstuk 4 beschrijft welke (mogelijke) afwijkingen zijn gevonden gedurende de validatie;
- Hoofdstuk 5 geeft een overzicht hoe die afwijkingen zijn opgelost;
- Hoofdstuk 6 geeft een analyse van de impact van de gevonden afwijkingen;
- Hoofdstuk 7 is zelfstandig leesbaar voor eenieder die bekend is met seismische metingen en geeft een samenvatting en de conclusies en aanbevelingen. Ook is een overzicht opgenomen van acties en onderzoeken die op het moment van de SodM tussenrapportage in Juni 2019 nog niet waren afgerond en de opvolging die daar inmiddels aan is gegeven (status januari 2021);
- Hoofdstuk 8 geeft de referenties;
- Hoofdstuk 9 is een lijst van gebruikte termen, afkortingen en definities;
- Het rapport wordt afgesloten met een bijlage met de reactie van het KNMI op het recente onderzoek van NORSAR (NORSAR, 2020) waarin onderzocht is of het huidige seismische monitoringsysteem in Groningen state-of-the-art is voor de vaststelling van grondversnellingen.

2. Wat zijn de doelen van de SodM validatie?

De onafhankelijke validatie beschreven in dit rapport heeft als doel zeker te stellen dat de meetketen voor de vaststelling van de grondbewegingen in Groningen nu en in de toekomst op orde is (inclusief de borging daarvan) en om vast te stellen, daar waar er afwijkingen waren of zijn, wat de gevolgen daarvan zijn (geweest). Daarnaast heeft de validatie tot doel om vast te stellen of op de juiste wijze wordt omgegaan met seismische metingen van grondbewegingen die mogelijk nog problemen bevatten.

De validatie heeft de volgende subdoelen:

1. Inventarisatie van de kwaliteit en de integriteit van de seismische meetketen in Groningen, van de installatie van de meters in het veld tot de rapportage van de waarden van de vastgestelde grondbewegingen;
2. Evaluatie van het proces omtrent de afwijkende fabrieksinstellingen van de GO-meters: de communicatie daarover; (achterliggende) oorzaken; welke verbeteringen zijn mogelijk?
3. Vaststellen of de geconstateerde afwijkingen in de seismische meetwaarden inmiddels zijn opgelost en, als dat niet het geval is, vaststellen of er door de daarvoor verantwoordelijke partijen op de beste wijze mee wordt omgegaan;
4. Hebben de afwijkende metingen effect (gehad) op: kaarten van de waargenomen grondbewegingen (de zogenaamde shake maps); op de empirische Ground Motion Prediction Equation (de empirische GMPE); op de berekeningen van de seismische dreiging; op de berekeningen van het seismisch risico (het HRA-model); op de afhandeling van schadedossiers; op de omvang en prioritering van de versterkingsopgave;
5. Zeker te stellen dat het huidige netwerk en de gegevensverwerking van de metingen daarmee aan alle vereisten voor een kwalitatief hoogstaand (state-of-te-art) netwerk voldoen;
6. Vaststellen van de mogelijkheden en de noodzaak om door middel van onderzoek verdere verbeteringen in de methodieken te ontwikkelen. Bijvoorbeeld als onderdeel van het KEM of als onderdeel van andere kennisprogramma's.

3. Hoe heeft SodM de validatie aangepakt?

3.1 Wie hebben bijgedragen?

De SodM validatie steunt op meerdere technische onderzoeken, een audit door de Zwitserse seismologische dienst (verder: SED), zie (SED, 2019) en een door SodM uitgevoerd feitenonderzoek (SodM, 2019a). De technische onderzoeken kunnen worden verdeeld in onderzoeken naar de metingen zelf en onderzoeken naar de verwerking van die metingen tot de data zoals die door het KNMI op haar website wordt gepubliceerd. Voor de uitvoering van de technische onderzoeken is gebruik gemaakt van de expertise en capaciteit van kennisinstituten die al onderzoek uitvoerden naar de groundbewegingen in Groningen in het kader van het KEM-onderzoeksprogramma of al op een andere manier betrokken waren bij wetenschappelijk onderzoek naar de seismiciteit in Groningen. Het gaat hierbij om de volgende partijen: Technische Universiteit Delft (verder TU Delft), TNO, Fugro, Hanze University, Seister Seismic Engineering Solutions, Witteveen+Bos en NORSAR. Daarnaast heeft NAM op verzoek van SodM onderzoeken uitgevoerd of laten uitvoeren. Tenslotte is gebruik gemaakt van expertise binnen de eigen SodM organisatie en van de expertise en adviezen van een aantal leden van het KEM-expertpanel.

3.2 Welke onderzoeken zijn betrokken bij de validatie?

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de verschillende onderzoeken die in het kader van de validatie zijn uitgevoerd of daarvoor relevant zijn. Onder de tabel wordt per onderzoek een korte toelichting gegeven.

Onderzoeken/uitgevoerd in het kader van de SodM validatie van de Groningen seismische metingen							
#	SodM validatie doel(en)	Referentie	Onderwerp	Toelichting	Hoe	Opdracht	Uitvoerende partij
Metingen							
1	1,3	(Fugro, 2019a, 2020a)	Kalibratie B0 en G0 versnellingsopnemers	Check calibratie B0 en de G0 opnemers (na correctie voor verkeerde instelling)	Metingen op een triitafel van de Hanze Hogeschool	SodM	Hanze University / Fugro consortium
2	1,3, 6	(Fugro, 2019b)	SCPT metingen	Betere vaststelling site response voor 14 G0-stations	Aanvullende SCPT sonderingen bij 14 G0 stations in mei 2019	SodM/EZK	Fugro
3	1, 3, 6	(NAM, 2019, 2020b)	SCPT metingen	Betere vaststelling site response voor nog eens 55 G0 stations	Aanvullende SCPT sonderingen bij 55 G0 stations in september en oktober 2020 in opdracht van NAM	NAM	Fugro
4	1	(Witteveen+Bos, 2019a)	Inventarisatie versnellingsmeters en data Groningen	Kwaliteitscontrole KNMI versnellingsmeters en metingen voor de periode 2014-2018	Analyse van alle gemeten records (2014 - 218) ter controle op problemen in de signalen	SodM	Witteveen+Bos, TUD en TNO
5	3	(TU Delft, 2019)	KNMI correctie G0 metingen	Vaststelling betrouwbaarheid G0 metingen (na correctie)	Review op basis aangeleverde documentatie	SodM	TUD
6	1,3	(Seister, 2019) (Fugro, 2020a)	Vaststelling invloed bevestiging B0 meters in gebouwen	Vaststelling hoe sterk de B0 meetsignalen gedempt worden bij hogere frequenties	Vergelijking B0 metingen met nabije (gecorrigeerde) G0 metingen	SodM	Seister Seismic Engineering Solutions
7	1,3	(Witteveen+Bos, 2019b, 2019c)	Vaststelling invloed bevestiging B0 meters in gebouwen	Vaststelling of de B0 meetsignalen niet gedempt worden bij hogere frequenties	Modelberekeningen van de te verwachten gebouweffecten op de B0 meters	SodM	Witteveen+Bos, TUD en TNO
8	1,3	(Witteveen+Bos, 2019b)	Vaststelling invloed bevestiging G0 meters op kleine betonplaten	Vaststelling dat de G0 meetsignalen niet gedempt worden bij hogere frequenties	Modelberekeningen voor de toegepaste installatie van de G0 meters	SodM	Witteveen+Bos, TUD en TNO
9	1,3	(Cavalieri, 2020a, 2020b)	Vaststelling invloed bevestiging B0-meters in gebouwen	Fysische verklaring voor de geconstateerde verschillen tussen nabijgelegen B0- en G0-metingen	Berekeningen van te verwachten gebouweffecten op de B0-meters met geavanceerde numerieke modellen in opdracht	NAM	MOSAYK
10	1,2,3,5	(SED, 2019)	Review Zwitserse Seismologische dienst (SED)	Oordeel over de betrouwbaarheid van de gehele keten van het KNMI seismologisch meetnetwerk in Groningen	Documentatie reviews, interviews met KNMI, installatiebedrijf, veldinspecties, beoordeling bevindingen Fugro en Witteveen+Bos, analyse van door KNMI aangeleverde informatie	SodM	Zwitserse Seismologische Dienst SED, adviesrol Prof. Wiemer, (lid KEM expert panel)
11	1	(KNMI, 2019d)	Vaststellen kwaliteit installatie pre-B0-meters	Kwaliteitscontrole pre-B0 versnellingsmeters en metingen	Bureau onderzoek op basis van informatie nog beschikbaar bij het KNMI	SodM	KNM/SodM
12	1	Zie sectie 4.3	Vaststellen kwaliteit installatie B0-meters	Kwaliteitscontrole B0 meters / metingen	Veldinspectie B0-meters door KNMI / NAM / SodM team	SodM	KNMI/SodM/NAM
13	2	(SodM, 2019a)	Fact finding exercitie	Lering van wat er is gebeurd voor de toekomst. Verduidelijking rollen en verantwoordelijkheden	Interviews met betrokkenen (NAM, KNMI, EZK, installatiebedrijf etc.)	SodM	SodM

Verwerking metingen							
14	1, 3, 4	(SodM, 2019b)	Foutieve verwerking G4 metingen Slochteren beving	Vaststelling mogelijke invloed op de HRA uitkomsten	inschatting van het effect door onafhankelijke domeinexperts	SodM	SodM, adviesrol Prof. Iervolino (lid KEM expert panel)
15	3, 4	(PWC, 2019)	Effecten problemen in de metingen van de groundbeweging op de schadeafhandeling	Hebben de instellingsproblemen van de G0-meters en de demping van de B-meters invloed gehad op schadeafhandeling in Groningen	Onafhankelijke verificatie van de NAM bevingingen / conclusies dat er geen effect is geweest	NAM	PWC
16	3,4	(SodM, 2019c/d)	Effect andere dan door KNMI aangenomen G0-meterinstellingen op ontwikkeling NAM HRA	Verificatie van de claim van KNMI en NAM dat de G0 metingen niet gebruikt zijn voor de ontwikkeling van de HRA V5	Review van de HRA V4 en V5 rapportages van NAM	SodM	SodM, adviesrol Prof. Iervolino (lid KEM expert panel)
17	3,4	(NAM, 2020a)	Effecten op HRA berekeningen	Beoordeling effect gecorrigeerde G0 en weglaten G4 metingen op HRA berekeningen	HRA berekeningen met GMM V6	NAM	NAM
18	3,4	(NAM, 2020c)	Effecten op HRA berekeningen	Beoordeling effect gecorrigeerde G0- en B-metingen en gebruik G0 SCPT-metingen op HRA berekeningen, in uitvoering	HRA berekeningen met GMM V7	NAM	NAM
19	3,4	(NAM, 2020c)	Effecten op Emprische GMPE	Beoordeling effect data correcties en aangepaste data selectie op de Emprische GMPE	Herberekening Emprische GMPE	NAM	NAM

Onderzoeken uitgevoerd in het kader van de SodM validatie van de Groningen seismische metingen							
#	SodM validatie doel(en)	Bijlage	Onderwerp	Toelichting	Hoe	Opdracht	Uitvoerende partij
Langere termijn onderzoeken							
20 KEM-02	3,4,6	(Witteveen+Bos, 2020a/b/c)	Site response model	Check en verbetering van bestaand model voor berekening lokale opslingering	Modelberekeningen aan effecten onzekerheden, knipklei, terpen, sloten en kanalen	EZK	Consortium Witteveen+Bos
21 KEM-04	3,4,6	(Fugro, 2020)	Ground Motion Model (GMM)	Check prestaties bestaande modellen (GMM V5 en V6) Aanzet ontwikkeling volgende generatie GMM model	Modelberekeningen van effect inhomogeniteiten in de eigenschappen van de diepe ondergrond in Groningen	EZK	Consortium Fugro
22 KEM-11 fase 1	1, 6	(NORSAR, 2018a/b)	Groningen seismic catalogue	Verbetering kwaliteit seismische data Groningen (aantallen bevingen, sterkte, locatie, mechanisme, vastgestelde	Onderzoek naar verbeteringen in de seismische metingen en de verwerking daarvan in Groningen	SodM	NORSAR
23 KEM-11 fase 2A	1,5,6	(NORSAR, 2020)	Seismische metingen voor GMPE berekeningen in Groningen	Is huidig seismisch meetsysteem state-of-the-art voor GMM berekeningen? Gevolgen van de verschillen met de daaraan	Analyse van netwerk ontwerp, instrumentatie, datacollectie en dataverwerkingsprocedures	SodM	NORSAR
24	1	(KNMI, 2021)	Kwaliteitscontrole en publicatie KNMI 1995 – 2013 Groningen seismische data	Een deel van de seismische data Groningen is nog niet publiek beschikbaar, in uitvoering	Maatwerkopdracht KNM in opdracht van SodM. Homogene golfvorm database, inclusief up-to-date metadata. Open access via KNMI web portal. Rapport over de datakwaliteit van de vroege getriggerde dataset	SodM	KNMI
25 KEM-11 fase 2B	1	(NORSAR, 2021)	Kwaliteitscontrole en publicatie KNMI 1995 – 2013 Groningen seismische data	Een deel van de seismische data Groningen is nog niet publiek beschikbaar, in uitvoering	Onafhankelijke kwaliteitscontrole door NORSAR op de uitvoering van de KNMI maatwerkopdracht	SodM	NORSAR

Tabel 1: Overzicht onderzoeken

3.4 Toelichting

Onderzoek 1 controleert met onafhankelijke metingen op triltafels voor een aantal B0 en G0 versnellingsmeters of deze de juiste versnelling meten. De gecontroleerde versnellingsmeters werden daarvoor verwijderd uit de meetopstellingen in het veld en zijn na afloop van de triltafelmetingen teruggeplaatst. Voor de G0-meters werd eerst een door het KNMI vastgestelde correctie toegepast. De metingen vonden plaats in een laboratorium van de Hanze Hogeschool.

Onderzoek 2 bestaat uit ondiepe grondboringen en metingen van de voortplantingssnelheid van seismisch golven tot dieptes van 30 meter door Fugro op de locaties van 14 G0-meetstations in opdracht van EZK en SodM. De (CPT en SCPT) metingen zijn o.a. uitgevoerd om te onderzoeken wat de oorzaak zou kunnen zijn van de verschillen tussen de metingen van nabijgelegen B0- en G0-meters.

Onderzoek 3 bestaat uit ondiepe grondboringen en metingen van de voortplantingssnelheid van seismisch golven tot dieptes van 30 meter door Fugro op de locaties van nog eens 55 G0-meetstations (in twee meetcampagnes in opdracht van NAM als aanvulling op onderzoek 2).

Onderzoek 4 inventariseert de beschikbaarheid (uptime) en de kwaliteit van alle KNMI-versnellingsmeters en metingen in het Groningenveld in de periode 2014-2018.

Onderzoek 5 is een onafhankelijke check door TU Delft op een studie van het KNMI op basis waarvan het KNMI heeft vastgesteld dat de G0-versnellingsmeters in het veld, na correctie, nu de juiste waarden voor de grondbewegingen meten.

In **Onderzoek 6** zijn de met B0-meters gemeten grondversnellingen in detail vergeleken met de metingen van G0-meters in de directe omgeving (voor dezelfde aardbevingen). De hiervoor gebruikte B0- en G0-meters staan binnen een afstand van enkele honderden meters tot iets meer dan 1,5 km (0,43 – 1,7 km) van elkaar. Dezelfde analyse is uitgevoerd voor paren van G0-meters op wat grotere afstanden van elkaar (1,13 – 4,7 km). Dit om te toetsen of gevonden verschillen tussen de B0- en G0-metingen kunnen worden verklaard door verschillen in de ondergrond die ook op deze relatief korte afstanden kunnen optreden.

In **Onderzoek 7** is voor 4 gebouwen met relatief eenvoudige modelberekeningen de invloed van het gebouw onderzocht op de B0-meting van de grondbeweging. Daarvoor zijn de eigenschappen (massa/ afmeting/ fundering) van de gebouwen en die van de lokale ondergrond gebruikt. Dit onderzoek is in een later stadium met geavanceerdere modellen herhaald in onderzoek 9.

In **Onderzoek 8** is de analyse uit onderzoek 7 uitgevoerd voor de G0-meters. Voor de G0-meters gaat het niet om het effect van gebouwen, maar om het mogelijke effect van de relatief kleine betonplaten waarop de G0-meters zijn gemonteerd.

In **Onderzoek 9** heeft MOSAYK voor de NAM geavanceerde numerieke modelberekeningen uitgevoerd. Daarmee is onderzocht of de verschillen tussen de metingen van nabijgelegen B0- en G0-meters verklaard kunnen worden door de installatie van de B0-meters in gebouwen.

Onderzoek 10 is een onafhankelijke audit door de Zwitserse seismologische dienst (SED) op de gehele seismische meetketen in Groningen, van de installatie van de meters in het veld tot de rapportage van de waarden van de vastgestelde grondbewegingen. SED heeft hiervoor de (tussen)resultaten van onderzoeken 1, 4, 5, 6, 7 en 13 gebruikt. Ook is aanvullende informatie opgevraagd bij het KNMI. Een medewerker van SED heeft het KNMI bezocht en KNMI-medewerkers geïnterviewd. Een aantal B0- en G0- meetstations in Groningen is bezocht. De medewerker van SED heeft gesproken met de projectleiders van Fugro en Witteveen+Bos betrokken bij onderzoeken 1, 4, 5, 6 en 7, met SodM-medewerkers en met een lid van het KEM-expertpanel.

In **Onderzoek 11** is door SodM samen met het KNMI onderzocht welke informatie nog beschikbaar is over de installatie van de meters van het pre-B0 netwerk die vanaf 2013 door het KNMI zijn vervangen door de meters van het B0-netwerk.

In **Onderzoek 12** is door middel van veldinspecties door SodM, het KNMI en NAM onderzocht wat de kwaliteit is van de installatie van de meters van het huidige KNMI B0-netwerk. Daarnaast heeft het KNMI een kwaliteitsanalyse uitgevoerd op alle beschikbare metingen van het B0-netwerk.

Onderzoek 13 is het feitenonderzoek van SodM naar de verantwoordelijkheden, rollen en procedures ten aanzien van het seismische monitoringsysteem in Groningen. De informatie voor het feitenonderzoek is verzameld door het opvragen van documenten en door interviews met medewerkers van het KNMI, NAM, Antea Group (installateur van de seismische meters) en Kinematics (leverancier van de apparatuur). Ook is gebruik gemaakt van vragenlijsten die ter beantwoording werden opgestuurd. Het feitenonderzoek en de vragen zijn gericht op het verkrijgen van inzicht in: 1) hoe heeft dit kunnen gebeuren, 2) is er adequaat gehandeld en 3) wat kunnen we hiervan leren?

Onderzoek 14 kijkt kwalitatief naar het mogelijke effect van de aanvankelijk verkeerde verwerking van de G4 meetsignalen tijdens de $M_L=2,6$ aardbeving bij Slochteren op 27 mei 2017. De fout is

veroorzaakt door een verkeerde verwerking van op zichzelf correcte seismische metingen. De verkeerde verwerking is uitgevoerd door een onderzoeker die werkt in het consortium van de partijen² die het grondbewegingsmodel versie 5 (het zogenoemde Ground Motion Model, afgekort: GMM) voor Groningen heeft ontwikkeld. Het GMM-model berekent welke grondbewegingen aan het oppervlak zijn te verwachten voor een aardbeving van een gegeven sterkte (magnitude) op een gegeven plaats in het Groningenveld. Het GMM is op zijn beurt onderdeel van de NAM HRA modelketen voor de berekening van de seismische dreiging en het seismisch risico in Groningen. SodM en een lid van het KEM-panel hebben onderzocht of de grootte van het effect op de eerdere V5 GMM-versie van het grondbewegingsmodel van NAM kan worden ingeschat.

Onderzoek 15 is een onafhankelijke controle door PricewaterhouseCoopers (PWC) op de NAM-vaststelling dat de instellingsproblemen van de G0-meters en de mogelijke dempingseffecten in een deel van de B0-metingen geen effect hebben gehad op de schadeafhandeling door NAM in Groningen.

Onderzoek 16 kijkt of de afwijkende waarden van de G0-meters een effect kunnen hebben gehad op de V5 GMM van het grondbewegingsmodel van NAM.

In **Onderzoek 17** voert NAM op verzoek van SodM enkele eerste berekeningen uit van de seismische dreiging en het seismisch risico met de begin 2019 bij NAM beschikbaar gekomen volgende versie van het Ground motion model (V6 GMM) met als doel een eerste indruk te krijgen of de impact van een aantal meetproblemen beperkt is of niet.

Onderzoek 18 is onderdeel van de werkzaamheden in het kader van de reguliere actualisatie van het HRA-model. In het kader van de ontwikkeling van GMM V7 is de data die wordt gebruikt voor het opstellen van de GMM onderworpen aan een strenge kwaliteitscontrole en waar nodig gecorrigeerd. Deze werkzaamheden en de resultaten ervan zijn gedocumenteerd in de actualisatie van het addendum van het NAM Studie en Data Acquisitie Plan van november 2020.

In **Onderzoek 19** heeft NAM een nieuwe versie van de empirische GMPE opgesteld op basis van de gecorrigeerde G0-grondversnellingen. Op dit moment wordt gewerkt aan een volgende actualisatie om de problemen met de B-meters in de kelders te adresseren.

Onderzoek 20 is het KEM-02 onderzoek naar de opslinging van de seismische grondbewegingen door de eigenschappen van de ondiepe ondergrond in Groningen. Gekeken is of uitkomsten van dit onderzoek relevant zijn voor de validatie van de seismische metingen in Groningen zoals beschreven in dit rapport. Het onderzoek is onderdeel van het KEM-programma (<https://kemprogramma.nl>).

Onderzoek 21 is het KEM-04 onderzoek naar de voortplanting van de seismische golven in een complex 3-dimensionaal ondergrondmodel van Groningen en de grondbewegingen aan het oppervlak die daar een gevolg van zijn. Gekeken is of uitkomsten van dit onderzoek relevant zijn voor de validatie van de seismische metingen in Groningen zoals beschreven in dit rapport. Het onderzoek is onderdeel van het KEM-programma.

Onderzoek 22 is het KEM-11 onderzoek dat in opdracht van SodM al in 2018 is uitgevoerd door NORSAR. Daarmee heeft SodM met name de wijze waarop het KNMI de locatie en de sterkte (magnitude) van de bevingen bepaalt laten controleren. Er werden geen grote problemen gevonden.

² Dit consortium bestaat uit Deltares, Imperial College, KNMI, NAM, University of Liverpool en Virginia Tech.

Wel zijn er volgens NORSAR nog verbeteringen mogelijk. Het onderzoek is in een eerder stadium, voordat de problemen met de metingen van de groundbewegingen werden vastgesteld, uitgevoerd en afgerond. Het onderzoek is onderdeel van het KEM-programma.

In **Onderzoek 23** heeft NORSAR in opdracht van SodM onderzocht of het huidige seismische monitoringsysteem in Groningen state-of-the-art is en welke verbeteringen eventueel nog mogelijk zijn (KEM-11 2A). Daarnaast is onderzocht wat de mogelijke gevolgen zijn van de verschillen tussen het huidige en eerdere versies van het seismische monitoringsysteem in Groningen. Ook dit onderzoek is onderdeel van het KEM-programma.

In de volgende hoofdstukken worden de belangrijkste uitkomsten en bevindingen van de bovenstaande onderzoeken op hoofdlijnen beschreven en gerelateerd aan de doelen van de SodM validatie.

=====

Naar aanleiding van de validatie zijn recent nog twee vervolgonderzoeken opgestart:

Onderzoek 24 gaat over de seismische golfvormdata uit de periode van vóór 2013. KNMI gaat deze data in opdracht van SodM openbaar maken. Daarvoor wordt een kwaliteitscontrole uitgevoerd, wordt de data overgezet in een modern dataformat en wordt metadata toegevoegd. De data zullen naar verwachting medio 2021 gepubliceerd worden door het KNMI.

Onderzoek 25 is de onafhankelijke kwaliteitscontrole op Onderzoek 24 die in opdracht van SodM in 2021 zal worden uitgevoerd door NORSAR (KEM-11 2B). Deze kwaliteitscontrole zal naar verwachting medio 2021 worden gepubliceerd op de website van SodM.

4. Bevindingen inspectie meetketen

Het eerste doel van de SodM validatie is de vaststelling van de kwaliteit en de integriteit van de seismische meetgegevens in Groningen: er is gekeken naar de gehele meetketen van de installatie van de meters in het veld tot de rapportage van de vastgestelde groundbewegingen.

Het validatieonderzoek van SodM heeft de volgende bevindingen opgeleverd ten aanzien van de meetketen:

1. De afwijkende fabrieksinstellingen van de G0-meters en de correctie daarvan zijn bevestigd;
2. De metingen met de G1-G4 seismometers zijn correct;
3. Er zijn kwaliteitsissues met de installatie van (een deel van) de pre-B0 en B0-meters;
4. Een deel van de B0-meters meet bij frequenties boven de 3 - 5 Hz lagere grondversnellingen dan nabije G0-meters;
5. Bevinding 4 speelde mogelijk ook bij een deel van de pre-B0-metingen;
6. Er zijn issues vastgesteld met de kwaliteitsborging en de kwaliteitscontrole (QA/QC) van het seismisch monitoringsysteem;
7. Er zijn onduidelijkheden in de rollen en verantwoordelijkheden t.a.v. het seismisch monitoringsysteem.

Daarnaast is tijdens het onderzoek een fout in de verwerking van de metingen naar voren gekomen:

8. De G4 metingen van de $M_L=2,6$ Slochteren beving van 27 mei 2017 zijn aanvankelijk door de onderzoekers van NAM onjuist verwerkt in versie 5 van het groundbewegingsmodel dat eerder werd gebruikt in de NAM-risicoanalyses;

In de paragrafen 4.1 t/m 4.8 worden deze bevindingen in meer detail besproken. Een aantal overige zaken (meter-oriëntatie aanpassingen, beschikbaarheid van meters en een onderzoek naar de kwaliteit van het huidige netwerk) worden behandeld in paragraaf 4.9.

4.1 Instellingsproblemen van de G0-meters (bevinding 1)

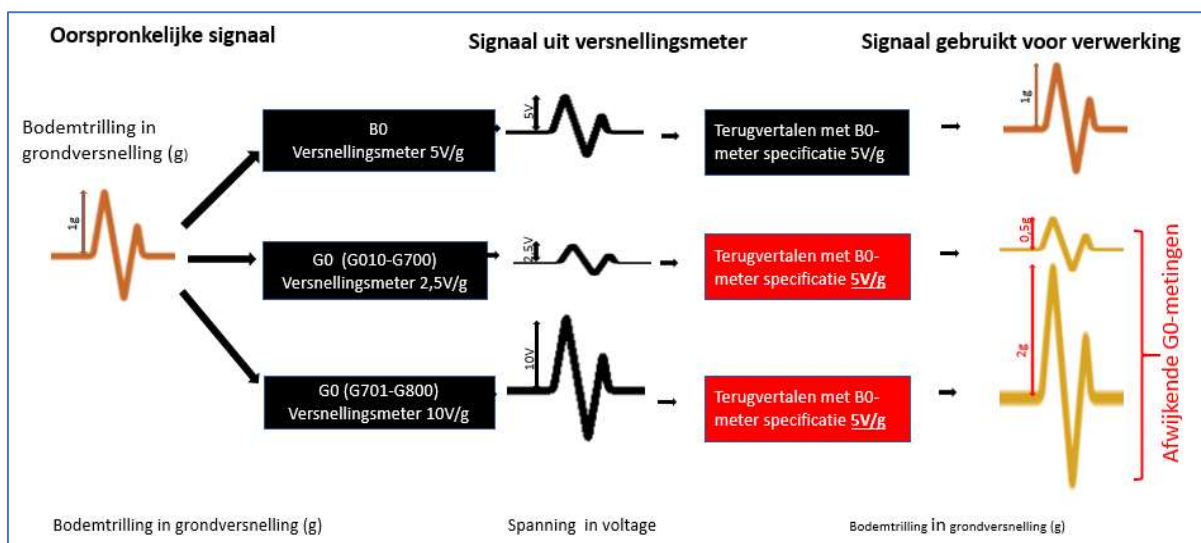
Het KNMI meet momenteel met 79 G0-meters (KNMI, 2019a) de seismische grondversnellingen aan het oppervlak die optreden door de aardbevingen in Groningen. Het G-netwerk is in de periode 2014-2017 door de Antea Group geïnstalleerd in opdracht van NAM. Het bestaat op dit moment uit 10 “losse” G0-versnellingsmeters op kleine betonplaten en 70 boorgatlocaties met meerdere meters. Eén van de meters op een boorgatlocatie wordt niet actief gebruikt. Het totale aantal actieve meters in het G0-netwerk is daarmee op dit moment 79. De locaties zijn verspreid over het Groningen gasveld. Op de boorgatlocaties bestaat het G-netwerk uit een versnellingsmeter (G0) op een kleine betonplaat aan het oppervlak en vier seismometers (G1 t/m G4) op 50, 100, 150 en 200 meter diepte in het boorgat (zie Figuur 1 in Hoofdstuk 1). De installatie van de G0-meters op de kleine betonplaten zorgt volgens het KNMI voor een onverstoord meting van de grondversnellingen die aan het vrije oppervlak optreden (zogenoeten vrije veld metingen).

Onderzoekers betrokken bij KEM-04 melden aan EZK en SodM op 5 februari 2019 dat zij systematische verschillen zien tussen de grondversnellingen in Groningen gemeten met G0- en B0-meters (Seister, 2019). De onderzoekers vergelijken het meetsignaal van G0-meters met dat van nabije B0-meters (op afstanden van 0,43 – 1,7 km) die in gebouwen geïnstalleerd zijn. Ze gebruiken voor die analyse G0-data van vóór de correctie door het KNMI (waarover op dat moment nog niet is

gecommuniceerd). Het effect van verschillen in de lokale ondergrond is bij lage frequenties (grootste golflengten) het kleinst en zelfs daar worden steeds aanzienlijke verschillen in de amplitude van de grondversnelling gezien ten opzichte van de metingen met nabije B0-meters. De conclusie van de onderzoekers is: er klopt iets niet. Op dat moment is het voor de onderzoekers niet duidelijk of het gaat om een probleem met de B0- of met de G0-meters.

Bij navraag geeft het KNMI aan dat er een probleem is geweest, veroorzaakt door, aanvankelijk niet opgemerkte, afwijkende fabrieksinstellingen van de G0-meters. Het KNMI heeft dat in november 2018 geconstateerd [KNMI, 2019c]. Eind 2018 heeft het KNMI de header behorende bij de meetgegevens op de KNMI-website daarvoor gecorrigeerd.

Het probleem is volgens het KNMI veroorzaakt doordat verschillende leveringen van G0-meters verschillende (hardware) instellingen hebben. Zowel NAM, het KNMI als het bedrijf dat de G0-meters heeft geïnstalleerd (Antea Group) waren zich hiervan niet bewust bij de installatie. De afgegeven signalen van de G0-meters tijdens aardbevingen worden daardoor tot december 2018 met een verkeerde kalibratiefactor omgezet in grondversnellingen. De 69 G0-meters op de boorgatlocaties maten hierdoor, volgens het KNMI, een factor 2 te lage grondbewegingen. De 10 “losse” G0-meters maten een factor 2 te hoge grondbewegingen (KNMI, 2019a).



Figuur 1: Effect verschillende meterinstellingen op de meetwaarden.

De controle door TU Delft (TU Delft, 2019) in opdracht van SodM, de audit door de Zwitserse seismologische dienst in opdracht van SodM (SED, 2019) en het feitenonderzoek van SodM (SodM, 2019a) bevestigen de door het KNMI gegeven verklaring voor de problemen met de metingen. In de onderzoeken wordt de technische achtergrond van de problemen in detail onderzocht. Het blijkt dat voor verschillende partijen meters steeds iets verschillende versnellingsmeters van hetzelfde merk (Kinematics) zijn besteld. Er zijn verschillen in het maximale bereik (2g en 4g), de uitgangsspanning (2,5V en 10V) en de manier van aansluiten (zie SED, 2019; SodM, 2019a). Dit was niet bekend tijdens de installatie van de G0-meters. Daardoor is voor alle G0-meters hetzelfde aansluitschema gebruikt als voor de eerdere B0-meters in 2013/14. Dat leidt tot een andere verhouding tussen de versnelling en het afgegeven voltage, wat uiteindelijk leidt tot andere gerapporteerde waarden voor de gemeten grondversnelling (Figuur 3). De G0-meters bij de boorgaten maten daardoor een factor 2 lager, de “losse” G0-meters op betonplaten juist een factor 2 hoger (KNMI, 2019a).

Omdat er een ander voltagebereik wordt gebruikt dan waarvoor de meters zijn geoptimaliseerd, staat ook de apparatuur die het analoge meetsignaal omzet naar een digitaal signaal (de digitisers) op een ander voltage ingesteld. Dat is suboptimaal (SodM, 20219a) maar levert geen aanvullende problemen op met de metingen.³

4.2 De metingen met de G1-G4 seismometers kennen geen problemen (bevinding 2)

Een eerder onderzoek (NORSAR, 2018a, 2018b) was voornamelijk gericht op de G1 t/m G4 seismometers in boorgaten tot 200 meter diepte, en een aantal oudere boorgat seismometers. De seismometers worden gebruikt voor de vaststelling van het tijdstip, de kracht (de magnitude) en de locatie van de geïnduceerde aardbevingen in Groningen. De instelling van de G0-meters heeft daarop geen invloed. Het onderzoek was onderdeel van het KEM-programma. Er zijn in deze studie geen opmerkelijke of belangrijke problemen met de metingen van de boorgat-seismometers gevonden. In (NORSAR, 2018a) geeft NORSAR voor de boorgat-seismometers in een overzicht aan welke metingen in welke periode beschikbaar zijn. Ook wordt aangegeven welk (klein) deel van de metingen niet betrouwbaar is en niet gebruikt zou moeten worden.

4.3 Installatie issues pre-B0- en B0-meters (bevinding 3)

Het KNMI meet de groundbewegingen ook met het B-netwerk. De huidige B0-meters staan gemonteerd op de vloeren van gebouwen verspreid over het centrale deel van het Groningen gasveld. Deze meters heeft Antea Group tussen 2013 en 2014 geïnstalleerd in opdracht van NAM. De B0-meters vervangen de eerdere, minder geavanceerde, versnellingsmeters (de pre-B0-meters) die tot die tijd gebruikt werden om de grondversnellingen te meten (KNMI, 2019d). De installatie van de pre-B0-meters was ook in gebouwen, grotendeels dezelfde als later gebruikt voor de B0-meters. Redenen voor de installatie in gebouwen waren het destijds beperkte budget en de beschikbaarheid van aansluitingen voor elektriciteit en communicatie (KNMI, 2020b). Installatie van versnellingsmeters in gebouwen is internationaal niet ongebruikelijk. Montage van versnellingsmeters in gebouwen op een harde ondergrond levert in het algemeen geen problemen op. Dit blijkt uit de controles die gebruikelijk zijn bij het opzetten van dergelijke meetnetwerken. Deze controles hebben tot doel om te bepalen of de eigenschappen van de gebouwen waarin de meters zijn gemonteerd geen significante effecten hebben op de gemeten grondversnellingen. De versnellingsmeters in Groningen zijn in gebouwen gemonteerd die niet op harde maar op zachte grond staan en dergelijke controleonderzoeken zijn destijds niet gedaan.

Het KNMI geeft aan (KNMI, 2019d) dat zowel de pre-B0- als de B0-meters destijds in opdracht van de NAM met een ander doel zijn geïnstalleerd dan het verzamelen van vrije-veld meetgegevens van groundbewegingen voor groundbewegings-modellen (GMMs als onderdeel van de HRA voor de berekening van de seismische dreiging en het seismisch risico).

Tabel 2 geeft een overzicht van de locaties van de B0- en de pre-B0-meters en de periode waarin ze in gebruik waren of in gebruik zijn (bron: KNMI, 2019d). De pre-B0-meters waren de enige versnellingsmeters voor de metingen van de grondversnellingen in de periode voor 2013. Tijdens een bezoek aan het KNMI door SodM is gebleken dat er geen aanvullende informatie, zoals tekeningen,

³ In combinatie met het hoge ruisniveau in Groningen (veroorzaakt door bijvoorbeeld verkeer) leidt het niet tot een andere signaal/ruis verhouding.

foto's of rapporten, meer beschikbaar is over de installatie en montage van deze in 2013/2014 verwijderde pre-B0-meters. Het is niet duidelijk of de pre-B0-meters destijds wel, gedeeltelijk of niet aan de grond verankerd waren. Bij het KNMI is bekend dat een aantal eigenaren destijds bezwaar heeft gemaakt tegen de verankering van de meters aan de betonvloer (2019d).

Station	Location	Instr	Latit.	Long.	Open	Closed	Station	Instr.	Open	Closed
WSE	Westeremden	GeoSig-16	53,3457	6,7103	20061011	20131001	BWSE	Episensor	20131001	
MID1	Middelstum-1	GeoSig-16	53,3485	6,6427	19961220	20140701	BMD1	Episensor	20131001	
MID2	Middelstum 2	GeoSig-16	53,3447	6,6432	19961220	19980210				
MID3	Middelstum-3	GeoSig-16	53,3543	6,6475	19980210	20131001	BMD2	Episensor	20131001	
GARST	Garsthuizen	GeoSig-18	53,369	6,7142	20090915	20131001	BGAR	Episensor	20131001	
KANT	Kantens	GeoSig-18	53,3784	6,6627	20070403	20140701				
WIN	Winneweer	GeoSig-18	53,3132	6,7478	20070403	20131001	BWIN	Episensor	20131001	2020
HKS	Hoeksmeer	GeoSig-18	53,2919	6,7855	20050426	20131001	BHKS	Episensor	20131001	
STDM	Stedum	GeoSig-18	53,3133	6,6927	20090915	20131001	BSTD	Episensor	20131001	
FRB2	Froombosch-2	GeoSig-18	53,1886	6,7662	20060322	20131001	BFB2	Episensor	20131001	
HARK	Harkstede	GeoSig-18	53,2302	6,7097	20060816	20131001	BHAR	Episensor	20131001	
ZAN1	t Zandt-1	GeoSig-18	53,3669	6,7755	19990629	20131001	BZN1	Episensor	20131001	2020
ZAN2	t Zandt-2	GeoSig-18	53,358	6,7553	19990629	20131001	BZN2	Episensor	20131001	
BONL	Oosternieland		53,4013	6,7555				Episensor	20131001	2015
BAPP	Appingedam		53,316	6,836				Episensor	20131001	
BWIR	Wirdum		53,3237	6,7867				Episensor	20131001	
BUHZ	Uithuizen		53,4082	6,6733				Episensor	20131001	2020
BOWW	Oosterwijtwerd		53,3417	6,8132				Episensor	20131001	
BLOP	Loppersum		53,335	6,7473				Episensor	20131001	

Tabel 2 Overzicht pre-B0 en B0 meters (bron KNMI, pre-B0-meters: Geosig-16 opnemers; B0-meters: Episensor opnemers)

Om de kwaliteit van de installatie van het huidige B-netwerk vast te stellen zijn de gebouwen waar de B0-meters op dat moment geïnstalleerd stonden op 21 en 22 november 2019 bezocht door een team van SodM, het KNMI en NAM. Die veldinspectie leverde de volgende bevindingen op:

- Ten tijde van de veldinspectie zijn er 15 B0-stations in actief gebruik
- De meeste stations lijken langere tijd niet bezocht door het KNMI⁴;
- Sommige stations staan niet meer geheel waterpas (BHAR, BHKS);
- Drie meetstations bevinden zich in kelders (BUHZ, BWIN en BZN1)⁵;
- Station BSTD (het vroegere STDM) is niet mechanisch verankerd aan de bodem van het gebouw, de overige meters zijn wel mechanisch verankerd aan de bodem van het gebouw;
- Door aanwezigheid van een andere sensor is station BGAR is niet toegankelijk voor inspectie
- Stations BFB2, BWSE en BZN1 kunnen niet worden bezocht (eigenaar niet thuis).

⁴ Volgens het KNMI worden de stations regulier elke 2 jaar bezocht of wanneer er een aanleiding is, bijvoorbeeld blijvend uit de data.

⁵ De drie B0-stations in kelders zijn later in 2020 uit gebruik genomen.

4.4 Een deel van de B0-meters meet bij frequenties boven 3 – 5 Hz lagere grondversnellingen dan nabije G0-meters (bevinding 4)

Bij het bespreken van de afwijkende data van de G0-meters met onderzoekers van de KEM-02 en KEM-04 onderzoeken, geven deze aan dat er ook problemen lijken te zijn met de B0-metingen. Een deel van de B0-meters lijken volgens hen bij hogere frequenties lagere grondversnellingen te meten dan gecorrigeerde, G0-versnellingsmeters op korte (0,43 - 1,7 km) afstand (Seister, 2019, pagina 9 en verder). De afname in de gemeten grondversnelling lijkt groter naarmate het gebouw een zwaardere (en diepere) fundering heeft. Bij een tweetal meters die gemonteerd zijn in niet-gefundeerde lichte houten gebouwen is er nauwelijks effect (Seister, 2019, pagina 9 - 12). Het effect was tot begin 2019 niet opgevallen. Mogelijk kwam dat door de afwijkende fabrieksinstellingen van de G0-meters waardoor de metingen met de G0-versnellingsmeters bij alle frequenties te lage waarden gaven. Na de correctie daarvoor zijn er tot frequenties van ongeveer 3 Hz gemiddeld geen verschillen meer met de B0-metingen (Figuur 3-4 in Seister, 2019). De lagere B0-grondversnellingen worden waargenomen bij frequenties boven de 3 - 5 Hz en het verschil lijkt toe te nemen bij hogere frequenties. Bij 10 Hz varieert de afname van vrijwel nul (geen effect) tot meer dan 80% (meer dan een factor 5 lagere gemeten grondversnelling). Bij een frequentie van 10 Hz is de gemiddelde afname 50%, een factor 2 lagere gemeten grondversnelling t.o.v. nabije G0-meters (voor meer details, zie Seister, 2019, pagina 9 en verder).

Veel gebouwen in Groningen zijn gevoelig voor groundbewegingen met deze frequenties van 1 tot 10 Hz (NAM, 2020c, pagina 12). Het is daarom belangrijk de oorzaak van de verschillen te begrijpen. Naast de afname van de gemeten grondversnelling bij hogere frequenties zijn er ook bij een aantal frequenties pieken te zien in de B0-metingen. Die worden mogelijk veroorzaakt door resonanties van de gebouwen zelf (Seister, 2019, pagina 14).

De onderzoekers van KEM-02 en KEM-04 vermoeden aanvankelijk dat de verschillen in de gemeten grondversnellingen tussen nabijgelegen B0- en de G0-meters worden veroorzaakt door de gebouwen waarin de B0-meters gemonteerd zijn, of door de vloer van beton of tegels waarop de meters zijn gemonteerd (Seister, 2019). Ook verschillen in de lokale ondiepe ondergrond onder het gebouw of grondverbetering voorafgaand aan de constructie van de gebouwen waarin de B0-meters zijn gemonteerd worden in het Seister rapport als mogelijkheden genoemd (zie de Seister-KNMI discussie in Seister, 2019). Vergelijking tussen G0-meters op wat grotere afstanden van elkaar (1,13 – 4,7 km) laat gemiddeld geen systematische verschillen zien (Seister, 2019, Figuur 4-2, bladzijde 18), waardoor verschillen in de opbouw van de ondiepe ondergrond volgens de onderzoekers van Seister minder waarschijnlijk lijken.

Om de gevonden verschillen tussen de metingen met de B0- en de G0-meters verder te onderzoeken zijn eerst relatief eenvoudige berekeningen uitgevoerd voor een aantal gebouwen waarin B0-meters zijn gemonteerd (Witteveen+Bos, 2019b/c). De uitkomsten suggereerden een ingewikkelde wisselwerking (zogenoemde kinematische effecten, in het Engels SSI: soil-structure-interaction) tussen de aardbevingsgolven, de fundering van de gebouwen en de bodem onder de gebouwen (Landwehr et al, 2013; Kampitsis et al., 2013). De frequentie waarbij de afname in de met de B0-meters gemeten grondversnelling begint op te treden, en de mate van afname zoals berekend door Witteveen+Bos zijn vergelijkbaar met de waarden daarvoor in (Seister, 2019). Dat leidde ten tijde van

de SodM tussenrapportage van juni 2019 tot de conclusie dat B0-meters mogelijk worden beïnvloed door de gebouwen waarin ze geïnstalleerd zijn of door de beton/tegelvloeren waarop ze gemonteerd zijn.

NAM heeft op verzoek van SodM een uitgebreide vervolgstudie laten uitvoeren door MOSAYK dat daarvoor geavanceerde 3D numerieke modelberekeningen heeft gebruikt. Daarin werd verder onderzocht of de verschillen tussen de metingen van nabijgelegen B0- en G0-stations inderdaad veroorzaakt kunnen worden door de installatie van de B0-meters in gebouwen (Cavaliere, 2020a en 2020b). De uitkomsten van de berekeningen laten zien dat de interactie tussen de ondiepe ondergrond en het gebouw (SSI) in de meeste gevallen een onwaarschijnlijke verklaring is. Alleen voor de drie B0-meters die in de kelders van gebouwen staan (BUHZ, BWIN en BZN1) wordt er een aanzienlijke demping door de interactie tussen de ondiepe ondergrond en het gebouw (SSI) berekend. Volgens de onderzoekers is er wel een alternatieve hypothese voor de verklaring van de verschillen tussen de B0- en G0-metingen: de aanwezigheid van een verdichte (in het Engels “consolidated”) laag direct onder het gebouw waarin de meter bevestigd is. Een dergelijke verdichting is volgens de onderzoekers niet ongebruikelijk. Bijvoorbeeld door de toepassing van grondverdichtingstechnieken voorafgaand aan de constructie van een gebouw, of in de periode daarna, door de combinatie van lokale trillingen en het gewicht van een gebouw. Dat kan leiden tot een toename van de voortplantingssnelheid van seismische golven in de ondiepe ondergrond onder het gebouw (voor meer details zie NAM, 2020d, pagina 15) en daarmee tot de waargenomen effecten.

Op basis van de diverse onderzoeken die zijn gedaan is het moeilijk om een definitieve uitspraak te doen over de mate van demping van de pre-B0- en de B0-metingen bij hogere frequenties. Op dit moment spreken de conclusies van de verschillende studies elkaar deels tegen. Volgens NAM is het niet zeker dat er zulke systematische effecten zijn, behalve voor de drie meters in kelders. NAM is van mening dat de data de aanwezigheid van systematische verschillen voor de overige B0-meters niet overtuigend aantoont. De gevonden verschillen voor die B0-meters vallen volgens NAM binnen de variabiliteit die ook tussen de G0-meters wordt gevonden. Ze kunnen daarom volgens NAM ook het gevolg zijn van verschillen in de opbouw van de ondiepe ondergrond bij de B0- en de G0-meters (NAM, 2020c, pagina 15). Volgens Seister is dat onwaarschijnlijk (Seister, 2019, pagina’s 24 en 26). Aanvullende metingen om hier verder onderzoek naar te doen konden door de uitbraak van COVID-19 niet meer worden uitgevoerd (NAM, 2020c)

4.5 Demping grondversnellingen pre-B0-versnellingsmeters (bevinding 5)

In de periode voorafgaand aan de installatie van het B0-netwerk in 2013-2014 werden de metingen van de grondversnellingen in het Groningen-gasveld uitgevoerd met de versnellingsmeters van het pre-B0-netwerk. Deze meters zijn weliswaar nu niet meer in gebruik, maar de meetresultaten van deze meters worden nog wel gebruikt. Als er mogelijk een demping van de gemeten grondversnellingen bij hogere frequenties optreedt voor een deel van de B0-meters, rijst de vraag of dit effect ook aanwezig is geweest bij de metingen van de pre-B0-meters. In 11 gebouwen waar in 2013 en 2014 B0-versnellingsmeters zijn gemonteerd, waren in de periode daarvoor de (minder geavanceerde) pre-B0-meters aanwezig. Ook waren er in die periode pre-B0 meters aanwezig in twee andere gebouwen. Die laatste meters zijn na hun verwijdering niet vervangen omdat daartoe geen noodzaak was. De locaties van 11 van de 13 pre-B0-meters komen overeen met die van latere B0-meters (KNMI, 2019d). Het is niet uit te sluiten dat de pre-B0 metingen vergelijkbare

dempingeffecten bij hogere frequenties kennen als de huidige B0-meters die nu op dezelfde locatie geïnstalleerd staan. De locaties van 11 van de 13 pre-B0-meters komen immers overeen met die van latere B0-meters (KNMI, 2019d).

Volgens de door NAM/MOSAYK uitgevoerde vervolgstudie is het ook voor de pre-B0-metingen niet te verwachten dat de interactie tussen de ondiepe ondergrond en het gebouw tot demping hebben geleid (behalve voor de WIN en ZAN1 pre-B0-meters in kelders, zie Tabel 2 in paragraaf 4.4). Wel zou een deel van deze metingen bij hogere frequenties gedempt kunnen zijn door de aanwezigheid van een geconsolideerde laag direct onder het gebouw (het zijn grotendeels dezelfde gebouwen waar later de B0-meters geïnstalleerd werden). Net als voor de B0-meters is het moeilijk om hier op dit moment een definitieve uitspraak over te doen.

4.6 Problemen met de kwaliteitsborging van het seismisch netwerk (bevinding 6)

Er is in opdracht van SodM door de Zwitserse seismologische dienst (SED) een audit uitgevoerd op de volledige seismische meetketen in Groningen (SED, 2019) van installatie tot de rapportage van de metingen: type, installatie en kalibratie van de verschillende generaties en soorten meters, de verwerking van de meetsignalen, de operationele procedures, de kwaliteitsbewaking, de beschikbaarheid, kwaliteit, integriteit en betrouwbaarheid van het seismische netwerk, de beschikbaarheid van de meetgegevens en de rapportage van de resultaten van de metingen. Volgens de uitkomsten van de SED-audit beschikte het KNMI over onvoldoende personeel voor het professioneel en adequaat beheren van een seismisch netwerk met de grootte en de complexiteit zoals dat in Groningen. Er is daardoor te weinig tijd voor kwaliteitscontroles en kwaliteitsverbeteringen. Er was onvoldoende aandacht voor onderhoud, voor kapotte seismische stations, voor stations met hoge ruisniveaus en voor de regelmatige installatie van software updates (firmware updates van de versnellingsmeters). Dat werd in een later stadium bevestigd door de uitkomsten van de veldinspectie van de B0-meters (zie 4.3) die ongeveer een half jaar na de SED-audit plaats vond. Van nalatigheid was volgens SED echter geen sprake. SED beveelt aan dat het KNMI de procedures verbetert om de kwaliteit van het netwerk (inclusief de meta-data) te bewaken. Ook beveelt SED aan te overwegen het aantal medewerkers bij het KNMI dat zich bezighoudt met seismiteit uit te breiden.

Ook uit het feitenonderzoek dat SodM kort na het bekend worden van de problemen met de instelling van de G0-meters zelf heeft uitgevoerd (SodM, 2019a) komt naar voren dat er problemen zijn met de kwaliteitsbewaking van het seismische monitoringsysteem in Groningen. Het KNMI en NAM hebben volgens de uitkomsten van het feitenonderzoek ieder te weinig aandacht gehad voor de kwaliteitsbewaking en hebben een onvoldoende mate van omgevingsbewustzijn getoond met betrekking tot de impact van afwijkende meetgegevens.

De onvoldoende aandacht voor kwaliteitsborging heeft volgens SED en volgens het SodM feitenonderzoek mede geleid tot het niet of laat opmerken van de problemen met de pre-B0, B0 en G0 metingen. Ook had men daardoor onvoldoende oog voor de mogelijk impact daarvan.

Pas door de sterke uitbreiding van het netwerk met nieuwe generaties meters werd het mogelijk de metingen met verschillende netwerken te vergelijken. Dit heeft uiteindelijk geleid tot de ontdekking van de verschillende fabrieksinstellingen.

Verbeteringen zijn inmiddels doorgevoerd in het kwaliteitssysteem van het KNMI, mede op basis van de interne evaluatie van de communicatie rondom de afwijkende fabrieksinstellingen en de versnellingsmeters (KNMI, 2019f, 2019g) en de externe review daarop (ABD Topconsult, 2019).

4.7 Onduidelijkheden in rollen en verantwoordelijkheden (bevinding 7)

Voor de installatie van het seismische netwerk in Groningen is gebruik gemaakt van een complexe organisatorische opzet waarin onvoldoende aandacht was voor grondige controles en coördinatie (SED, 2019; SodM, 2019a). Er waren veel verschillende partijen betrokken bij de aanleg, de installatie en de operatie van het seismisch netwerk. Volgens de bevindingen van het door SodM uitgevoerde feitenonderzoek (SodM, 2019a) had noch het KNMI noch de NAM daarbij in voldoende mate de regierol en het zicht over het totale project. SodM constateerde na verschillende interviews in het kader van het feitenonderzoek dat NAM, het KNMI, de leverancier van de meters en de installateur van de meters ieder een eigen beeld hadden van de eigen rol en verantwoordelijkheden. Uit de interviews blijkt ook dat er onduidelijkheden en verschillen van mening zijn over de rollen en verantwoordelijkheden van het KNMI, NAM en SodM. Ook SED heeft aangeraden om rollen en verantwoordelijkheden beter te beschrijven.

4.8 Aanvankelijk onjuiste verwerking van een deel van de G4-metingen (bevinding 8)

De ruwe meetsignalen van seismische meters moeten gecorrigeerd worden voor de effecten van de meter zelf op de metingen. De meter veroorzaakt zelf ook demping die bij bepaalde frequenties sterker optreedt dan bij andere. Pas na toepassing van een correctie daarvoor kunnen de metingen in verdere toepassingen gebruikt worden. Tijdens het onderzoek naar de afwijkende G0-metingen van het KNMI, meldt NAM dat het consortium dat het Ground Motion Model (GMM) ontwikkelt, aanvankelijk een fout heeft gemaakt bij de verwerking van de G4-metingen van de $M_L=2,6$ Slochteren aardbeving op 27 mei 2017 (SodM, 2019b) in versie 5 van dit model. Bij deze metingen is de correctie voor de effecten van het meetinstrument niet juist uitgevoerd. Dat heeft volgens het NAM-ontwikkelteam invloed gehad op het kalibreren van de V5 GMM waarvoor de G4-metingen zijn gebruikt. NAM heeft het V5 GMM-model vervolgens gebruikt in de berekeningen van de seismische dreiging en risico (het HRA-model) ter onderbouwing van de winning voor het gasjaar 2018/2019. De inschatting van het consortium is dat het effect van het gebruik van de verkeerd gecorrigeerde G4-metingen klein is geweest (SodM, 2019b). Voor latere GMM-versies speelt het probleem niet omdat voor de kalibratie daarvan geen gebruik meer wordt gemaakt van de G4-metingen. Vanaf de V6 GMM worden daarvoor de gecorrigeerde G0-metingen gebruikt.

4.9 Overige bevindingen

Uit de audit van SED blijkt dat het KNMI tot januari 2019 standaardwaarden heeft gerapporteerd voor de oriëntaties (azimut) van de G1 t/m G4 boorgatmeters omdat de werkelijke waarden niet bekend waren. Tegelijkertijd met de studie naar de instellingsproblemen van de G0-meters heeft het KNMI de juiste waarden vastgesteld (vooral voor de G1 t/m G4 boorgatmeters) waarvoor gebruik is gemaakt van 1) check schoten (door NAM), 2) lokale aardbevingen, 3) sterke teleseismische aardbevingen en 4) nabije offshore explosies. Ook voor een aantal van de B0- en de G0-versnellingsmeters aan het oppervlak heeft dit geleid tot correcties in de metadata (SED, 2019).

Witteveen+Bos heeft in opdracht van SodM een inventarisatie gemaakt van de beschikbaarheid en de kwaliteit van alle KNMI-versnellingsmeters en metingen in het Groningen gasveld voor de periode 2014 tot 2018 (Witteveen+Bos, 2019a). Die inventarisatie heeft geen aanvullende, eerder niet

bekende, bevindingen opgeleverd. Wel resulteert de studie in een nuttig overzicht waarin aangegeven wordt welke meters in welke periode beschikbaar zijn. Ook laat het overzicht zien welk (klein) deel van grondversnellingsmetingen beter niet gebruikt kan worden vanwege kwaliteitsproblemen.

NORSAR heeft in opdracht van SodM onderzocht of het seismische monitoringsysteem zoals dat nu in Groningen gebruikt wordt state-of-the-art is en zo niet, welke verbeteringen nog mogelijk zijn (NORSAR, 2020). Ook is gekeken naar de mogelijke gevolgen van de verschillen tussen het huidige seismische monitoringsysteem en de eerdere versies daarvan. Voor de metingen van de grondversnellingen met de pre-B0- en de B0-meters constateert NORSAR een aantal tekortkomingen ten opzichte van een naar de huidige maatstaven optimaal (state-of-the-art) seismisch monitoringsysteem. Deels worden die veroorzaakt door beperkingen in de destijds beschikbare inzichten en techniek, door het destijds beperkte aantal meetstations, en deels mogelijk door de installatie van de pre-B0- en de B0-meters in gebouwen. De oorzaak van de meetafwijkingen van een deel van de B0-meters met nabije G0-meters is volgens NORSAR moeilijk met zekerheid te achterhalen. Het netwerk ten tijde van de bevingen met nummer 1 – 15, 17, 18 en 20 (nummering volgens NORSAR, 2020) voldoet volgens NORSAR niet aan de huidige state-of-the-art technische eisen. Ook is de onzekerheid in de positiebepaling van deze bevingen volgens NORSAR relatief groot door het beperkte aantal meetstations waarmee ze zijn gedetecteerd.

5. Zijn de seismische metingen nu op orde?

Na het in kaart brengen van de afwijkingen in de seismische metingen is het belangrijk om vast te stellen of de afwijkingen voldoende zijn opgelost en als dat niet het geval is, wat er nog gedaan zou kunnen worden om afwijkingen waar mogelijk alsnog te corrigeren. Het gaat daarbij afwijkingen in de G0-metingen, in de B0-metingen en in de metingen met pre-B0-meters alsmede afwijkingen door de verkeerde verwerking van de G4-metingen voor de Slochteren aardbeving van 27 mei 2017.

5.1 G0-metingen (2014 – heden)

Na correcties van de afwijkende meetwaarden van de G0-versnellingsmeters door het KNMI zijn de afwijkingen in gemeten (vaak te lage, soms te hoge) waarden van de grondversnelling en afwijkingen in de oriëntatie van deze meters opgelost. Dat wordt bevestigd door:

- Onafhankelijke metingen op triltafels van de Hanze Hogeschool (zie Fugro, 2019a). De resultaten tonen aan dat de geteste B0- en G0-meters de juiste waarden van de door de triltafel opgelegde versnellingen meten wanneer de juiste kalibratiefactoren worden gebruikt;
- Een analyse van het KNMI [KNMI, 2019a] en de validatie daarvan in opdracht van SodM door TU Delft (TU Delft, 2019). In de KNMI-analyse worden de G0-metingen en de B0-metingen vergeleken voor sterke tektonische aardbevingen op zeer grote afstand van Groningen. De frequenties van dergelijke teleseismische signalen zijn zeer laag. De gemeten signalen in Groningen worden dan niet beïnvloed door lokale verschillen in de diepe en ondiepe ondergrond (KNMI, 2019a). De amplitudes van de bevingen zouden voor alle meters in Groningen vrijwel gelijk moeten zijn en dit is na de correctie van de G0-meetwaarden voor de eerdere instellingsverschillen inderdaad het geval;
- De analyse van B0- en G0-metingen bij lage frequenties (Seister, 2019). Na correctie van de G0-meetwaarden zijn deze bij lage frequenties (onder de 3-5 Hz) gemiddeld hetzelfde als de waarden van de B0-stations in de nabijheid van de G0-meters (zie ook paragraaf 4.4);
- Uitkomsten van de modelberekeningen die aantonen dat er geen effect te verwachten is (op de gemeten grondversnellingen) van de montage van de G0-meters op relatief kleine betonplaten in het vrije veld (Witteveen+Bos, 2019b);
- De in opdracht van SodM uitgevoerde audit van de Zwitserse seismologische dienst (SED, 2019), die in grote lijnen de door het KNMI gegeven verklaring voor de meetproblemen bevestigt. De SED-audit bevestigt tevens dat het probleem van de door het KNMI gerapporteerde, niet geheel correcte oriëntatie van een deel van de G0-meters inmiddels ook door het KNMI is opgelost;
- Het onderzoek van NORSAR (NORSAR, 2020) dat laat zien dat het huidige monitoringsysteem in Groningen (na de correctie van de G0-metingen) vanaf 2014 grotendeels voldoet aan de eisen die aan een huidig state-of-the-art netwerk mogen worden gesteld. Verschillen in netwerkontwerp, instrumentatie en in de gegevensverwerking ten opzichte van een optimaal systeem (zoals NORSAR dat definieert) zijn acceptabel en hebben in Groningen naar verwachting van NORSAR geen gevolgen voor het beoogde gebruik van de metingen.

Er zijn nog enkele kanttekeningen:

- De door het KNMI toegepaste correctie via de metadata levert geen oplossing voor de fysiek niet optimale afstemming van de G0-meters en de daaraan gekoppelde apparatuur die het analoge meetsignaal omzet naar een digitaal signaal (digitisers). Dat leidt niet tot verkeerde meetwaarden. Toch geeft SED aan het KNMI het advies om in het kader van een verbeterd

kwaliteitsbeheer de instelling en aansluiting van alle G0-meters en de daaraan gekoppelde digitisers te controleren. Dat kan alleen door alle G0-meters en digitisers individueel na te lopen. SodM ondersteunt dit advies van SED. Als dat praktisch mogelijk is, adviseert SodM aan het KNMI om tegelijkertijd de instelling van de op de G0-meters aangesloten meetapparatuur te optimaliseren. En om deze apparatuur te voorzien van de laatste software updates van de fabrikant (zie SodM, 2019a)⁶;

- De analyse van NORSAR laat zien dat het G-netwerk windruisproblemen kent bij frequenties boven de 10 Hz door de installatie van de meetstations in meetkasten in het vrije veld (NORSAR, 2020). Volgens NORSAR is daarvan geen effect op de berekening van de seismische dreiging en het seismisch risico te verwachten;
- NORSAR adviseert over te gaan tot de implementatie van een geautomatiseerd kwaliteitsbewakingsysteem, regelmatig onderhoud van de meetstations en geautomatiseerde controle van de gemeten golfvormdata om de hoogste kwaliteit van de metingen te garanderen. SodM ondersteunt dit advies en de acties op dit gebied die het KNMI in gang heeft gezet (KNMI, 2020a);
- Het aanvullende onderzoek naar de mogelijke oorzaken van de verschillen in de grondversnellingen tussen nabijgelegen B0- en G0-meters (Cavaliere, 2020b, pagina's 33 en 34) laat als bijvangst zien dat aanzienlijke (willekeurige) verschillen ook kunnen optreden door verschillen in de opbouw van de ondiepe ondergrond. Kennis van de eigenschappen van de ondiepe ondergrond in de directe omgeving van de G0-metstations door het uitvoeren van geavanceerde sonderingen (SCPT-metingen) is daarom belangrijk om dit effect mee te kunnen nemen in de modellen die gebruik maken van de gemeten G0-grondbewegingen. Voor 69 van de G0-meters zijn zulke SCPT-metingen inmiddels alsnog uitgevoerd: 14 door Fugro in opdracht van EZK en SodM (Fugro, 2019a) en daarna nog eens 55 door in opdracht van NAM (NAM, 2019/2020b). Voor de meeste pre-B0- en B0-meters waren die gegevens al eerder beschikbaar (maar wel op enige afstand van de gebouwen waarin de B-meters gemonteerd staan). De beschikbaarheid van deze gegevens verhoogt de waarde van de metingen voor de ontwikkeling van volgende versies van het GMM en de HRA aanzienlijk.

SodM is van mening dat de problemen met de G0-meters zijn opgelost. De afwijkingen in de oorspronkelijk gerapporteerde meetwaarden zijn op een juiste wijze gecorrigeerd. Daarmee is de weergave van de metingen van de grondbewegingen met de 79 G0-versnellingsmeters van het G-netwerk, geïnstalleerd tussen 2014 en 2017, nu goed. Ze kunnen zonder verdere problemen worden gebruikt.

5.2 Pre-B0- en B0-metingen (1995 – heden)

Het KEM-11 2A onderzoek van NORSAR (NORSAR, 2020), de veldinspectie door SodM, KNMI en NAM (zie sectie 4.3) en de diverse analyses en studies naar aanleiding van de waargenomen verschillen tussen de metingen van nabijgelegen B0- en G0-meters (Seister, 2019; Cavaliere, 2020a en 2020b; NAM, 2020c) geven aan dat er mogelijk problemen zijn met een deel van pre-B0- en de B0-metingen (paragraaf 4.3, 4.4 en 4.5). Er is sprake van mogelijke kwaliteitsissues, beperkt onderhoud, demping

⁶ Volgens KNMI is optimalisatie van de meetapparatuur mogelijk, maar niet noodzakelijk. Als veranderingen aangebracht worden zal ook de meta-data aangepast moeten worden.

van signalen door de aanwezigheid van een aantal meters in kelders en (al dan niet systematische) verschillen tussen metingen met nabijgelegen B0- en G0-meters.

In de periode vóór de installatie van het G-netwerk (2014-2017) zijn de grondversnellingen alleen gemeten met de pre-B0-meters van het B-netwerk (Zie Tabel 3 in paragraaf 6.4.3). Ook zijn de grootste grondversnellingen die in Groningen tot nu toe zijn opgetreden (0.08g en 0.11g) enkel met meters van het B-netwerk vastgelegd (NAM, 2020c). Gegeven het grote belang van de pre-B0 en de B0-metingen voor het afleiden van een GMM adviseert het externe NAM assurance panel van onafhankelijke deskundigen de metingen wel te blijven gebruiken (NAM, 2020c), maar alleen na een zorgvuldige kwaliteitscontrole van iedere afzonderlijke meting (historisch en toekomstig). Daarbij heeft het panel geadviseerd om de metingen van de versnellingsmeters geplaatst in kelders te corrigeren voor de gebouwdemping (SSI-effecten). NORSAR komt tot dezelfde aanbeveling (NORSAR, 2020). Daarbij is het van belang de volgende kanttekeningen te maken:

- Een door NAM voorgestelde plausibele verklaring voor de verschillen tussen de B0- en de G0-meters is de aanwezigheid van een geconsolideerde laag (grondversterking) direct onder de gebouwen waarin de B0-meters opgesteld staan (Cavaliere, 2020a, 2020b);
- Correctie voor grondconsolidatie is niet goed mogelijk omdat niet bekend is waar deze wel of niet zijn toegepast en wat daarvan het precieze gevolg is;
- Het KNMI en NAM passen een uitgebreide kwaliteitscontrole/toetsing toe voor de metingen van het B- en het G-netwerk voordat deze gebruikt worden voor het GMM. Voor het V6 GMM kan NORSAR de door NAM op deze wijze geselecteerde database van metingen reproduceren en grotendeels onderschrijven (NORSAR, 2020);
- Analyse van de metingen van de pre-B0- en de B0-meters levert geen indicaties op van meetproblemen door het niet-verankerd zijn van (een deel van) de meters. Er zijn in de meetsignalen geen indicaties gevonden voor het verschuiven of stuiten van meters tijdens de bevingen (NAM, 2020c, pagina 14);
- Voor de drie B0-meters in kelders van gebouwen (BUHZ, BWIN en BZN1) is het mogelijk de metingen te corrigeren voor gebouwdemping (SSI-effecten) op basis van de methode beschreven in NIST 2012 (Stewart, 2012, Cavaliere, 2020a/b). Dat is ook mogelijk voor de metingen van de twee pre-B0 meters in kelders (WIN en ZAN1). De metingen die gebruikt zullen worden voor het afleiden van versie 7 van het GMM zijn inmiddels door NAM daarvoor gecorrigeerd;
- Inmiddels zijn de drie stations met B0-meters in kelders door het KNMI ontmanteld. Met het gereedkomen van het nieuwe netwerk (G-netwerk) zijn er voldoende maaiveldstations in de regio beschikbaar;
- Het KNMI is van mening dat de locatie van de bevingen in de periode vóór de installatie van het G-netwerk nauwkeuriger is vast te stellen dan NORSAR denkt (KNMI, 2020b).

SodM is van mening dat veel pre-B0 en B0-metingen gebruikt kunnen worden als daarbij een juiste aanpak in acht wordt genomen. Deze aanpak is: de metingen van de pre-B0- en B0-meters in kelders corrigeren voor gebouweffecten en een uitgebreide kwaliteitscontrole/toetsing voor iedere individuele pre-B0 en B0-meting. De overige verschillen tussen pre-B0- en de B0-metingen en vrije-veld-metingen (G0) van de grondbewegingen zijn niet goed oplosbaar. Het is op dit moment niet duidelijk of er sprake is van systematische verschillen. Aan de andere kant is dat ook niet met

zekerheid uit te sluiten. Metingen die hier meer informatie over konden geven konden door de uitbraak van COVID-19 niet meer worden uitgevoerd.

5.2 G4-metingen (ML=2,6 Slochteren beving 27 mei 2017)

De verkeerde verwerking van de ruwe G4-metingen van de Slochteren beving hebben enkel plaatsgevonden bij de voorbereiding van de data om versie 5 van het GMM-model af te leiden. In alle andere versies van het GMM-model zijn deze G4-metingen niet gebruikt voor de afleiding van het GMM-model. In plaats daarvan worden nu de (gecorrigeerde) G0-metingen benut die tot dusver hiervoor niet gebruikt werden.

SodM is van mening van het probleem van de verkeerde verwerking van een deel van de G4-metingen voor de ontwikkeling van het GMM-model hiermee niet meer relevant is. Overigens zijn de gegevens van deze metingen op de website van het KNMI altijd correct geweest.

6. Gevolgen van de geconstateerde afwijkingen

De eerste twee doelen van de SodM validatie zijn de inventarisatie van de afwijkingen in de meetgegevens, de vaststelling of deze nu zijn opgelost en als dat eventueel niet het geval is wat er nog kan worden gedaan om de afwijkingen alsnog op te lossen. Het derde doel van de SodM validatie is vast te stellen wat de mogelijke gevolgen van de geconstateerde afwijkingen zijn (geweest).

De onderstaande paragrafen geven meer details.

6.1 Gevolgen voor eerder vastgestelde grondbewegingen en shake maps

Het KNMI gebruikt de grondversnellingsmetingen voor het berekenen van shake maps: kaarten met de contouren van de opgetreden maximale grondversnelling (de PGA), de maximale grondsnelheid of the maximale pseudo spectrale versnelling (PSA) per aardbeving. Nadat het KNMI de instellingsproblemen met de G0-meters had opgelost, heeft het KNMI alle shake maps opnieuw berekend (KNMI, 2019e).

Inmiddels weten we dat ook de metingen van een deel van de B0- en een deel van de pre-B0-meters (in ieder geval de meters in kelders en mogelijk ook een aantal andere meters) tot de vaststelling van te lage vrije-veld-grondversnellingen kunnen hebben geleid. Een deel van die metingen is voor frequenties vanaf ongeveer 3 - 5 Hz mogelijk lager dan vrije-veld-metingen. Dit betekent dat de in het verleden gerapporteerde PGA-waarden (in Groningen ongeveer overeenkomend met een frequentie van 100 Hz) voor die meters te laag zijn geweest. Het KNMI heeft toegezegd (KNMI, 2020a) de shake maps opnieuw te zullen berekenen zodra NAM de B0-metingen en pre-B0-metingen in kelders heeft gecorrigeerd en een nieuwe, o.a. daarop gebaseerde, V7 GMM beschikbaar is.

6.2 Gevolgen voor de empirische GMPE-vergelijking

Met de empirische Ground Motion Prediction vergelijking van NAM (empirische GMPE, Bommer, 2019) kan voor alle historische bevingen voor iedere locatie in Groningen snel een inschatting gemaakt worden van de hoogste vrije veld grondsnelheid (PGV) die daar is opgetreden en of er daardoor schade veroorzaakt kan zijn. Voor de ontwikkeling van de huidige versie zijn 1724 grondversnellingen gebruikt van 55 geïnduceerde aardbevingen met een magnituderange van 1,8 - 3,6, gemeten met pre-B0-, B0- en gecorrigeerde G0-meters, inclusief metingen met pre-B0- en B0-meters in kelders. De gebruikte G0-metingen zijn gecorrigeerd voor de eerdere instellingsproblemen. Het effect van de mogelijke demping van de B0- en pre-B0 metingen in kelders is niet in te schatten (zie ook paragraaf 6.3). Gebruik van alleen gecorrigeerde G0 metingen voor een nieuwe versie zou ertoe leiden dat veel van de bevingen waarbij de grootste grondversnellingen zijn opgetreden niet in de empirische GMPE-vergelijking worden meegenomen. Die bevingen vonden plaats vóór de installatie van het G-netwerk in 2014-2017.

NAM zal een nieuwe versie van de empirische GMPE opstellen op basis van een database met dezelfde consistente processing als de V7 GMM-database, waarbij de GMM-database wordt uitgebreid naar kleinere magnitudes (van $M_L > 2,5$ voor de GMM naar $M_L > 1,8$ voor de empirische GMPE). De processing en kwaliteitscontrole van de pre-B0- en B0-station metingen voor de bevingen met een kleinere magnitude zullen op dezelfde manier en met dezelfde correcties (voor kelder stations) worden uitgevoerd als voor de grotere bevingen in de GMM-database is gedaan. Daarmee

wordt het effect van de afwijkende metingen in de empirische GMPE-vergelijking naar verwachting afdoende opgelost.

6.3 Effecten op schadeafhandeling en subsidieregelingen

Een ambtelijke werkgroep heeft in 2019 in kaart gebracht voor welke toepassingen in het verleden afwijkende G0-metingen zijn gebruikt en geconcludeerd dat er geen gevolgen zijn geweest. Er is met name gekeken naar de effecten op de afhandeling van schade en de toepassing van (subsidie) regelingen zoals de waardevermeerderingsregeling, de nieuwbouwregeling, het koopinstrument en de regeling energiebesparing (EZK, 2019). SodM heeft deze analyse beoordeeld en heeft geen aanleiding een andere conclusie te trekken.

De effecten van het gebruik van bij hogere frequenties mogelijk gedempte pre-B0 en B0-metingen zijn door de werkgroep in 2019 niet onderzocht. Deze werden pas later bekend. De ambtelijke werkgroep is in april 2020 opnieuw bij elkaar gekomen om een vergelijkbare evaluatie uit te voeren voor de effecten van het gebruik van de pre-B0 en B0-meters. De werkgroep heeft onderzocht of daardoor schadegevallen ten onrechte niet correct zijn afgehandeld.

Voor deze evaluatie heeft de werkgroep o.a. gebruik kunnen maken van een rapportage van de afdeling Forensic Services van PricewaterhouseCoopers Advisory N.V. (verder PWC). Die heeft een extern onderzoek uitgevoerd naar de vraag of de stelling van NAM correct is dat in de periode tot 31 maart 2017 de gemeten grondbeweging niet is gebruikt bij de beoordeling van schademeldingen, geen onderdeel was van het protocol voor de schadebeoordeling en dat de grondbewegingsdata in enkele gevallen kunnen hebben geleid tot een andere prioritering in tijd van de opnames (PWC, 2020). Het rapport van PWC en de toelichting van NAM daarop bevestigen dat de meetafwijkingen van de G0-meters die de werkgroep eerder heeft onderzocht geen invloed hebben gehad op het proces van schadeafhandeling door NAM. Dezelfde conclusie wordt door PWC getrokken met betrekking tot het gebruik van overige (pre-B0 en B0) grondbewegingsmetingen. Het effect van mogelijke demping van pre-B0 en B0-metingen bij hogere frequenties op de schadeafhandeling door NAM hoeft daarom niet verder te worden onderzocht.

Sinds 31 maart 2017 is NAM niet meer betrokken bij de schadeafhandeling in Groningen en is deze overgenomen door de Tijdelijke Commissie Mijnbouwschade (verder TCMG, per 1 juli 2020 opgegaan in het Instituut Mijnbouwschade Groningen, verder IMG). SodM heeft vastgesteld dat tot in 2019 de gemeten grondbeweging ook door TCMG/IMG niet is gebruikt bij de beoordeling van schademeldingen. Gedurende 2019 is IMG gebruik gaan maken van de empirische GMPE om het effectgebied te bepalen: het gebied waarbinnen de 'omkering bewijsvermoeden' geldt voor gemelde schade. Dit gaat er van uit dat binnen het effectgebied de schade is veroorzaakt door de gaswinning uit het Groningen-gasveld, tenzij een deskundige 'evident en aantoonbaar' motiveert dat er een uitsluitend andere oorzaak is van het ontstaan van de schade. SodM adviseert om telkens wanneer de empirische GMPE opnieuw wordt vastgesteld, te overwegen of en zo ja hoe de afhandeling van schade aangepast zou moeten worden.

6.4 Gevolgen voor de berekende seismische dreiging en risico's

Sinds eind april 2019 is versie 6 van het grondbewegingsmodel van NAM beschikbaar. Daarin wordt gebruik gemaakt van pre-B0-, B0- én – in tegenstelling tot de eerdere versies van het grondbewegingsmodel – de gecorrigeerde G0-metingen waarin de fabrieksinstellingen correct zijn meegenomen door aanpassingen in de meta-data. G4-metingen (inmiddels allemaal correct) worden

alleen indirect gebruikt in de V6 GMM (voor bijvoorbeeld de vaststelling van de magnitude en de locatie van de bevingen). Tegelijkertijd is een aantal andere wijzigingen doorgevoerd. Daarmee zijn de problemen door de invloed van verkeerde meetwaarden van de grondversnelling op de HRA-berekeningen voor een groot deel opgelost. In aanvulling daarop zullen voor de ontwikkeling van V7 GMM de metingen van de grondversnelling nog worden gecorrigeerd voor SSI-effecten op meters in kelders van gebouwen en worden alle pre-B0- en B0-metingen individueel onderworpen aan een uitgebreide kwaliteitscontrole/toetsing. Naar verwachting is de V7 GMM halverwege 2021 gereed.

6.4.1 Effect gebruik afwijkende G0-metingen

Het V5 GMM werd tot en met april 2019 als onderdeel van de NAM HRA modelketen gebruikt voor de berekening van de seismische dreiging en het seismisch risico in Groningen. Tevens werd dit model door het KNMI gebruikt om de seismische dreigingskaarten te berekenen. Met het HRA-model berekent NAM de dreiging en de risico's van de aardbevingen in Groningen voor een gegeven productieprofiel. Voor de ontwikkeling van het V5 GMM is gebruik gemaakt van de B0- en pre-B0-metingen en van de G4-metingen op een diepte van 200 meter. De G0-metingen zijn niet direct gebruikt voor de ontwikkeling van het V5 GMM en er is daarom geen significant effect van de correctie van deze metingen te verwachten op de berekening van seismische dreiging en risico (bijlage 7) op basis van de V5 GMM. Door nauwgezet de documenten te doorlopen die de ontwikkeling van versie 4 en versie 5 van het GMM in detail beschrijven (Bommer, 2017, Bommer 2018) is dit gecontroleerd door SodM. Ook is daarvoor gesproken met de onderzoekers die de grondbewegingsmodellen ontwikkelen voor NAM. Wel is uit de analyse van SodM gebleken dat de G0-metingen op een indirecte wijze gebruikt zijn voor de ontwikkeling van delen van het model. Vermoedelijk is het effect van dit indirecte gebruik van de G0-metingen in de V5 GMM op de HRA-berekeningen klein. Het is niet uit te sluiten dat het effect wel groter is geweest (SodM, 2019c en 2019d). Een deskundige van het KEM-panel heeft deze conclusies van SodM beoordeeld en kan deze bevestigen. Inmiddels is dat niet meer relevant. Vanaf het V6 GMM speelt het probleem niet meer omdat voor die en volgende versies gecorrigeerde G0-metingen gebruikt worden.

6.4.2 Effect gebruik verkeerd verwerkte G4-metingen

Voor het gebruik van de verkeerd verwerkte G4-metingen van de $M_L=2,6$ Slochteren beving voor de ontwikkeling van het V5 GMM geldt het volgende: volgens de analyse van SodM - bevestigd door een expert van het KEM-panel - is niet met volledige zekerheid vast te stellen dat het effect van de verkeerde verwerking van een deel van de G4-metingen op het V5 GMM klein is (bijlage 6). Er is verder onderzoek nodig om het effect van de verkeerde verwerking te kunnen inschatten. SodM heeft overwogen NAM opdracht te geven dit te doen. Het vaststellen van de gevolgen van de onjuist verwerkte gegevens voor het V5 GMM model en voor HRA-berekeningen die daar gebruik van maakten blijkt echter bijzonder tijdrovend (SodM, 2019b). Omdat een aantal andere door NAM uit te voeren zaken voor SodM een hogere urgentie had is SodM teruggekomen op het idee NAM hier tijd aan te laten besteden. In plaats daarvan heeft NAM het V6 GMM ontwikkeld (en wordt er nu gewerkt aan het V7 GMM) waarin tegelijkertijd ook een aantal andere verbeteringen zijn doorgevoerd. Het G4-verwerkingsprobleem speelt in het V6 GMM en in verdere versies niet meer. Het V6 GMM is gebruikt voor de HRA-berekeningen in 2020 en de uitkomsten zijn door SodM geduid in haar advies over de operationele strategie voor het gasjaar 2020/2021. Het probleem met de verkeerde verwerking is inmiddels niet meer relevant.

NAM werkt op dit moment aan de doorontwikkeling van het V7 GMM en de V7 HRA om daarin alle nog aanwezige problemen tegelijkertijd te adresseren.

6.4.3 Effect gebruik metingen pre-B0- en B0-meters in gebouwen

Voor de ontwikkeling van alle versies van het GMM heeft NAM pre-B0 en B0 metingen gebruikt voor de kalibratie van het model. Dat geldt ook voor de in de HRA voor het gasjaar 2020/2021 gebruikte V6 en het aankomende V7 GMM.

EQ-ID	M _L	Datum	Plaats	G4	G0	(pre-) B0	betreffende B0- en Pre-B0 meters
				aantal	aantal	aantal	
1	3.5	8-aug-2006	Westeremden	0	0	4	Pre-B0 (MID3, ZAN2, ZAN1, HKS)
2	2.5	8-aug-2006	Westeremden	0	0	1	Pre-B0 (MID3)
3	3.2	30-okt-2008	Westeremden	0	0	6	Pre-B0 (MID3, MID1, ZAN2, ZAN1, WSE, WIN)
4	2.6	14-apr-2009	Huizinge	0	0	3	Pre-B0 (MID3, MID1, WSE)
5	3.0	8-mei-2009	Zeerijp	0	0	5	Pre-B0 (MID1, ZAN2, ZAN1, WSE, WIN)
6	2.5	14-aug-2010	Uithuizermeeden	0	0	5	Pre-B0 (MID1, ZAN2, WSE, GARST, KANT)
7	3.2	27-jun-2011	Garrelsweer	0	0	8	Pre-B0 (MID1, ZAN2, ZAN1, HKS, WSE, WIN, GARST, KANT)
8	2.5	31-aug-2011	Uithuizen	0	0	3	Pre-B0 (ZAN2, WSE, GARST)
9	2.5	6-sep-2011	Oosterwijtwerd	0	0	1	Pre-B0 (WSE)
10	3.6	16-aug-2012	Huizinge	0	0	7	Pre-B0 (MID1, HKS, WSE, WIN, STDM, GARST, KANT)
11	2.7	7-feb-2013	Zandeweer	0	0	3	Pre-B0 (WSE, GARST, KANT)
12	3.2	7-feb-2013	Zandeweer	0	0	3	Pre-B0 (WSE, GARST, KANT)
13	2.7	9-feb-2013	t Zandt'	0	0	2	Pre-B0 (WSE, GARST)
14	3.0	2-jul-2013	Garrelsweer	0	0	2	Pre-B0 (ZAN1, WIN)
15	2.8	4-sep-2013	Zeerijp	0	0	5	Pre-B0 (ZAN1, HKS, BWSE, WIN, GARST)
16	3.0	13-feb-2014	Leermens	0	0	14	Pre-B0 (HKS, WIN, GARST, KANT), BO (BMD2, BMD1, BZN2, BWSE, BWIR, BOWW, BONL, BAPP, BLOP, BUHZ)
17	2.6	1-sep-2014	Froombosch	0	0	5	BO (BZN2, BZN1, BWIR, BOWW, BAPP)
18	2.8	30-sep-2014	Garmerwolde	0	0	12	BO (BMD2, BZN2, BHKS, BWSE, BSTD, BGAR, BOWW, BONL, BAPP, BLOP, BUHZ, BHAR)
19	2.9	5-nov-2014	Zandeweer	0	4	14	BO (BMD2, BZN2, BHKS, BWSE, BWIN, BSTD, BGAR, BWIR, BOWW, BONL, BAPP, BLOP, BUHZ, BHAR)
20	2.8	30-dec-2014	Woudbloem	0	5	14	BO (BMD2, BZN2, BHKS, BWSE, BWIN, BSTD, BGAR, BWIR, BOWW, BONL, BAPP, BLOP, BUHZ, BHAR)
21	2.7	6-jan-2015	Wirdum	5	5	14	BO (BMD2, BZN2, BZN1, BHKS, BWSE, BSTD, BGAR, BWIR, BOWW, BONL, BAPP, BLOP, BUHZ, BHAR)
22	3.1	30-sep-2015	Hellum	31	31	12	BO (BMD2, BZN2, BWSE, BWIN, BSTD, BGAR, BWIR, BOWW, BAPP, BLOP, BUHZ, BHAR)
23	2.6	27-mei-2017	Slochteren	59	60	10	BO (BZN1, BHKS, BWIN, BSTD, BGAR, BWIR, BAPP, BLOP, BUHZ, BHAR)

Tabel 3 pre-B0 en B0-metingen gebruikt in het V5 GMM (bron: KNMI)

Op verzoek van SodM is door het KNMI uitgezocht welke pre-B0- en B0-meters wanneer gebruikt zijn en welke data daarvan door het KNMI en NAM gebruikt zijn voor de ontwikkeling van het V5 GMM (zie Tabel 3 hierboven). Inmiddels weten we dat een deel van die metingen bij hogere frequenties mogelijk lager zijn ten opzichte van vrije-veld metingen. Voor de meters waarbij dat veroorzaakt wordt door plaatsing in kelders van gebouwen (twee pre-B0- en drie B0-meters) kan daarvoor worden gecorrigeerd. Dat is niet mogelijk voor een deel van de overige pre-B0- en B0-meters waar het effect mogelijk ook te zien is en waar het misschien wordt veroorzaakt door de toepassing van grondconsolidatie op de locaties van de gebouwen waarin die meters geïnstalleerd staan.

Het externe assurance panel van NAM en de onafhankelijke onderzoekers van NORSAR (op basis van onafhankelijk onderzoek voor SodM) adviseren om ook voor toekomstige GMM-versies zoveel mogelijk pre-B0 en B0-metingen te blijven gebruiken gegeven het grote belang daarvan voor de database. Zo zijn de groundbewegingen van 18 van de 25 bevingen in het V6 GMM-database alleen geregistreerd met meters van het KNMI B-netwerk. Voor 15 daarvan waren dat alleen pre-B0-meters. Ook zijn de grootste grondversnellingen die in Groningen tot nu toe zijn opgetreden (0.08g and 0.11g) met (pre-)B0-meters vastgelegd.

SodM onderschrijft het advies van het externe assurance team van NAM en de onderzoekers van NORSAR om zoveel mogelijk van de pre-B0- en B0-metingen voor de GMM-ontwikkeling te gebruiken gegeven het grote belang daarvan. Het is, ook naar het oordeel van SodM, met in acht neming van strikte kwaliteitscontrole en correctie voor de gebouwdemping bij stations die in kelders staan, een verantwoorde keuze die naar verwachting de best haalbare resultaten zal opleveren.

6.4.4 Effect overige zaken op berekende seismische dreiging en risico's

SodM heeft het KEM-panel gevraagd om advies over het verschil van inzicht tussen NORSAR en het KNMI over de nauwkeurigheid waarmee de bronlocaties van de bevingen kunnen worden vastgesteld in de periode voor de installatie van het G-netwerk en het mogelijke effect daarvan op het gebruik van deze locaties. Het KEM-panel is van mening dat het meenemen van de onzekerheden in de positiebepaling weinig effect zal hebben op de berekening van de seismische dreiging en het seismisch risico in Groningen. En daarmee ook niet op de schadeafhandeling, de empirische GMPE, shake maps etc. Ook niet als die onzekerheden zo groot zijn als NORSAR denkt. Volgens het KEM-panel zijn de effecten van andere onzekerheden veel groter. Bijvoorbeeld de onzekerheid door het feit dat de grondbewegingen van aardbevingen met dezelfde sterkte sterk kunnen verschillen. Overigens vertalen zulke onzekerheden zich in een grotere spreiding in de onzekerheidsband van de berekende risico's. Ze worden daardoor indirect toch meegenomen in het GMM en de HRA (KNMI, 2020b).

6.5 Gevolgen voor het versterkingsprogramma

In de eerste helft van 2020 is duidelijk geworden dat de effecten van de verschillende aanpassingen in het V6 GMM ten opzichte van het V5 GMM, in combinatie met het lagere productieprofiel, leiden tot een aanzienlijke afname van de berekende seismische dreiging en seismisch risico's. Er zijn op basis van deze berekeningen geen nieuwe gebouwen gesignaleerd die niet aan de veiligheidsnorm voldoen. Er is daarom geen noodzaak nieuwe gebouwen aan het versterkingsprogramma toe te voegen. Wel zijn er mogelijk gevolgen voor de NPR (Nationale Praktijk Richtlijn). Verdere analyse daarvan valt buiten de scope van dit rapport.

De mogelijke demping van de pre-B0 en B0-metingen zullen in het V7 GMM meegenomen worden. De metingen van stations in de kelders zullen worden gecorrigeerd en de overige metingen zullen onderworpen worden aan een strenge kwaliteitscontrole/toetsing. Het V7 GMM zal naar verwachting medio 2021 beschikbaar komen.

6.6 Gevolgen voor wetenschappelijke onderzoeken

Het vierde doel van de SodM validatie is te bepalen welke vervolgonderzoeken nodig zijn als de gevolgen van de gevonden problemen met seismische metingen nog niet goed kunnen worden vastgesteld. In de KEM-02 en KEM-04 onderzoeken wordt sinds februari 2019 gebruik gemaakt van gecorrigeerde G0-metingen. De betrokken onderzoekers hebben in overleg met SodM en EZK besloten geen gebruik te maken van pre-B0 en B0-metingen. De onderzoekprogramma's zijn daarop aangepast en inmiddels voltooid (zie Fugro, 2020). Inmiddels is gebleken dat de metingen in kelders gecorrigeerd kunnen worden en het gebruik van de overige metingen mogelijk is, mits deze aan strenge kwaliteitscontrole/toetsing worden onderworpen, waarbij het specifieke gebruik en de noodzaak van het gebruik van deze data voor elke studie opnieuw door de onderzoekers zal moeten worden beoordeeld.

Tijdens de validatie is duidelijk geworden dat de seismische meetgegevens uit de periode 1995 – 2013 nog niet publiek beschikbaar zijn. Het KNMI gaat deze vroege pre-B0 en B0-metingen in opdracht van SodM overzetten in een modern dataformat, voorzien van metadata en publiceren op het KNMI-data portal om onafhankelijke verificatie door NORSAR (NORSAR, 2021) en gebruik door derden mogelijk te maken (KNMI, 2021).

6.7 Andere gevolgen

De problemen met de pre-B0-, B0- en G0 metingen hebben mogelijk een aantal andere gevolgen. Ze worden mogelijk gebruikt in externe veiligheidsberekeningen, stabiliteitsberekeningen voor hoogspanningsmasten en fluidisatieberekeningen (liquefactie). Er zijn mogelijke gevolgen voor de uitkomsten van alle berekeningen en modellen waarin ongecorrigeerde G0-metingen en/of mogelijk gedempte pre-B0- of B0-metingen zijn gebruikt. Ten tijde van de tussenrapportage in juni 2019 heeft SodM daarom geadviseerd dat de ambtelijke werkgroep de mogelijke problemen inventariseert. Daar is inmiddels opvolging aangegeven (EZK, 2019/2021a).

Omdat de meetgegevens publiek zijn, is volgens de werkgroep niet te achterhalen waar deze precies zijn gebruikt. Daar waar de werkgroep is benaderd door partijen die de betreffende meetdata hebben gebruikt, wordt wel opvolging gegeven. Dat is het geval voor een onderzoek van de TU Delft in opdracht van de Nationaal Coördinator Groningen (hierna NCG) ten aanzien van de relatie tussen schade en gaswinning (Staalduinen, 2018). Het is duidelijk dat het TU Delft-onderzoek o.a. gebruik heeft gemaakt van foutief vastgestelde waarden van de groundbewegingen. TU Delft geeft echter aan dat dit geen gevolgen heeft voor de uitgangspunten van het beoordelingskader en de afwegingen die daaraan ten grondslag liggen (EZK, 2020a). SodM heeft geen aanleiding een andere conclusie te trekken.

Het KNMI geeft aan dat er naar aanleiding van de publiciteit over de gecorrigeerde data zich geen andere partijen hebben gemeld met het verzoek om herziening van studies waarbij gebruik is gemaakt van de betreffende metingen voorafgaand aan de correctie (EZK, 2021a). Wel lijkt het verstandig te onderzoeken of er gevolgen zijn (geweest) voor de vaststelling van de NPR en voor onderzoeken die door TNO worden uitgevoerd in het kader van het vaststellen van de dreiging en de risico's van de seismiciteit in Groningen (de publieke SDRA: (EZK,2020)).

7. Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

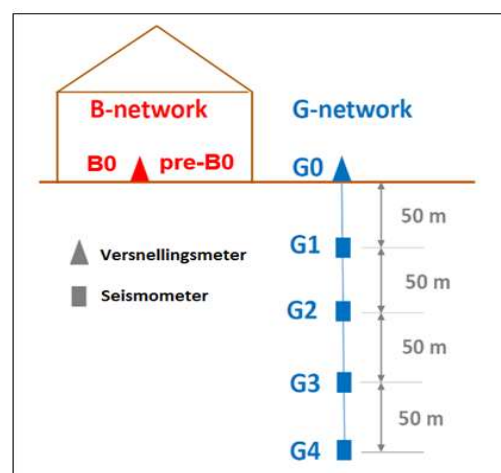
In de regio van het Groningen-gasveld wordt met behulp van een groot aantal meters de omvang en locatie van aardbevingen bepaald en worden de groundbewegingen gemeten. De metingen van de groundbewegingen zijn van groot belang voor het beoordelen en afhandelen van schadedossiers, het toepassen van ministeriële (subsidie)regelingen, het berekenen van seismische dreiging en risico (met het HRA-model⁷), het vaststellen van de omvang en prioritering van het versterkingsprogramma en als input voor wetenschappelijke studies.

In het gebied worden de grondversnellingen aan het oppervlak gemeten door zowel B0- als G0-meters van het KNMI. Er zijn momenteel 13 actieve B0-meters en 79 actieve G0-meters. Daarnaast worden de groundbewegingen ook in de ondiepe ondergrond gemeten. Hiertoe zijn op de locaties van de G0-meters op verschillende dieptes meters aangebracht. Dit zijn de G1, G2, G3 en G4 meters op 50, 100, 150 en 200 meter diepte waar in eerder 2018 onderzoek uitgebreid naar gekeken is. Die eerdere validatie, uitgevoerd door het Noorse instituut NORSAR in opdracht van SodM (NORSAR, 2018a en 2018b), heeft laten zien dat de metingen waarmee de omvang en locatie van aardbevingen worden bepaald, goed uitgevoerd worden. De validatie zoals opgenomen in deze rapportage was daarom met name gericht op de metingen van de grondversnellingen.

In februari 2019 meldde het KNMI dat zij een instellingsprobleem geconstateerd én inmiddels gecorrigeerd had bij alle 79 meters uit het G-netwerk die gebruikt worden om de grondversnellingen vast te stellen. Aangezien gebruikers van de metingen en de mensen in Groningen erop moeten kunnen vertrouwen dat de metingen correct zijn, heeft SodM besloten een validatie-onderzoek te starten

Het KNMI gebruikt voor het meten van aardbevingen een netwerk van seismometers en versnellingsmeters in Nederland. De versnellingsmeters bevinden zich aan het aardoppervlak en meten de versnelling van de groundbeweging. De grondsnelheid kan daaruit worden afgeleid. De seismometers bevinden zich in een ondiepe put (200 m) op verschillende diepten onder de grond. Deze meters worden gebruikt om de locatie en sterkte van de bevingen te bepalen. Alle meters die aan het aardoppervlak of in gebouwen zijn geïnstalleerd krijgen in dit rapport de annotatie 0 (= nul). De seismometers in de ondiepe putten worden van het oppervlak naar beneden genummerd: 1 op 50 m diepte, 2 op 100 m, 3 op 150 m en 4 voor de meter op 200 m diepte. Het huidige netwerk van versnellingsmeters bestaat uit twee delen: de oudere meters van het KNMI B-netwerk in gebouwen (in dit rapport de B0-meters) en de nieuwere G0-meters van het KNMI G-netwerk in speciaal daarvoor ontwikkelde, relatief kleine, meetkasten verspreid over het veld. Een nog ouder deel van het KNMI B-netwerk met 13 versnellingsmeters (in dit rapport de pre-B0-meters) is in verschillende fasen geïnstalleerd in de periode vóór 2013 (grotendeels in dezelfde gebouwen als de latere B0-meters). Deze pre-B0-meters zijn in de periode 2013-2014 vervangen door het B0-meter netwerk met 17 meters. Hier zijn van 2014 tot eind 2017 80 G0-versnellingsmeters aan toegevoegd als onderdeel van het G-netwerk. Op dit moment zijn er nog 13 B0-versnellingsmeters en 79 G0-meters actief.

Voor 2013	Installatie pre-B0-meters
2013-2014	Vervanging pre-B0-meters door 17 B0-meters (KNMI B-netwerk) waarvan nog 13 in actief gebruik
2014-2017	Toevoeging 80 G0-meters (onderdeel KNMI G-netwerk) waarvan nog 79 in actief gebruik



Figuur 1: B- en G-netwerk Groningen

⁷ Het Hazard and Risk model waarmee NAM de seismische dreiging en risico voor het Groningen-gasveld berekend.

naar (de gehele meetketen van) de grondversnellingsmetingen in het Groningen-gasveld. Het huidige rapport is de eindrapportage van dat validatie-onderzoek met de uitkomsten van de uitgevoerde onderzoeken, de conclusies die daaruit getrokken kunnen worden en de gevolgen daarvan.

In het onderstaande worden de conclusies van de validatie gepresenteerd:

- Eerst de conclusies met betrekking tot de vragen welke afwijkende metingen zijn geconstateerd en of deze nu zijn gecorrigeerd;
- Vervolgens de conclusies met betrekking tot de impact die de afwijkingen hebben (gehad) en welke vervolgacties en onderzoeken nog nodig zijn;
- Daarna de conclusies met betrekking tot de vragen: hoe heeft dit kunnen gebeuren; wat hebben we geleerd en hoe kunnen meetproblemen in de toekomst voorkomen worden.

Het hoofdstuk wordt afgesloten met een overzicht van de SodM aanbevelingen (in dit rapport en in de tussenrapportage van juni 2019) en de huidige status van de opvolging daarvan.

Welke meetproblemen zijn gevonden en zijn deze nu opgelost?

De G0-metingen zijn nu goed

SodM heeft vastgesteld dat de in februari 2019 bij SodM gemelde afwijkende fabrieksinstellingen van de G0-versnellingsmeters in het Groningen gasveld door het KNMI in een eerder stadium zijn vastgesteld en adequaat zijn opgelost. Dat wordt o.a. bevestigd door een onafhankelijke audit die in opdracht van SodM door de Zwitserse seismologische dienst SED is uitgevoerd. SodM concludeert dat de grondversnellingen vastgesteld op basis van de metingen met de 79 G0-versnellingsmeters van het G-netwerk, geïnstalleerd tussen 2015 en 2017, na de door het KNMI toegepaste correcties goed zijn. Het zijn vrije-velde-metingen van de groundbewegingen die zonder belemmering gebruikt kunnen worden.

Een deel van de B0-meters meet gemiddeld lagere groundbewegingen dan nabije G0-meters

Daarvoor kan deels gecorrigeerd worden

Bij de uitvoering van de SodM validatie zijn de betrokken onderzoekers ook gestuit op systematische verschillen tussen de 16 in 2013-2014 geïnstalleerde B0-versnellingsmeters van het KNMI B-netwerk en nabijgelegen G0-meters van het KNMI G-netwerk (op 0,42 – 1,7 km afstand). NAM heeft door MOSAYK laten onderzoeken of, en zo ja hoe de metingen met de B0-meters kunnen worden gecorrigeerd. Uit het MOSAYK-onderzoek blijkt dat de aanwezigheid van een verdichte ondergrond direct onder de gebouwen waarin de B0-meters zijn gemonteerd mogelijk tot demping van de hogere frequenties kan leiden en de verschillen mogelijk zou kunnen verklaren. Voor drie van de B0-meters is vast komen te staan dat de installatie van de B0-meters in kelders van gebouwen daadwerkelijk leidt tot demping van de signalen bij hogere frequenties (boven de 3 - 5 Hz). Voor de effecten van de installatie in kelders kan gecorrigeerd worden. Voor de effecten van een verdichte laag direct onder het gebouw is dat niet goed mogelijk.

SodM onderschrijft het advies van het externe assurance team van NAM en de onderzoekers van NORSAR om, gegeven het grote belang daarvan, zoveel mogelijk de pre-B0- en B0-metingen voor de GMM-ontwikkeling te gebruiken. Het is, ook naar het oordeel van SodM, met in acht neming van strikte kwaliteitscontrole en correctie voor de gebouwdemping bij stations die in kelders staan, een verantwoorde keuze die naar verwachting de best haalbare resultaten zal opleveren.

Voorafgaand aan de installatie van het B0-netwerk in 2013-2014 werden de metingen van de groundbewegingen in het Groningen-gasveld uitgevoerd met de versnellingsmeters van het pre-B0-netwerk. Die versnellingsmeters stonden grotendeels in dezelfde gebouwen waar later de B0-meters zijn geïnstalleerd. De verwachting is daarom dat ook de metingen met de pre-B0-meters voor een deel vergelijkbare effecten kennen en dat de MOSAYK-resultaten ook van toepassing zijn op de pre-B0-metingen.

Overige problemen met de metingen zijn opgelost

Door Witteveen+Bos is in opdracht van SodM een overzicht gemaakt van de grondversnellingsmeters en metingen in het Groningen gasveld in de periode 2014-2018. Daarin is te zien welke versnellingsmeters en metingen in welke periode beschikbaar waren, en welk (klein deel) van die metingen niet gebruikt zouden moeten worden omdat ze kleinere of grotere kwaliteitsproblemen kennen. Vergelijkbare analyses zijn uitgevoerd door KNMI, NAM en NORSAR. Op basis van die analyses zijn geen belangrijke eerder niet bekende problemen gevonden. Dat is in overeenstemming met de resultaten van de studies die in opdracht van SodM in 2018 en in 2020 door NORSAR zijn uitgevoerd (NORSAR, 2018a, 2018b, 2020).

Tijdens de SodM-validatie is tenslotte gebleken dat de metingen met de G4 seismometers op een diepte van 200 meter tijdens de $M_L=2,6$ Slochteren beving van 27 mei 2017 door het consortium dat het Ground motion model (GMM) ontwikkelt, aanvankelijk niet juist zijn verwerkt. Het probleem is onderkend en in het V6 GMM opgelost. De gevolgen ervan voor de eerdere V5 HRA-berekeningen zijn niet geheel duidelijk maar inmiddels niet meer relevant. SodM benadrukt dat rapportages van deze metingen in de database en op de website van het KNMI altijd correct zijn geweest.

Samenvattend

SodM concludeert dat de seismische metingen die gedaan zijn en die op dit moment gedaan worden correct zijn, met mogelijke uitzondering van de metingen van een deel van de pre-B0- en de B0-meters. Voor een deel worden die gedempt door de installatie in de kelders van gebouwen (waarvoor gecorrigeerd kan worden). Deze stations in kelders zijn inmiddels opgeheven. Voor een ander deel zijn de pre-B0- en B0-metingen mogelijk verlaagd ten opzichte van vrije-velde-metingen, wat verklaard zou kunnen worden door toegepaste grondversterkingsmaatregelen voorafgaand aan de constructie van de gebouwen waarin de meters geplaatst zijn. Een andere mogelijke verklaring is een verschillende opbouw van de ondiepe ondergrond op de locaties van het B- en het G-netwerk. Definitieve uitspraken hierover zijn op dit moment niet mogelijk.

Impact van de meetproblemen; welke vervolgacties en onderzoeken zijn nog nodig?

Geen verdere acties ten aanzien van de G0-metingen

SodM kan bevestigen dat de foutieve G0-metingen niet direct gebruikt zijn in het V5 GMM en de HRA-berekeningen die daar gebruik van maakten. De problemen met de gerapporteerde meetwaarden van deze meters hebben naar verwachting geen significante impact gehad op de dreiging- en risicoberekeningen. De G0-metingen zijn wel gebruikt voor het empirische groundbewegingsmodel. De ambtelijke werkgroep die deze doorwerking heeft onderzocht heeft geconstateerd dat dit niet van invloed is geweest op de schadeafhandeling door NAM. SodM heeft deze analyse beoordeeld en heeft geen aanleiding om een andere conclusie te trekken.

SodM adviseert KNMI wel om alle individuele G0-meters na te lopen om te controleren dat voor alle meters het juiste aansluitschema is toegepast. Als dat praktisch mogelijk is, adviseert SodM aan KNMI om tegelijkertijd de instelling van de op de G0-meters aangesloten meetapparatuur te optimaliseren⁸. En om deze apparatuur te voorzien van de laatste software updates van de fabrikant.

SodM vraagt het KNMI de shake maps opnieuw te berekenen – zodra de B0-metingen in kelders gecorrigeerd zijn en het V7 GMM beschikbaar is

Het KNMI gebruikt voor het berekenen van shake maps - kaarten met de contouren van bijvoorbeeld de opgetreden maximale grondversnelling (de PGA) per aardbeving – de tijdens een aardbeving gemeten grondversnellingen. De problemen met de B0-metingen en pre-B0-metingen hebben mogelijk invloed op de vaststelling van de shake maps. SodM vraagt daarom aan het KNMI alle shake maps opnieuw te berekenen zodra NAM de B0-metingen en pre-B0-metingen in kelders heeft gecorrigeerd en de V7 versie van het GMM beschikbaar is.

SodM vraagt NAM de Empirische GMPE-vergelijking opnieuw vast te stellen na stringente kwaliteitscontrole van alle pre-B0 en B0-metingen en correctie van de B0-metingen in kelders

Met de empirische Ground Motion Prediction vergelijking (empirische GMPE) kan voor alle historische bevingen voor iedere locatie in Groningen snel een inschatting gemaakt worden van de hoogste grondsnelheid (PGV) die daar is opgetreden, en of er daardoor schade veroorzaakt kan zijn. Het is niet in te schatten welk effect een mogelijke demping van de B0- en pre-B0 metingen bij hogere frequenties (ten opzichte van vrije veldmetingen) op de vaststelling van de empirische GMPE heeft gehad. SodM vraagt daarom NAM de empirische GMPE-vergelijking opnieuw vast te stellen zodra NAM de B0-metingen en pre-B0-metingen in kelders heeft gecorrigeerd en met gebruikmaking van dezelfde data-kwaliteitscontrole als gebruikt gaat worden voor de V7 versie van het GMM.

Mogelijke impact op schadeafhandeling

In juni 2019 adviseerde SodM de minister van EZK om de ambtelijke werkgroep die eerder dit jaar onderzocht wat het effect van de G0-meetproblemen was op de schadeafhandeling door NAM, opdracht te geven dezelfde vraag te beantwoorden voor de mogelijke demping van de metingen met de pre-B0- en de B0-meters. In reactie daarop heeft de werkgroep dit onderzocht en is duidelijk dat ook de pre-B0 en de B0-metingen door NAM in de periode tot 31 maart 2017 (overgang schadeafhandeling naar TCMG) daarvoor niet gebruikt zijn. Dat wordt bevestigd door een extern onderzoek door PricewaterhouseCoopers (PWC) naar de juistheid van de informatie die daarover door NAM is verstrekt. SodM heeft vastgesteld dat in de periode van 31 maart 2017 tot in 2019 de gemeten groundbeweging door TCMG/IMG niet is gebruikt bij de beoordeling van schademeldingen. Sinds 31 maart 2017 is NAM niet meer betrokken bij de schadeafhandeling in Groningen en is deze overgenomen door de Tijdelijke Commissie Mijnbouwschade (verder TCMG, per 1 juli 2020 opgegaan in het Instituut Mijnbouwschade Groningen, verder IMG). SodM heeft vastgesteld dat tot in 2019 de gemeten groundbeweging ook door TCMG/IMG niet is gebruikt bij de beoordeling van schademeldingen. Gedurende 2019 is IMG gebruik gaan maken van de empirische GMPE om het effectgebied te bepalen: het gebied waarbinnen de 'omkering bewijsvermoeden' geldt voor gemelde schade. Dit gaat er van uit dat binnen het effectgebied de schade is veroorzaakt door de gaswinning

⁸ Volgens KNMI is optimalisatie van de meetapparatuur mogelijk, maar niet noodzakelijk. Als veranderingen aangebracht worden zal ook de meta-data aangepast moeten worden.

uit het Groningen gasveld, tenzij een deskundige ‘evident en aantoonbaar’ motiveert dat er een uitsluitend andere oorzaak is van het ontstaan van de schade. SodM adviseert om telkens wanneer de empirische GMPE opnieuw wordt vastgesteld, te overwegen of en zo ja hoe de afhandeling van schade aangepast zou moeten worden.

SodM adviseert dat onderzoekers behoedzaam zijn met gebruik van de pre-B0 en B0- meetwaarden

De meetgegevens van het KNMI worden gebruikt in de verschillende onderzoeksprogramma's die SodM heeft opgestart. De KEM-onderzoekers van KEM-02 en KEM-04, die gebruik maakten van de KNMI-gegevens, hebben nu alleen de gecorrigeerde G0-metingen benut. De pre-B0- en B0-metingen zijn niet meer gebruikt. SodM adviseert onderzoekers om in de toekomst behoedzaam te zijn met gebruik van pre-B0- en B0-metingen. Indien gebruik van de metingen noodzakelijk is, zouden de metingen in kelders gecorrigeerd kunnen worden. Het gebruik van de overige metingen is mogelijk mits deze aan strenge kwaliteitscontrole/toetsing worden onderworpen.

Gebruik van de niet-correcte meetgegevens voor andere doeleinden niet te achterhalen

De pre-B0- en B0-metingen kunnen ook gebruikt zijn of worden voor andere berekeningen zoals externe veiligheid en stabiliteit van installaties. SodM adviseerde in juni 2019 dat een ambtelijke werkgroep bepaalt door wie deze meetgegevens mogelijk gebruikt zijn. In reactie daarop heeft de werkgroep vastgesteld dat de meetgegevens publiek zijn en dat niet precies te achterhalen is door wie deze zijn gebruikt. Daar waar de werkgroep is benaderd door partijen die de betreffende meetdata hebben gebruikt wordt wel opvolging gegeven. Een voorbeeld daarvan is de studie van de Technische Universiteit Delft (TU Delft) in opdracht van NCG naar praktische en concrete handvatten voor de toepassing van een wettelijk bewijsvermoeden in het kader van de schadeafhandeling. Het KNMI geeft aan dat er naar aanleiding van de publiciteit over de gecorrigeerde data zich bij hen geen andere partijen zich hebben gemeld met het verzoek om herziening van studies waarbij gebruik is gemaakt van de betreffende metingen voorafgaand aan de correctie daarvan.

[Achterliggende oorzaken van de meetafwijkingen; wat hebben we geleerd?](#)

[Hoe kunnen meetafwijkingen in de toekomst voorkomen worden?](#)

SodM heeft een feitenonderzoek gedaan om te kijken wie wanneer wat wist over de afwijkende metingen en hoe daarover is gecommuniceerd toen de afwijkingen in de vastgestelde grondversnellingen ontdekt werden. De onafhankelijke audit van de Zwitserse Seismologische Dienst heeft hier ook naar gekeken evenals het KNMI zelf in een interne evaluatie (KNMI, 2019f en 2019g) en ABD Topconsult (ABD Topconsult, 2019) in een externe review hierop.

De mijnbouwbedrijven, zoals NAM, zijn wettelijk verplicht jaarlijks een meetplan op te stellen voor het meten van groundbewegingen. Het ministerie van EZK moet daarmee instemmen (gemandateerd aan SodM). Het KNMI beheert de seismische meetnetwerken in Nederland waaronder dat voor de geïnduceerde aardbevingen als gevolg van gaswinning in Groningen. De kwaliteitscontrole op het Groningen meetnetwerk kan verbeterd worden. Het is een groot en complex netwerk, waarvoor voldoende mensen nodig zijn om het professioneel te kunnen beheren. Het was niet altijd duidelijk wie waarvoor verantwoordelijk is: er zijn veel verschillende partijen betrokken bij de aanleg, installatie en operatie van het meetnetwerk in Groningen. De seismische metingen zelf worden door veel partijen gebruikt. Geen van deze partijen heeft daarbij in voldoende mate de regierol en zicht over het totale project (in alle facetten). Daarom kon het probleem met de meters ontstaan, werden de problemen laat ontdekt en werd daarover ook laat gecommuniceerd.

SodM heeft de vele betrokken partijen geadviseerd de kwaliteitsborging beter te organiseren en duidelijke afspraken op te stellen over de wijze van opschaling en communicatie als er problemen zijn. Inmiddels is het KNMI, op basis van de eigen interne evaluatie en de externe ABD Topconsult review daarop, gestart met het implementeren van een aantal verbeteringen ten aanzien van de kwaliteitsborging en controle. Onder andere door de invoering van een geautomatiseerd beheer en onderhoud systeem voor het seismische meetstelsel. Deels gaat het om de introductie van een automatisch en openbaar systeem om de juistheid van de metingen te kunnen valideren. Deels om een managementsysteem om aan te kunnen tonen dat de voorgenomen aanpak ook wordt gevolgd. Er is een extra medewerker aangetrokken voor de KNMI-groep Seismologie.

Ten tijde van de tussenrapportage heeft SodM de minister van EZK ook geadviseerd om in overleg met de minister van IenW de rolverdeling te verhelderen en eveneens duidelijkheid te verschaffen wie de regierol het beste kan uitvoeren. Daar is inmiddels opvolging aan gegeven (EZK, 2021b).

Van de NAM, die als operator met een wettelijke verantwoordelijkheid om de bodembeweging te meten, afhankelijk is van de seismische meetgegevens, verwacht SodM dat zij een adequate controle uitoefent op de betrouwbaarheid van de meetgegevens. Hierbij past een krachtdadige anticiperende houding en actieve communicatie.

Status opvolging SodM aanbevelingen

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de opvolging van de SodM aanbevelingen in dit rapport en in de tussenrapportage van juni 2019 (status januari 2021).

#	Aanbeveling	Actie	Status	Vervolg
1.	Controle instelling en aansluiting alle G0-meters door het KNMI	KNMI	Gepland, vertraagd door Covid	In uitvoering
2.	Installatie software updates G0-digitisers	KNMI	Gepland, vertraagd door Covid	In uitvoering
3.	Onderzoek oorzaak lagere metingen met pre-B0 en B0-meters	NAM/ MOSAYK	Afgerond, zie sectie 4.2.2	-
4.	Correctie pre-B0- & B0-metingen	NAM	Afgerond, zie secties 4.2.2 en sectie 5.2 van dit rapport	-
5.	Herberekening shake maps	KNMI	Uitgevoerd na correctie G0-metingen, zie (KNMI, 2019d)	Opnieuw voor V7 GMM dataset
6.	Validatie uitkomsten 4. en 5.	SodM	Afgerond. Beoordeling is overgelaten aan het NAM extern assurance panel	-
7.	Effect meetproblemen op empirische GMPE	NAM/KNMI	Wordt opnieuw vastgesteld op basis gecorrigeerde G0-metingen (NAM, 2020c)	Opnieuw vast te stellen op basis V7 GMM datasetselectie
8.	Effecten lagere pre-B0- en B0-metingen op schadeafhandeling	NAM	Afgerond, zie sectie 6.3 van dit rapport	Impact updates empirische GMPE steeds controleren
9.	Effect incorrecte G0-metingen op GMMs	NAM/SodM	Afgerond, zie sectie 6.4.1 van dit rapport	-
10.	Effect afwijkende verwerking deel G4-metingen	NAM/SodM	Afgerond, zie sectie 6.4.2 van dit rapport	-
11.	Effect lagere pre-B0- en B0-metingen op GMMs	NAM	Niet apart in isolatie onderzocht (disproportionele inspanning)	Wordt voor zover mogelijk meegenomen in V7 GMM
12.	Effect lagere pre-B0- en B0-metingen op andere zaken	Ambtelijke werkgroep	Zie (EZK, 2021a)	
13.	Verbeterde data voor V7 GMM	NAM	In ontwikkeling	Afronding
14.	Update dreiging en risicokaarten	KNMI/NAM	Uitgevoerd voor V6 GMM	Opnieuw voor V7 GMM ⁹
15.	Verheldering rollen en verantwoordelijkheden (governance)	IenW, KNMI, EZK, SodM	Afgerond, zie notitie (EZK, 2021b)	-
16.	Verbetering kwaliteitsmanagementsysteem	KNMI	In ontwikkeling	In implementatiefase

⁹ Vanaf 2021 komt de HRA in publiek beheer en voert TNO de publieke seismische dreiging en risicoanalyse uit (EZK, 2020).

8. Referenties

ABD Top consult, 2019. Review op de evaluatie van de communicatie door het KNMI over afwijking in versnellingsmetingen, Oktober 2019, <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2019/12/18/abdtopconsult-review-interne-evaluatie-knmi/abdtopconsult-review-interne-evaluatie-knmi.pdf>, laatste toegang 18 januari 2021

Bommer, Julian, J., Bernard Dost, Benjamin Edwards, Pauline Kruiver, Pier Meijers, Michail Ntinalexis, Adrian Rodriguez-Marek, Elmer Ruigrok, Jesper Spetzler and Peter Stafford, Independent Consultants, Deltares and KNMI, 2017. V4 Ground-Motion Model (GMM) for Response Spectral Accelerations, Peak Ground Velocity, and Significant Durations in the Groningen Field, June 2017, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/ac3beb15-5ad6-4870-854b-ecd711996c4d>, laatste toegang mei 2019

Bommer, Julian, J., Benjamin Edwards, Pauline P Kruiver, Adrian Rodriguez-Marek, Peter J Stafford, Bernard Dost, Michail Ntinalexis, Elmer Ruigrok and Jesper Spetzler, 2018. V5 Ground-Motion Model (GMM) for the Groningen Field, Re-issue with Assurance Letter, March 2018, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/52a1edec-6824-4ab3-8d92-3294c9cbec3a>, laatste toegang mei 2019

Bommer, Julian. J., Peter J Stafford & Michail Ntinalexis, 2019. Updated Empirical GMPEs for PGV from Groningen Earthquakes, March 2019, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/980419ed-36e4-480a-bbd2-0e06a2b3d8ea>, laatste toegang mei 2019

Cavalieri, Francesco, Correia, António, A., 2019. Calibration and verification of a nonlinear macro-element for SSI analysis in the Groningen region, NAM, April 2019, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/a7b8e0fd-2e4c-4c48-8ee2-96db28acf4a2>, laatste toegang 2 december 2020

Cavalieri, Francesco, Correia, António, A., 2020a. Soil-structure-interaction analysis in support of Groningen - B-stations, verification efforts, NAM, May 2020, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/bf955248-a0b0-408c-9c81-3f3d90c51710>, laatste toegang 2 december 2020

Cavalieri, Francesco, Correia, António A., 2020b. Soil-structure-interaction analysis in support of Groningen - B-stations verification efforts – including basement correction and comments from Assurance Panel, Mosayk, October 2020, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/8a7cb958-8eb4-497b-a510-115c53372c8a>, laatste toegang 2 december 2020

EZK, IenW, 2019. Eindnotitie werkgroep KNMI-metingen, 29 mei 2019.. Bijlage 886025 bij de brief van de minister van economische zaken en klimaat en de staatssecretaris van infrastructuur en waterstaat aan de Tweede Kamer, kst-33529-641, 3 juni 2019

EZK, 2020. Publieke SDRA Groningen, Kamerbrief 6 november 2020, identificatienummer 00000001003214369000

EZK, IenW, 2021a. Verslag ambtelijke werkgroep KNMI-metingen, 2 april 2020, verzonden aan Tweede Kamer tegelijk met onderhavig rapport op 11 maart 2021

EZK, IenW, KNMI, SodM, 2021b. Memo: Rollen en Verantwoordelijkheden in de Seismische Monitoringsketen, verzonden aan Tweede Kamer tegelijk met onderhavig rapport op 11 maart 2021

Fugro, 2019a. Quality check of the Groningen accelerometer network, Document nr. 1018-03338=001, version 2.0, 1 May 2019, opgenomen als Bijlage 1A in (SodM, 2019e), https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+01A+1018-0338-001.R02_20190501++Fugro-Bal-Seister+finareport_Geredigeerd.pdf, laatste toegang 18 januari 2021

Fugro, 2019b. Geotechnical Site Investigation Data driven study on seismic structural features of Groningen ground motions. <https://www.nlog.nl/scpt-data>, laatste toegang 14 jan 2021

Fugro, 2020. Data driven study on seismic structural features of Groningen ground motions, 1018-0338-000.R03/OD01 | (KEM-04/IUC201804097), Final Report, 14 July 2020, <https://kemprogramma.nl/blog/view/57979346/kem-04-data-driven-study-on-seismic-structural-features-of-groningen-ground-motions-finished>, laatste toegang 14 januari 2021

IMG, 2019. Uitgangspunten beoordelingskader gehandhaafd, schade-afhandeling gaat door, 22 februari 2019, <https://schadedoormijnbouw.nl/nieuws/uitgangspunten-beoordelingskader-gehandhaafd-schade-afhandeling-gaat-door-update>, laatste toegang 20 oktober 2020

Kampitsis, A.E. et al., 2013. Seismic soil–pile–structure kinematic and inertial interaction - A new beam approach (2013), Kampitsis AE, Sapountzakis EJ, Giannakos SK, Gerolymos N a. Seismic soil–pile–structure kinematic and inertial interaction—a new beam approach. Soil Dynam. Earthq. Eng. 2013;55:211–24, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.09.023>, laatste toegang 19 januari 2021

KEM, <https://kemprogramma.nl>, laatste toegang 12 januari 2021

KNMI, 2019a. *Amplitudes*. Submitted to SodM

KNMI, 2019b. *Sensor Orientation*. Submitted to SodM

KNMI, 2019c. Technische afwijking in grondversnellingsmetingen Groningenveld, Brief aan het Ministerie van Economische Zaken en Klimaatverandering, KNMI-2019/462, 21 februari 2019

KNMI, 2019d. B-station assessment, communicatie SodM-KNMI, juni 2019

KNMI, 2019e. Comparison of Shake Maps before and after correction of G-accelerometers gain, [Comparison of ShakeMaps before and after correction of G-accelerometers gain \(knmi.nl\)](https://www.knmi.nl/onderzoek-en-acties/versnellingsmetingen/comparatie-shakemap-voor-en-na-correctie-g-accelerometers-gain), laatste toegang 19 januari 2021

KNMI, 2019f. Interne evaluatie communicatie afwijking KNMI versnellingsmetingen, de Bilt juni 2019, [Interne evaluatie communicatie afwijking KNMI versnellingsmetingen | Rapport | Rijksoverheid.nl](https://www.knmi.nl/onderzoek-en-acties/versnellingsmetingen/interne-evaluatie-communicatie-afwijking-knmi-versnellingsmetingen-rapport-rijksoverheid), laatste toegang 14 januari 2021

KNMI, 2019g. Reactie Raad van Toezicht KNMI op interne evaluatie communicatie afwijking [versnellingsopnemers, Reactie Raad van Toezicht KNMI op interne evaluatie communicatie afwijking versnellingsmetingen | Brief | Rijksoverheid.nl](#), laatste toegang 14 januari 2021

KNMI, 2020a. SodM-KNMI communicatie, april 2020

KNMI, 2020b. KEM-11, phase 2A: “Assessing data collection methods for the purpose of GMPE calculations at Groningen” Comments from KNMI, 5 October 2020, opgenomen als bijlage bij dit rapport

KNMI, 2021. Quality assurance and publication of the KNMI 1995 – 2013 Groningen seismic data, work in execution, to be published in 2021

Landwehr, Hans; Jaap Bijnagte, Raphael Steenbergen (TNO), 2014. Effecten aardbevingen op hoogspanningsnet in Groningen, 1208624-010, Deltares, 2014, B

Moore, D.M. et al, 2014. Earthquake Spectra, Volume 30, No. 3, pages 1057–1085, © 2014, Earthquake Engineering Research Institute, August 2014

NAM, 2019. Campaign to acquire SCPT at the G-station locations of the Seismic Monitoring Network (operated by KNMI), Oktober 2019, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/afd4664f-cff5-4e25-878a-29113a71b6c1>, laatste toegang 19 januari 2021

NAM, 2020a. Seismische dreigings- en risicoschatting Groningen gasveld, Actualisering voor productieprofiel GTS – raming 2020, maart 2020, <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2020/03/31/bijlage-seismic-hazard-and-risk-assessment-groningen-field-update-for-production-profile/bijlage-seismic-hazard-and-risk-assessment-groningen-field-update-for-production-profile.pdf> laatste toegang 14 januari 2021

NAM, 2020b. Third Campaign to acquire SCPT at the location of the G-stations of the Seismic Monitoring Network (operated by KNMI), <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/ae2cdfdd-6bee-4f52-9f74-f6ce74fff9b8>, August 2020, laatste toegang 11 november 2020

NAM, 2020c. Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen, Addendum to version 5 July 2020, November 2020, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/3730f560-d84c-47ea-aefd-a6636e3d5c2b>, laatste toegang 12 januari 2021

NORSAR, 2018a. Review of the public KNMI induced earthquake catalogue from the Groningen gas field. Phase 1, WP1, June 20182, https://www.kemprogramma.nl/file/download/57979494/KEM11%20NORSAR_SodM_Groningenreview_WP1.pdf, laatste toegang 14 januari 2021

NORSAR, 2018b. Review of the public KNMI induced earthquake catalogue from the Groningen gas field. Phase 1, WP2, June 2018,

https://www.kemprogramma.nl/file/download/57979493/KEM11%20NORSAR_SodM_Groningenreview_WP2.pdf, laatste toegang 14 januari 2021

NORSAR, 2020. KEM-11 phase 2A, Assessing data collection methods for the purpose of GMPE calculations at Groningen, September 2020, <https://kemprogramma.nl/files/view/57979652/kem-11b-phase-2a-sodm-gmpe-data-collection-report-revisedfinal-02sep2020-signed.pdf>, laatste toegang 18 januari 2021

NORSAR, 2021. KEM-11 phase 2B, Quality control for the publication of online data by KNMI, in preparation, publication expected in 2021

PWC, 2019. Onderzoek gebruik KNMI-data, 28 oktober 2019, verzonden aan Tweede Kamer tegelijk met onderhavig rapport op 11 maart 2021

SED, 2019. Fact-finding mission / audit: Groningen Seismic Measurements, 21 May 2019, opgenomen als Bijlage 5 in (SodM, 2019e), https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+05+Groningen_Report_SED_reviewed_Geredigeerd.pdf, laatste toegang, 18 januari 2021

Seister, 2019. Analysis of consistency between B- and G- stations records for induced events in the Groningen gas field, Final Report, Document No: STR_FUG_18P17_01, https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+01B+STR_FUG_18P17_01_analysis_B-G_stations_Groningen_V2_Geredigeerd.pdf, laatste toegang 18 januari 2021

SodM, 2019a. Feitenonderzoek naar de afwijkende G0-metingen in Groningen, mei 2019, opgenomen als bijlage 8 in (SodM, 2019e), https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+05+Groningen_Report_SED_reviewed_Geredigeerd.pdf, laatste toegang 18 januari 2021

SodM, 2019b. Het effect van de verkeerde verwerking van de G4 metingen tijdens de aardbeving bij Slochteren op 29 mei 2017 in V5 GMM, mei 2019, opgenomen als bijlage 6 in (SodM, 2019e), https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+05+Groningen_Report_SED_reviewed_Geredigeerd.pdf, laatste toegang 18 januari 2021

SodM, 2019c. De mogelijke gevolgen van de her-kalibratie van de afwijkende G0-metingen voor de V5 GMM, SodM, mei 2019, opgenomen als bijlage 7 in (SodM, 2019e), https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+07+De+mogelijke+gevolgen+van+de+her-kalibratie+van+de+afwijkende+G0-metingen+voor+de+V5+GMM_Geredigeerd.pdf, laatste toegang 18 januari 2021

SodM, 2019d. Appendix bij (SodM, 2019c), SodM mei 2019, opgenomen als Appendix bij Bijlage 7 in (SodM, 2019e), https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+08+Feitenonderzoek_van_de_afwijkende_G0-metingen+eTK6826-gereedigeerd.pdf, laatste toegang 18 januari 2021

SodM, 2019e. Validatie van het seismisch netwerk van het KNMI in Groningen (tussentijdse rapportage), 10 juli 2020, <https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/validatie-van-het-seismisch-netwerk-van-het-knmi-in-groningen-gereedigeerd.pdf>, laatste toegang 18 januari 2021

Staalduinen, P.C. Dr.ir. K.C. Terwel, K.C., Rots, J.G., 2018. Onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen - Methodologie en case studies ter duiding van de oorzaken, TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Rapport nummer: CM-2018-01, Projectcode: C31H16, 11 juli 2018

Stewart, J.P., Crouse, C.B., Hutchinson, T.C., Lizundia, B., Naeim, F., Ostadan, F., 2012. Soil-Structure Interaction for Building Structures, NIST Grant/Contract Reports (NISTGCR) - 12-917-21, 2012

Stewart, J.P., 2000. Variations between foundation-level and free-field earthquake ground motions," Earthquake Spectra, 16 (2), 511-532, 2000

TU Delft, 2019. Evaluation, validation and improvement of the site-amplification component of the Groningen Seismic Risk Model: A review of the KNMI procedures for the installation of the sensors and correction of the amplitudes implemented", ES-KEM02-28062019, 28 May 2019, opgenomen als Bijlage 3 in (SodM, 2019e), <https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+03+Brief+memo+to+SodM+-KEM02-TUD-gereedigeerd.pdf>, laatste toegang 21 januari 2021

Witteveen+Bos, TU Delft, TNO, 2019a. Investigation of malfunctioning recording stations for Groningen earthquake events over period 2014 – 2018, reference 113982/19-008.330, Final version, 12 May 2019, opgenomen als Bijlage 2 in (SodM, 2019e), <https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+02+113982-19-008.330-notd-Investigation+of+malfunctioning+earthquake+recording+stations+for+Groningen+earthquake+event+s+over+period+2014+-+2018-gereedigeerd.pdf>, laatste toegang 18 januari 2021

Witteveen+Bos, 2019b. B0 accelerometers Groningen, Damping effects by buildings of the B0 accelerometers, 113982/19-011.388, 9 July 2019, opgenomen als Bijlage 4A in (SodM, 2019e), https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+04A+113982+19+009+783+notd+Dynamic+amplification+effects+for+B+stations+due+to+building+response+getekend++W+B+final+report_Gereedigeerd.pdf, laatste toegang 18 januari 2021

Witteveen+Bos, 2019c. Dynamic amplification effects for B-stations due to building response, 113982, Final version, 12 June 2019, opgenomen als Bijlage 4B in (SodM, 2019e), https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2019/07/10/tussentijdse-rapportage-validatie-seismisch-netwerk-knmi-groningen/Bijlage+04B+113982-19-011.388-repf-Damping+effects+on+B-station+buildings+V2_Geredigeerd.pdf, laatste toegang 18 januari 2021

Witteveen+Bos, 2020a. Evaluation, validation and improvement of the Site Amplification component of the Groningen Risk Model (KEM-02), Research Question 1, 1 april 2020, <https://kemprogramma.nl/files/view/57979644/kem-02-wp1-report-110108-20-005119-rapd-kem-02-research-question-1-report-signed.pdf>, laatste toegang 14 januari 2021

Witteveen+Bos, 2020b. Evaluation, validation and improvement of the Site Amplification component of the Groningen Risk Model (KEM-02), Research Question 2, 1 april 2020, <https://kemprogramma.nl/files/view/57979648/kem-02-wp2-report-110108-20-005138-rapd-kem02-research-question-2-report-signed.pdf>, laatste toegang 12 januari 2021

Witteveen+Bos, 2020c. Evaluation, validation and improvement of the Site Amplification component of the Groningen Risk Model (KEM-02), Research Question 3, 1 april 2020, <https://kemprogramma.nl/files/view/57979646/kem-02-wp3-report-110108-20-015496-rapd-kem02-research-question-3-report-signed.pdf>, laatste toegang 12 januari 2021

9. Termen, afkortingen en definities

Accelerometer	Meetinstrument dat aangeeft welke versnelling of vertraging een bewegend voorwerp ondervindt onder invloed van de krachten die erop uitgeoefend worden
B0-meter	Versnellingsmeter aan het oppervlak van het huidige KNMI B-netwerk waarmee grondversnellingen ten gevolge van aardbevingen worden gemeten. De meters staan geïnstalleerd in gebouwen verspreid over (het centrumgebied) van het veld
B-netwerk	Ouder KNMI-netwerk van versnellingsopnemers aan het oppervlak in het Groningenveld
Consolidatie	Verdichting van grond
Consortium	Samenwerkingsverband tussen een aantal verschillende bedrijven die over elkaar aanvullende expertise beschikken
CPT	Conus penetratie test/sondering: een kegelvormige sonde wordt met een constante snelheid in de bodem geduwd om de gelaagdheid en de eigenschappen van de bovenste lagen van de ondergrond (tot ongeveer 30 meter diepte) vast te stellen
Digitiser	Apparaat om een gemeten signaal om te zetten in digitale getallen
Empirische GMPE	GMM voor Groningen voor de voorspelling van groundbewegingen voor (en alleen gebaseerd op) aardbevingen met sterktes die al zijn opgetreden
Epicentrum	De plaats aan het oppervlak die zich het dichtst bij het hypocentrum (de ondergrondse bron) van de aardbeving bevindt
EZK	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Frequentie	Aantal trillingen per seconde in een seismische golfvorm
Fugro	Nederlands ingenieursbureau gespecialiseerd in geofysisch werk
G0-meter	Versnellingsmeter aan het oppervlak van het huidige KNMI G-netwerk waarmee groundbewegingen ten gevolge van aardbevingen worden gemeten. De meters staan geïnstalleerd in speciaal daarvoor ontworpen meetkasten die over het Groningen-veld verspreid staan
G1- t/m G4-meters	Seismometers voor de vaststelling van de locatie en magnitude van de aardbevingen in Groningen. De meters zijn op diepte van 50, 100, 150 en 200 m geïnstalleerd in ondiepe boorgaten verspreid over het veld
Geïnduceerde aardbeving	Een aardbeving veroorzaakt door menselijke activiteit zoals het produceren van gas uit de diepere ondergrond
GMM	Ground Motion Model, model waarmee de (kansen op) groundbewegingen worden berekend die kunnen optreden tijdens

	<p>een aardbeving van een gegeven magnitude die op een gegeven locatie optreedt. Het Groningen GMM is in verschillende stappen ontwikkeld. Het eerste eenvoudige model GMM-versie 0 (V0) werd begin 2013 gemaakt voor het 2013 Winningsplan. In de jaren daarna is het model stapsgewijs steeds geavanceerder geworden. Het huidige model heeft versienummer 6. NAM werkt momenteel aan de ontwikkeling van versie 7</p>
G-netwerk	<p>Vanaf 2013 geïnstalleerd KNMI-netwerk van versnellingsopnemers aan het oppervlak en seismometers in 200 meter diepe boorgaten verspreid over het Groningenveld</p>
Hanze University	<p>Hanzehogeschool in Groningen</p>
HRA model	<p>Computermodel waarmee de seismische dreiging en het seismisch risico in Groningen worden berekend</p>
Hypocentrum	<p>De plaats in de diepe ondergrond waar de aardbeving ontstaat</p>
IenW	<p>Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat</p>
IMG	<p>Instituut Mijnbouwschade Groningen</p>
KEM	<p>Kennisprogramma Effecten Mijnbouw, onderzoekprogramma voor ontwikkeling van een onafhankelijke kennispositie dat op advies van de Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV) in opdracht van de Minister van EZK wordt uitgevoerd. Doel is het inzicht in mogelijke dreigingen en risico's van mijnbouwactiviteiten in Nederland te vergroten</p>
KEM Expert panel	<p>Panel van onafhankelijke wetenschappelijke deskundigen dat toeziet op de kwaliteit, relevantie, volledigheid, geschiktheid en onafhankelijkheid van het KEM-programma</p>
KNMI	<p>Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut</p>
Kwaliteitsmanagementsysteem	<p>Een structuur waarbinnen alles wordt vastgelegd dat zorgt voor een goede kwaliteit zoals procedures, instructies, registraties, doelen en acties. Het is compleet, wordt onderhouden en voortdurend getoetst en verbeterd</p>
Metadata	<p>Gegevens die de karakteristieken van de gegevens beschrijven. Het zijn gegevens over de data</p>
Momentmagnitude	<p>Kracht van de aardbeving in termen van de hoeveelheid energie die bij de schok vrijkomt. Proefondervindelijk heeft men berekend dat iedere toename met één magnitude-eenheid overeenkomt met een 30-voudige verhoging van de vrijgekomen energie</p>
MOSAYK	<p>Italiaans ingenieursbureau in Padua gespecialiseerd op het gebied van seismische modelberekeningen</p>
NAM	<p>Nederlandse Aardolie Maatschappij</p>
NORSAR	<p>Onafhankelijk Noors Kennisinstituut gespecialiseerd in seismologie en seismische monitoring</p>

NPR	Nationale Praktijk Richtlijn. Een rekenkundige beoordeling volgens de NPR geeft aan of een gebouw sterk genoeg is om de belasting van een aardbeving te kunnen weerstaan. De NPR biedt opdrachtgevers, constructeurs en aannemers een (technisch) houvast bij nieuwbouw en bij het preventief versterken van bestaande gebouwen
Pre-B0-meter	Versnellingsmeter aan het oppervlak van het vroegere KNMI B-netwerk waarmee grondversnellingen ten gevolge van aardbevingen werden gemeten. De meters staan geïnstalleerd in gebouwen verspreid over (voornamelijk het centrumgebied) van het veld en zijn in 2013/204 vervangen door de B0-meters
PGA	Peak Ground Acceleration: de hoogste grondversnelling die optreedt op een bepaalde locatie tijdens een aardbeving
PGV	Peak Ground Velocity: de hoogste snelheid waarmee de grond beweegt op een bepaalde locatie
PWC	PricewaterhouseCoopers, internationaal accountants- en belastingadviseur bedrijf, met hoofdzetel in Londen
Random meetverschillen	Willekeurige verschillen: soms is de ene meting hoger, soms juist de andere meting
Record	Zie seismische golfvorm
SCPT	Geavanceerde versie van de CPT test waarmee ook de seismische voortplantingssnelheid als functie van de diepte wordt gemeten
SDAP	Studie en Data Acquisitie Plan (NAM)
SDAP-addendum	Bijlage bij het NAM SDAP
SED	De Zwitserse seismologische dienst
Seismische golfvorm	Het patroon van de trilling die door een aardbeving wordt veroorzaakt weergegeven als de amplitude tegen de tijd
Seismische groundbewegingen	De trilling van de grond ten gevolge van een aardbeving
Seismische grondsnelheid	De snelheid waarmee de grond trilt ten gevolge van een aardbeving
Seismische grondversnelling	De verandering van de snelheid waarmee de grond trilt ten gevolge van een aardbeving
Seismisch meetstation	Opstelling aan het oppervlak of dieper in de grond waarmee trillingen (bijvoorbeeld door aardbevingen) worden vastgelegd
Seismische metingen	Metingen die worden uitgevoerd voor de studie van aardbevingen.
Seismometer	Meetinstrument waarmee trillingen die door aardbevingen worden veroorzaakt worden gemeten. In Nederland meestal met meters op dieptes van 50, 100, 150 en 200 meter voor de registratie van de trillingen in één verticale en twee horizontale richtingen

Seister	Frans consultancy bedrijf gespecialiseerd in geowetenschap, geologie en seismische engineering
Shake maps	Kaarten met de contouren van de opgetreden maximale grondversnelling (de PGA), maximale grondsnelheid of maximale pseudo spectrale versnelling (PSA) voor een gegeven aardbeving
SodM	Staatstoezicht op de Mijnen (toezichthouder op o.a. de olie en gaswinning in Nederland)
SRA	Seismische risicoanalyse
SSI	Soil Structure Interaction: het effect van gebouwen op de seismische metingen met meters gemonteerd in die gebouwen
State-of-the-art	Hoogste niveau van ontwikkeling naar de huidige stand van zaken
Systemische verschillen	De ene meting is meestal hoger dan de andere meting
TCMG	Tijdelijke Commissie Mijnbouwschade (per 1 juli 2020 opgegaan in het Instituut Mijnbouwschade Groningen)
Tectonische aardbeving	Natuurlijke aardbeving door de beweging van ondergrondse breuksystemen over geologische tijden
Teleseismisch signaal	Signaal van een aardbeving op grote afstand (> 1000 km)
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
TU Delft	Technische Universiteit van Delft
Validatieonderzoek	Het controleren van een waarde of een methode om aan te tonen dat een apparaat, systeem of instrument met een grote mate van zekerheid in staat is bedoelde resultaten op te leveren
Versnellingsopnemer	Zie accelerometer
Vrijeveldmeting	Onverstoorde meting van de groundbewegingen die aan het vrije oppervlak optreden, niet verstoord door gebouwen etc.
Vs	Voortplantingssnelheid van de seismische schuifgolven
Witteveen+Bos	Van oorsprong Nederlands advies- en ingenieursbureau dat diensten levert op het gebied van water, infrastructuur, milieu en bouw

Bijlage: KEM-11, phase 2A: “Assessing data collection methods for the purpose of GMPE calculations at Groningen”, comments from KNMI, 5 October 2020

This report provides a thorough discussion on the data collected in Groningen and used to construct a Ground Motion Model (GMM) for the region. The report is subdivided in 3 work packages: a) designing a state-of-the art system, b) evaluation of current network and data and c) potential improvements to the current network and data collection.

In the Executive summary the main conclusions are presented. Most of these conclusions are in our view relevant. However, we question the relevance of some of them. We will detail our comments below and follow the chapters in the report.

As a general remark, we find that there is a marked difference between the WP descriptions in using recent literature. E.g. in WP1 a discussion on magnitude calculation is held without inclusion of recent literature with respect to Groningen, while this is taken into account in WP2. A final editorial review of the total document could have improved this document.

WP1:

This work package gives an overview of issues to be addressed in the design of a state-of-the-art system. The definition of “state-of-the-art” is not always clear and obviously subjective, but we can agree to most listed requirements.

1.2 Network design.

The description is partly general, partly tailored to Groningen and this causes sometimes confusion. E.g. the distance limitation to 10 km is Groningen specific, but this is only mentioned later in the text. We would have preferred a general discussion on network design (general principles), followed by specifics for Groningen.

For Groningen the suggestion of a 1 km deep borehole purely for phase identification (p13) is in our view an overkill, since phase identification can very well be done with the shallow boreholes. In fact, this was routinely done when the network was sparse (<2014) and is still sometimes applied (Ruigrok and Dost, 2019). A 1 km deep borehole is of course useful, but does not provide essential data to add to the state-of-the-art requirements.

Other recommendations, e.g. using travel time modelling, using a grid search methodology and calculation of magnitudes are used in publications not mentioned in the references to this chapter (e.g. Kraaijpoel & Dost, 2013; Spetzler & Dost, 2017; Dost et al. 2018, 2019). It is interesting to note that the last two references are in the references of Chapter 2, not in the refs to Chapter 1.

On p12 it is mentioned that picks should not be used beyond 10 km. This is indeed the distance threshold that we use for the G-network. Within this distance, the known 3D velocity model of the overburden can be used to locate events.

For pre-2015 there is not the luxury of the G-network. For these events we found that the location uncertainty is not as bad as is implicated in the KEM-11 report. At distances larger than 10 km, the underburden starts to play a role. In the KEM-11 report, conclusions on wave propagation at larger

range are drawn based on fictitious underburden models for Groningen (Figure 1.3). Analysis of P-wave picks at distances beyond 10 km, however, shows that apparent horizontal propagation velocities are nearly constant over a large range (e.g., Jagt et al., 2017). It turns out that the faster rays predicted with ray tracing are not observed and picked in practice, because 1) the assumed underburden model is not correct, or 2) because ray tracing predicts rays that in reality have a too-small amplitude to be discerned. For the picks at larger range, instead, a 'constant horizontal propagation velocity' assumption is made.

A remark on the usage of ML for $M < 2$ in GMPEs (p16) is not understood, since the GMPE for Groningen is only derived for $M > 2.4$. For a relation between M and ML , see Dost et al., 2018, 2019.

The suggestion of a staggered grid is interesting for new networks. However, also in the present layout the distance between stations is 4-5 km. The final layout of the network is, unfortunately, mainly determined by practical circumstances, especially in a densely populated area.

1.3 instrumentation and deployment requirements

On p23 it is recommended to add a velocity sensor to the accelerometer at the surface. The reason behind this recommendation is the calculation of magnitude and corner frequency. However, since the conversion between acceleration, velocity and displacement can easily be carried out with limited distortion and the local magnitude is calculated based on data from the lowest borehole sensor at 200m depth, we do not see a clear benefit.

The site selection chapter (1.3.2) lists two recommendations: 1] sensors should not be placed within buildings unless strictly necessary and 2] the best solution is to install sensors at a depth below the unconsolidated sediment. Concerning the first recommendation: the original stations of the pre-B-network were installed in buildings, since there was no alternative at that time (due to limited budget and availability of electricity and communication). So, this installation was strictly necessary. Next, concerning 2: In Groningen there is no simple way to reach below the unconsolidated sediments at 800m depth (see Ruigrok et al., 2019), so this argument and Figure 1.5 are not relevant for Groningen. Besides, the surface sensor should be located at the same location as the borehole, so its location is determined mainly by the planned borehole site. Finally, the authors should realize that the ground water level in the area is more or less at surface level, so the recommendation to bury the additional infrastructure is not practical for Groningen.

1.4 Data collection procedures and quality assurance

The listed general requirements for state-of-health monitoring are interesting and helpful. Many of these requirements have been developed at KNMI (e.g. PPSD), or are being developed in an automated way, as suggested on p 29.

1.5 Summary

This short overview enables a check on the procedures that are already developed and that could be added to the existing procedures at KNMI.

WP2: Evaluation of current network and data

In this chapter there is some confusion on the use of the terms pre-B, B and B0 stations. In 2.1 the terms are correctly introduced, pre-B and B, while in 2.2 the term B0 is suddenly introduced. This should be replaced with B, since the stations are all only installed at the surface.

2.1 The recommendations in Chapter 1 already involved Groningen specific information, as mentioned earlier.

2.2 This section lists a number of known problems. In the evaluation of 2.2.5 the recommendation to log all changes in metadata is valuable, even though this information could be extracted from the seed header section.

2.3 As mentioned before, the B stations were intended to be installed in houses, since there was no budget to set up a free-field installation. So, if we follow the criteria defined in 1.3.2 the clause “unless strictly necessary” applies to the installation of the B-station network. Therefore we cannot concur with the statement on p58 that the B network stations are not state of the art. On the same page recommendations are made with respect to the set-up of the G-station network. Although we agree that a station should be far from noise sources, the suggested burial of the data acquisition unit and lowering of the cabinet are not feasible in Groningen, where the groundwater level is approximately at surface level. In the Groningen situation the current field set-up is carefully chosen.

2.4 The coordinate conversion issue, although a small effect, should be repaired in the database. The authors are thanked for pointing this out. It is probably due to comparison with pre-WGS84 topographic maps.

2.5 We agree that it will be useful to provide location uncertainty. In fact, this has been started for selected recent events. However, for the development of GMM’s location uncertainty will be visible in the variability of the data set. We are not aware of published GMMs where location uncertainty is taken into account.

For most events we computed the epicentral location uncertainty (by mapping the variability in arrival times with respect to the assumed model to location probability density function). E.g., for Event 1, the major and minor axes of the ellipse that describes the 95% confidence zone are 1.7 and 1.4 km, respectively. For this computation we used the P-wave travel time picks at stations ENM4, ZAN1, HKS, WDB4, FSW4, HWF4 and ZLV4 (which are publicly available). It is unclear why the authors of the report assume that the uncertainty for this event and others, is larger than 5 km. The location error is implicitly taken into account in a GMPE. Mis-locations cause an (apparent) increased variability of the ground-motion field, which is expressed with the within-event variability of the GMPE. Similarly, magnitude errors result in an increased inter-event variability of the GMPE.

In 2.5.1 earthquake locations are discussed. Prior to 2015 the network was sparse and besides P- and S onsets, other information like back azimuth determination based on all borehole levels was used. This is not mentioned in the report and may affect evaluation of uncertainty.

2.5.3 For the calculation of the SNR a 25s time window is selected for the signal. This is large compared to the duration, especially at small distances and may result in a mixing a substantial amount of noise in the signal part. On p99 it is mentioned that duration is <10s for distances < 10km, so at least for distances <10km a 10s time interval would be a better choice. Even better would be to

make the time window duration dependent on signal duration. Furthermore, the dominant source of high frequency noise at multiple locations is 50Hz noise. So, we agree with the use of a notch filter, also before the SNR is calculated.

In the evaluation section the line "Therefore, G0 station amplitudes cannot be considered as ground truth either" (p98, 6th line from below) is not clear. The measurements at the surface are correct, but involve the total structure including the shallow geology. The question is what the authors mean with "ground truth". In the GMM the amplification due to the shallow structure is included.

2.6 Earthquake depths are fixed at reservoir depth (3km) due to the limited depth resolution in the hypocenter location. In a separate analysis using borehole instrumentation at reservoir level, it was confirmed that seismicity is confined to this depth.

The suggestion to bury the G-network type accelerometer at larger depths is not feasible in Groningen, nor desired because of notches that can result from interference of up- and down-going waves.

The statement at the bottom of p100 on improperly instrument corrected data is only valid for data for 1 event, not for the total dataset.

p101 The horizontal components are quality controlled before being used in GMM development. The vertical component is less relevant for hazard and risk calculations. This was discussed at an early stage in the GMM development.

WP3 Potential improvements

Implementation of scheduled tasks for SOH monitoring.

We confirm the necessity of state of health procedures.

Inclusion of smaller magnitudes.

The lower magnitude events (<2.5) do not contribute significantly to the hazard and risk and therefore have been excluded from the GMM development. We do not see a benefit to include them.

The G-network accelerometers yield high quality data, also for magnitudes considerably smaller than $M=2.5$. Depending on the clip level setting of the instruments, the accelerometers can still record ground motion below -125 dB [(m/s²)²/Hz]. This is below the ambient seismic noise conditions at the surface in Groningen. Over the years, a large database of ground motion records has been built up for magnitudes smaller than 2.5. This enabled derivation of GMPEs that are valid for small magnitudes. Bommer et al. (2019) derived an empirical GMPE that goes down to $M=1.8$. KNMI further extended the range down to $M=1.5$ (Ruigrok and Dost, 2020). The hazard and risk modeling effort, however, does not use magnitudes smaller than 2.5. The main reason is that small magnitudes play a negligible role in hazard and risk.

Table 10 shows very high values of uncertainty in the location coordinates (up to 20 km). Is there a reason why these are taken so large? It is not relevant for Chapter 3.2

Inclusion of the vertical component in GMM generation.

The frequency content of the vertical component is much higher than the horizontal components and a lot of effort should be put in finding conversion factors for which a large variability would need to be included. So, we do not think this will generate more reliable GMMs.

Improvement of the knowledge of near-surface attenuation.

Improvements on the estimation of near-surface attenuation have been developed in the development for GMM v7. A new damping model will largely solve the apparent incompatibility between G0 and G4.

Careful evaluation of pre-B and B-network observations

All records used in the GMM developments have been manually quality controlled, so this has already been implemented. Location uncertainties will be calculated taking into account all data that was used in the hypocenter inversion, including information on back-azimuth.

Enhancement of the understanding of attenuation parameters

Although a borehole sensor string with instruments down to 800m will give a very nice independent check on the attenuation in the first 800m, most variability is expected in the first 200m, where the local and lateral variations are largest. From surface-wave analysis, information on damping is available between 200 and 800 m depth.

Further suggestions

The 4g clip level could probably be reduced, but this reduction may be overlooked by users of the data when processing the data. So, we are careful not to make too many changes to the system.

Wind protection systems may be investigated. However, any addition to the current system in the field may make the installations more vulnerable.

Additional references

Bommer, J. J., P. J. Stafford, and M. Ntinalexis (2016), Empirical ground-motion prediction equations for peak ground velocity from small-magnitude earthquakes in the Groningen field using multiple definitions of the horizontal component of motion, NAM Study Report.

Jagt, L., E. Ruigrok, and H. Paulssen (2017), Relocation of clustered earthquakes in the Groningen gas field, *Netherlands Journal of Geosciences*, **96**(5), s163-s173.

Kraaijpoel, D., and B. Dost (2013). Implications of salt-related propagation and mode conversion effects on the analysis of induced seismicity, *J. Seismol.* **17**, 95–107.

Ruigrok, E., and B. Dost (2019), Seismic Monitoring and Site-Characterization with Near-Surface Vertical Arrays. EAGE expanded abstract, Near Surface Geoscience '19, We_25th_A08.

Ruigrok, E., and B. Dost (2020), Advice on the computation of peak-ground-velocity confidence regions for events in gas fields other than the Groningen gas field, KNMI Technical Report, TR386.

Spetzler, J., and B. Dost (2017a). Hypocenter estimation of induced earthquakes in Groningen, *Geophys. J. Intl.* **209**, 453–465, doi: 10.1093/gji/ggx020

11 maart 2021

Staatstoezicht op de Mijnen
Henri Faasdreef 312 | Den Haag
T 070 379 84 00

info@sodm.nl
www.sodm.nl
[@sodmnl](https://twitter.com/sodmnl)