



Royal Netherlands
Meteorological Institute
*Ministry of Infrastructure
and Water Management*

Ontwerp monitoringsnetwerk voor geïnduceerde seismiciteit ten gevolge van mijnbouwactiviteiten

P. Kruiver, B. Dost, E. Ruigrok, J. Spetzler, G.J. van den Hazel, T.
Campmans, L. Evers

De Bilt, 2021 | Technical report; TR-391



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Ontwerp monitoringsnetwerk voor geïnduceerde seismiciteit ten gevolge van mijnbouwactiviteiten

Datum
26-3-2021

Status
Definitief



KNMI

Bezoekadres
Utrechtseweg 297
3731 GA De Bilt
Postbus 201
3730 AE De Bilt
T 030-220 69 11
www.knmi.nl

Ing Bank NV
IBAN NL 05 INGB 0705000877
t.n.v. Min. IenW IBI KNMI
BIC INGBNL2A

Contactpersoon
P.P. Kruiver

Datum
9 juni 2023

Kenmerk
TR-391

ADDENDUM BIJ TR-391

In opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat heeft KNMI een studie uitgevoerd naar het ontwerp van een monitoringsnetwerk voor geïnduceerde seismiciteit ten gevolge van mijnbouwactiviteiten. De resultaten zijn gerapporteerd in het onderhavige rapport. Dit rapport bevat kaarten met de minimale magnitude van een aardbeving die het netwerk kan detecteren en lokaliseren en vanaf welke magnitude de aardbevingscatalogus als compleet beschouwd kan worden (MoC). De kaarten zijn opgenomen in figuur 2-8 en figuur 2-9, en de figuren in Appendix A. Deze kaarten zijn berekend op basis van twee gegeneraliseerde relaties tussen de afstand en magnitude. Door nieuw onderzoek en het toevoegen van stations zijn deze kaarten ondertussen achterhaald. De meest recente versie van de MoC kaart is te vinden op het KNMI Data Platform: <https://dataplatform.knmi.nl/group/seismology-and-acoustics>

Nieuw onderzoek

Sinds de uitvoering van deze studie is er aanvullend onderzoek naar de locatienauwkeurigheid van aardbevingslocaties uitgevoerd in opdracht van Staatstoezicht op de Mijnen. De resultaten zijn gepubliceerd in KNMI rapport "Construction of earthquake location uncertainty maps for the Netherlands" met rapportnummer TR-405. In deze studie zijn MoC kaarten berekend op basis van een uitgebreide analyse van ruiscondities van ieder station en een nieuw model dat signaalniveaus beschrijft. Daarmee wordt een realistischer beeld verkregen van de MoC die gehaald kan worden met het netwerk.

Aangezien door wijzingen in het netwerk, bijvoorbeeld toevoeging van nieuwe stations, de MoC kaart periodiek vernieuwd wordt, is het van belang om altijd uit te gaan van de meest recente versie (<https://dataplatform.knmi.nl/group/seismology-and-acoustics>).

Colofon

Projectnaam	Monitoringsnetwerk geïnduceerde seismiciteit
Versienummer	1.0
Locatie	De Bilt
Projectleider/ contactpersoon	Pauline Kruiver

Bijlage(n)	1
------------	---

Auteurs	Pauline Kruiver Bernard Dost Elmer Ruigrok Jesper Spetzler Gert-Jan van den Hazel Tony Campmans Láslo Evers
---------	---

Inhoud

	Colofon—3
	Managementsamenvatting—7
1	Inleiding—9
2	Huidige seismische monitoringsnetwerk—10
2.1	Historie—10
2.2	Type sensoren—12
2.3	Huidige Magnitude of Completeness—15
3	Mijnbouwactiviteiten—20
3.1	Soorten mijnbouwactiviteiten en mogelijke geïnduceerde seismiciteit—20
3.2	Huidige en toekomstige mijnbouwactiviteiten—21
3.2.1	Olie- en gas—22
3.2.2	Ondergrondse opslag—23
3.2.3	Zoutwinning—24
3.2.4	Geothermie—25
4	Eisen aan een monitoringsnetwerk—28
4.1	Magnitude of completeness—28
4.2	Nauwkeurigheid van plaatsbepaling—28
4.2.1	Ruimtelijke dekking (azimut)—28
4.2.2	Stationsafstand—31
4.3	Robuust—33
4.4	Toekomstbestendig—34
4.5	Basis en verdichting—34
4.6	Sensoren—35
5	Voorstel uitbreiding monitoringsnetwerk—36
5.1	Uitgangspunten m.b.t. magnitude, stationsafstand en type sensor—36
5.2	Uitbreidingsmogelijkheden—36
5.2.1	Reeds gepland—36
5.2.2	Stations van andere partijen—36
5.2.3	Upgrade van reeds bestaande stations—36
5.2.4	Nieuw te plannen stations—37
6	Conclusies en aanbevelingen—41
	Referenties—43
	Bijlage A: Kaarten met MoC en azimutdekking voor verschillende uitbreidingsscenario's—45

Managementsamenvatting

In de Motie voorgesteld op 11 maart 2020 (1) wordt verzocht om een fijnmazig netwerk voor de monitoring van aardbevingen bij mijnbouwactiviteiten met als doel de ongerustheid bij burgers die in de omgeving van een mijnbouwlocatie wonen weg te nemen. Ter voorbereiding op een reactie op deze motie heeft het Ministerie van EZK het KNMI verzocht om het seismische monitoringsnetwerk te evalueren. Tevens levert het KNMI aan de Commissie Mijnbouwschade Peak Ground Velocity (PGV) contouren op basis van waarnemingen van het netwerk. Deze PGV contouren gebruikt de Commissie Mijnbouwschade voor de schadeafhandeling na een aardbeving. In het onderliggende rapport is het huidige meetnetwerk beschouwd. Ook is met het oog op de toekomst een voorstel gedaan voor de uitbreiding van het netwerk voor de monitoring van aan nieuwe mijnbouwactiviteiten gerelateerde geïnduceerde seismiciteit.

Het huidige monitoringsnetwerk, bestaande uit sensoren van het KNMI en derden (o.a. operators), is passend voor de huidige mijnbouwactiviteiten waarvan de seismische monitoring in de winningsvergunningen is vastgelegd. De *Magnitude of Completeness* (MoC) is de minimale magnitude van een aardbeving die geregistreerd en gelokaliseerd kan worden. Het huidige netwerk heeft een MoC van 2,0 voor het gehele land en van 1,5 voor grote delen. Plaatselijk bij verdichtingen van het netwerk zijn er lagere waarden voor MoC: 1,0 in delen van Friesland, Drenthe, Noord-Holland, Zuid-Holland en Limburg en 0,5 in Groningen.

Het uitgebreide netwerk dient toekomstbestendig en robuust te zijn. Voor de toekomstbestendigheid is uitgegaan van de locaties van vergunningen voor mijnbouwactiviteiten van nlog.nl voor olie- en gasextractie, ondergrondse opslag, zoutwinning en geothermie. Tevens zijn de resultaten van de recente WARM studie van EBN (2020) met de potentie voor geothermie meegenomen in de analyse. Voor de robuustheid van het netwerk is uitgegaan van boorgatstations in het grootste deel van het land en versnellingsmeters aan het aardoppervlak in met name het zuiden van het land. Alle stations die real-time data leveren aan het KNMI zijn in de analyse meegenomen. Het KNMI draagt echter geen verantwoordelijkheid voor de kwaliteit en de beschikbaarheid van de monitoringsgegevens van het deel van het netwerk dat in eigendom is van derden. Om de huidige stations van derden in het netwerk op te nemen, dienen de beschikbaarheid en kwaliteit van de data op korte termijn geborgd te worden voor het KNMI. Dit geldt tevens voor mogelijk toekomstige stations van derden.

Op basis van de gegevens uit nlog.nl en WARM zijn er twee scenario's voor de uitbreiding van het netwerk uitgewerkt, namelijk:

1. Een MoC van 1,5 met een stationsafstand van 30 km, gebaseerd op de waarneming dat in Groningen aardbevingen vanaf een magnitude van ongeveer 1,5 door mensen gevoeld worden.
2. Een MoC van 1,0 met een stationsafstand van 15 km, gebaseerd op het feit dat aardbevingen gerelateerd aan ondiepere activiteiten dan gaswinning (op 3 km) al bij een lagere magnitude gevoeld kunnen worden.

Er zijn ook mengvormen van deze scenario's mogelijk en de uitbreidingen kunnen gefaseerd worden aangelegd. Afhankelijk van de keuze van het scenario bedraagt het

(1) Motie van de leden Agnes Mulder en Sienot over onafhankelijke metingen in de omgeving van mijnbouwlocaties, Kamerstuk kst-33529-733

aantal stations van de uitbreiding circa 30 tot 115 stations. Behalve de MoC is ook de nauwkeurigheid waarmee bevingslocaties kunnen worden bepaald van belang. Een eerste studie laat zien dat de nauwkeurigheid in de diepte voor een stationsafstand van 15 km significant beter is dan bij 30 km afstand. Om deze reden wordt een stationsafstand van 15 km aanbevolen voor het uitgebreide netwerk.

Om de nieuwe data uit het uitgebreide netwerk zo goed mogelijk te benutten zijn er een aantal wetenschappelijke onderzoeken nodig, onder andere:

- Het opstellen van een ruisniveaumodel met dempingsrelaties voor heel Nederland, voor verschillende sensoren.
- Het bepalen van de onzekerheid in epicentrum- en hypocentrumlocatie voor verschillende netwerkconfiguraties.
- Het samenstellen en waar nodig ontwikkelen van een 3D snelheidsmodel voor de ondergrond ten behoeve van locatiebepaling van hypocentra.

1 Inleiding

In de Motie voorgesteld op 11 maart 2020 (2) wordt verzocht om een fijnmazig netwerk voor de monitoring van aardbevingen bij mijnbouwactiviteiten met als doel de ongerustheid bij burgers die in de omgeving van een mijnbouwlocatie wonen weg te nemen. Ter voorbereiding op een reactie op deze motie heeft het Ministerie van EZK het KNMI verzocht om het seismische monitoringsnetwerk te evalueren. Tevens levert het KNMI aan de Commissie Mijnbouwschade Peak Ground Velocity (PGV) contouren op basis van waarnemingen van het netwerk. Deze PGV contouren gebruikt de Commissie Mijnbouwschade voor de schadeafhandeling na een aardbeving. In het onderliggende rapport is het huidige meetnetwerk beschouwd. Ook is met het oog op de toekomst een voorstel gedaan voor de uitbreiding van het netwerk voor de monitoring van aan nieuwe mijnbouwactiviteiten gerelateerde geïnduceerde seismiciteit.

In het rapport wordt een overzicht gegeven van het huidige seismische monitoringsnetwerk van het KNMI en van de huidige en verwachte toekomstige mijnbouwactiviteiten. Op basis hiervan is een voorstel gedaan voor het uitbreiden van het seismische monitoringsnetwerk tot voldoende dekking in het gehele land. Dit is gedaan voor twee scenario's, te weten voor een minimaal detecteerbare magnitude M_L van 1,0 en van 1,5. Tevens zijn een aantal aanbevelingen gedaan voor wetenschappelijke ontwikkelingen voor het optimale gebruik van het monitoringsnetwerk.

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van het huidige seismische monitoringsnetwerk. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de verschillende mijnbouwactiviteiten. Hoofdstuk 4 beschrijft de eisen waaraan een uitgebreid monitoringsnetwerk moet voldoen. Het voorstel voor de uitbreiding van het huidige netwerk is opgenomen in hoofdstuk 5. Het rapport sluit af met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 6.

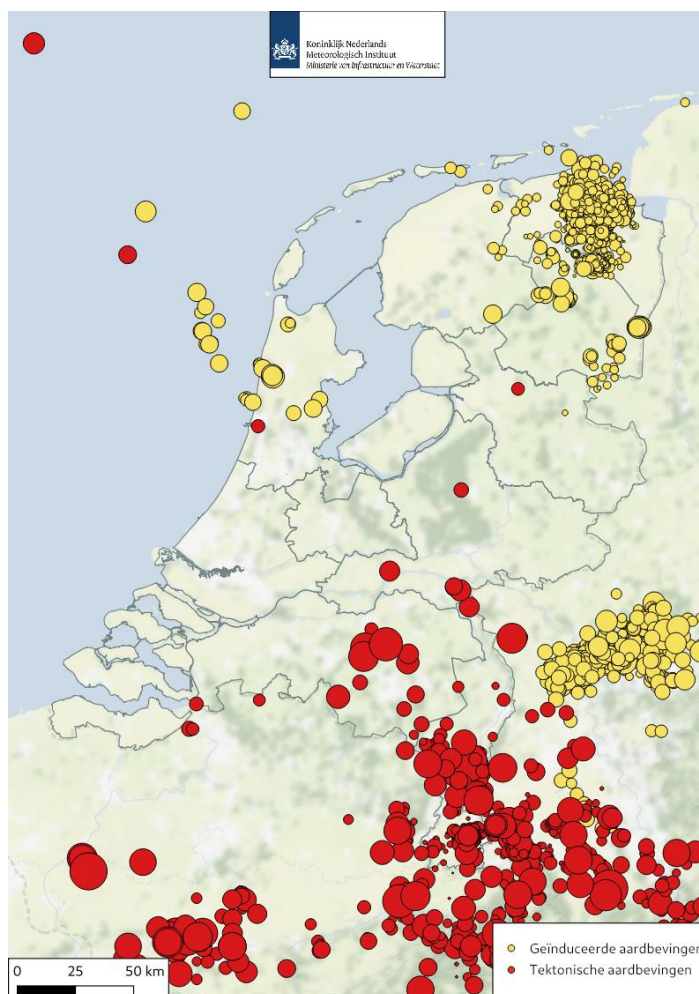
(2) Motie van de leden Agnes Mulder en Sienot over onafhankelijke metingen in de omgeving van mijnbouwlocaties, Kamerstuk kst-33529-733

2 Huidige seismische monitoringsnetwerk

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van het huidige seismische monitoringsnetwerk. Sectie 2.1 gaat in op de historie van het monitoringsnetwerk. Sectie 0 geeft uitleg over de verschillende type sensoren waarmee aardbevingstrillingen worden waargenomen. In Sectie 2.3 wordt ingegaan op de huidige magnitudedekking van het netwerk.

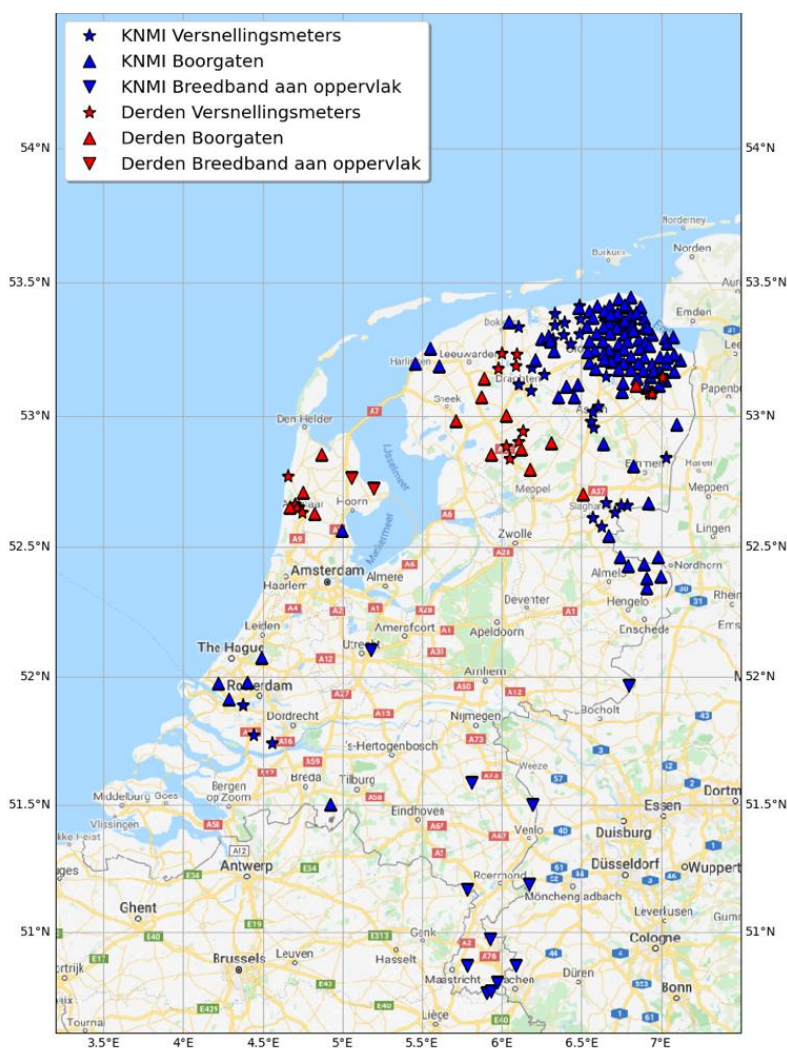
2.1 Historie

In Nederland treden er natuurlijke aardbevingen op en aardbevingen ten gevolge van mijnbouwactiviteiten. Een overzicht van de geregistreerde aardbevingen is gegeven in Figuur 2-1. De natuurlijke bevingen zijn gerelateerd aan de geologische situatie in het zuiden van het land, namelijk aan de tektonisch actieve Roerdalslenk. De bekendste recente natuurlijke aardbeving is die van Roermond die in de vroege ochtend van 13 april 1992 plaatsvond en een kracht had van 5,8 op de schaal van Richter. Het monitoringsnetwerk in het zuiden van het land is vooral gericht op het monitoren van natuurlijke seismiteit.



Figuur 2-1: Natuurlijke en geïnduceerde aardbevingen in Nederland (1 december 2020).

Het monitoringsnetwerk bestond uit een aantal breedbandsensoren in het zuiden van het land die sinds 1993 continu meten. In het noorden van het land (Noord-Holland en Groningen) werden in die tijd enkele verticale boorgatstations ingericht, vanwege de gaswinning uit het Bergermeer gasveld en het Slochteren gasveld. Sinds 1996 is er in Groningen een versnellingsmeternetwerk aan het oppervlakte aanwezig (Dost en Haak, 2002). In 2010 is het netwerk in Groningen voor de eerste keer uitgebreid met 6 nieuwe boorgatstations en 8 versnellingsmeters (Dost et al., 2012). Na de Huizinge aardbeving in 2012 is het netwerk in Groningen sterk uitgebreid. De versnellingsmeters zijn vervangen en hun aantal is uitgebreid. Tevens zijn er 79 verticale boorgatstations aangelegd. Recent zijn er in het Westland, waar geothermie plaatsvindt, een aantal boorgatstations geïnstalleerd. Binnenkort worden daar nog een aantal stations bij geplaatst. Ook zijn er bij diverse andere kleine gasvelden door verschillende operators lokale monitoringsnetwerken aangelegd. Het huidige operationele netwerk, waarvan in real-time data binnenkomt op het KNMI, is weergegeven in Figuur 2-2.

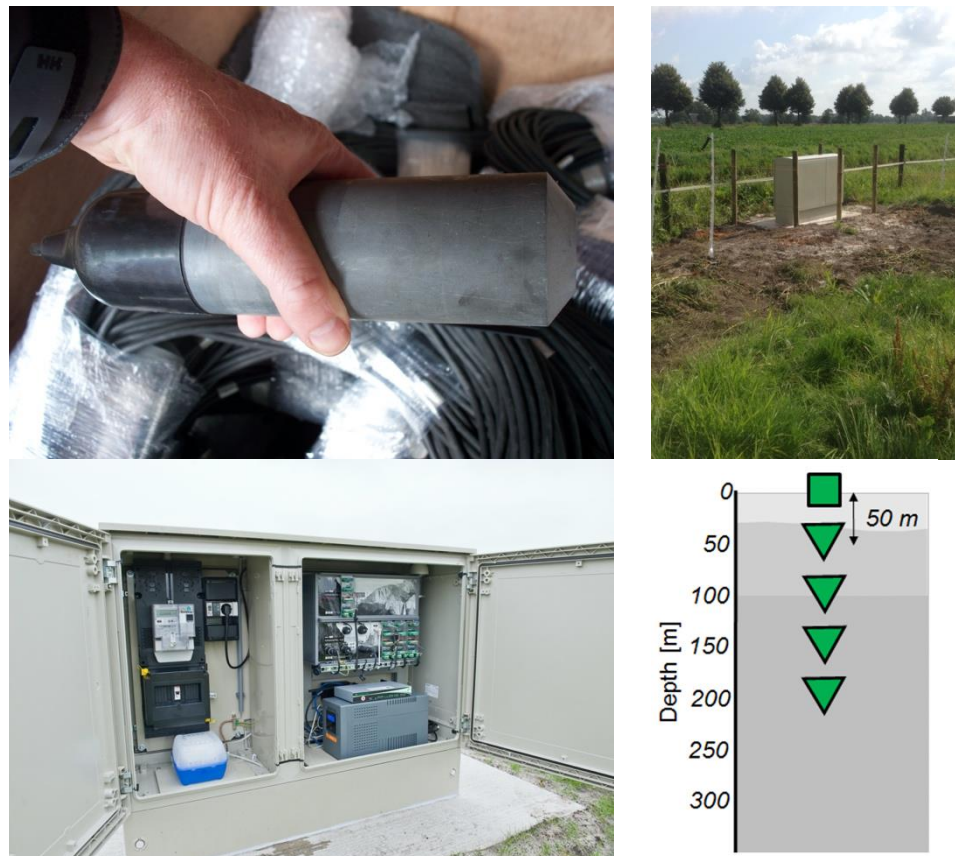


Figuur 2-2: Huidige seismische monitoringsnetwerk (datum 3 december 2020). De KNMI stations zijn weergegeven met blauwe symbolen. De stations van derden, zoals operators, zijn weergegeven met rode symbolen.

2.2 Type sensoren

Er zijn grofweg drie typen sensoren waarmee aardbevingstrillingen worden waargenomen. Dit zijn gefoons, versnellingsmeters en breedbandsensoren. Versnellingsmeters worden ook wel accelerometers genoemd. Iedere sensor heeft eigenschappen die hem meer of minder geschikt maken om in bepaalde situaties te meten.

Voor het detecteren en lokaliseren van de kleinste bevingen in een regio gebruiken we bij voorkeur instrumenten die op diepte geplaatst worden. Dit zijn gefoons op verschillende dieptes in boorgaten (Figuur 2-3). De reden voor plaatsing in een boorgat is dat de achtergrondruis aan het oppervlak vaak relatief hoog is en met de plaatsing op diepte deze ruis snel afneemt (Ruigrok en Dost, 2019). Bij dergelijke boorgatstations is tevens een versnellingsmeter aan het aardoppervlak geplaatst, om de impact van een beving vast te kunnen stellen. De metingen worden bijvoorbeeld gebruikt om ShapeMaps te maken.



Figuur 2-3: Boorgatstation in Groningen. Linksboven: een gefoon. Rechtsboven: de meetkast in het veld. Linksonder: de inhoud van de kast met dataloggers en communicatiemiddelen. Rechtsonder: Een schematische weergave van de gefoons (driehoeken) op diepte en een versnellingsmeter (vierkant) aan het oppervlak.



Figuur 2-4: Boven: versnellingsmeter met datalogger. Onder: versnellingsmeter op de bodem van een boorgatstation.

In een regio waar grotere bevingen kunnen plaats vinden is het frequentiebereik van een gefoon zoals die gebruikt wordt in boorgaten, niet voldoende. Een 4,5 Hz gefoon kan signalen tot ongeveer 0,5 Hz nog goed registreren. Aardbevingen met een magnitude groter dan 4 genereren trillingen met een lagere frequentie dan 0,5 Hz en hebben voor de registratie daarom instrumentatie nodig in een breder frequentiebereik. Hiervoor worden breedband sensoren gebruikt (Figuur 2-5). Deze breedbandsensoren hebben een frequentiebereik van ongeveer 0,01 Hz tot 30 Hz. Breedband sensoren worden vooral in Zuid-Nederland gebruikt, waar grotere bevingen kunnen optreden (Roermond 1992, M_L 5,8). Ook in de buurlanden (Duitsland, België, Groot-Brittannië) komen grotere bevingen voor, waarvan de trillingen in Nederland gevoeld en geregistreerd worden. In Groningen zijn enkele breedbandsensoren op een diepte van 100 m geplaatst, naast bestaande stations van het netwerk van boorgatgefoons.



Figuur 2-5: Breedbandsensoren in de mergelgrotten bij Valkenburg.

Versnellingsmeters zijn ook in regio's geplaatst waar vroeger bevingen zijn opgetreden die schade hebben veroorzaakt. Indien er weer een beving optreedt, dan is de omvang van het gebied waar schade mogelijk is opgetreden beter te bepalen. Een andere toepassing is bij kleinere gasvelden die een niet verwaarloosbare kans op beven hebben. Hier worden versnellingsmeters geplaatst binnen een straal van 5 km van een gasveld en bij bebouwde omgeving. Dit is naar aanleiding van inzichten van de Tcbb, die hebben geadviseerd om in plaats van een nul-meting aan gebouwen in de omgeving van dergelijke gasvelden, versnellingsmeters te plaatsen (Tcbb, 2018).

De voor- en nadelen van diverse sensoren zijn opgenomen in Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Voor- en nadelen van verschillende type sensoren van het monitoringsnetwerk.

Type sensor	Voordelen	Nadelen
Breedbandsensor	Laag-frequent signaal te meten voor karakterisering van $M > 4$ aardbevingen	Duur instrument Bij uitval geen reserve
Versnellingsmeter aan oppervlak	Goedkoper instrument Goedkopere installatie dan boorgat Nauwkeurig grotere trillingen meten	Meer ruis Bij uitval geen reserve
Gefoon in Boorgat	Betere signaal-ruis verhouding Nauwkeuring kleine trillingen te meten Bij uitval van een sensor is er back-up van een sensor op een ander niveau Door verschillende niveaus is er een beter beeld van de eigenschappen van de ondergrond voor de bovenste 200 m (seismische snelheden en demping). Betere identificatie van verschillende golven	Verzadiging bij grotere trillingen Duurder in aanleg dan oppervlaktestation Bij defect raken van sensor op diepte is deze niet te vervangen

2.3 Huidige Magnitude of Completeness

De minimale magnitude van een beving waar het netwerk een locatie van kan bepalen wordt de "Magnitude of Completeness" genoemd, de MoC. Op basis van het huidige netwerk en de aanname dat een aardbeving op ten minste drie stations geregistreerd moet zijn om een locatie te bepalen, is de MoC op elk punt in Nederland te berekenen.

Om de metingen om te zetten in lokale magnitudes (schaal van Richter) zijn er dempingsrelaties nodig. De magnitudeschaal van Richter gaat uit van een bepaald historisch instrument, de Wood-Anderson meter. De amplitudes van moderne instrumenten dienen geconverteerd te worden. Tevens moet rekening gehouden worden met de afstand van de beving tot het station. Er zijn momenteel twee dempingsrelaties voor Nederland in gebruik bij het KNMI:

- 1) Voor sensoren aan het oppervlak in Zuid-Nederland geldt de volgende relatie:

$$M_L = \log(A_{wa}) + 1,2178 \log(r) + 0,0023 r + 0,3036 \quad (1)$$

met r de hypocentrale afstand in km en A_{wa} de Wood-Anderson amplitude in millimeter. Deze relatie is vergelijkbaar met de relatie die is afgeleid voor de regio rond Limburg, Keulen en het noorden van België (Reamer & Hinzen, 2004) en is geldig voor een afstand van ongeveer 5 tot 200 km van een station. Voor kleinere afstanden is een correctie nodig, maar voor de huidige toepassing is dit een goede benadering. Deze relatie is afgeleid voor tektonische bevingen die op grotere diepte plaats. In Nederland wordt een gemiddelde diepte van 8 km aangenomen. In de berekening van de MoC wordt een gemiddeld ruïsniveau van $A_{wa} = 0,1$ mm aangenomen.

- 2) Voor geofoons in boorgaten in Noord-Nederland geldt de volgende relatie (Dost *et al.*, 2004):

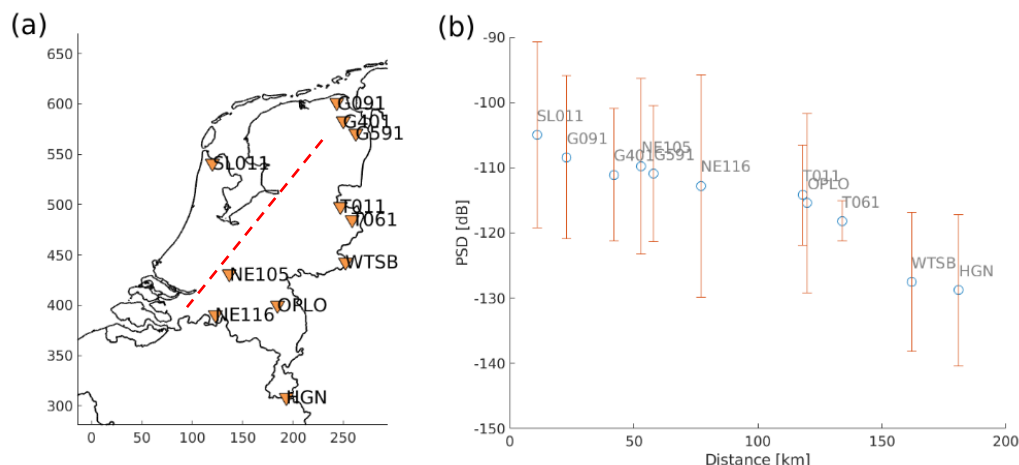
$$M_L = \log(A_{wa}) + 1,33 \log(r) + 0,00139 r + 0,424 \quad (2)$$

met r de hypocentrale afstand in km en A_{wa} de Wood-Anderson amplitude in millimeter. Deze relatie is afgeleid voor boorgatsensoren op 200 m diepte en geldt voor boorgatstations in Noord-Nederland. Het gemiddelde ruïsniveau in een boorgat op 200 m wordt geschat op $A_{wa} = 0.063$ mm. Relatie (2) is afgeleid voor ondiepe (2-3 km) bevingen, waarbij een gemiddelde diepte van 2,5 km wordt aangehouden.

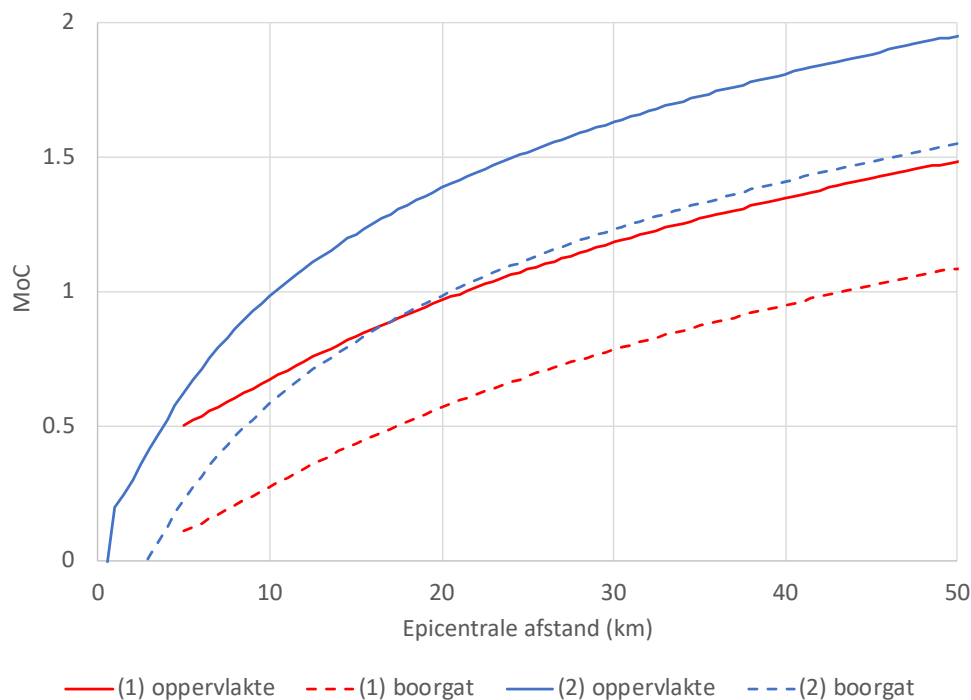
Er zijn nog geen specifieke dempingsrelaties afgeleid voor boorgaten buiten Groningen en voor sensoren aan het oppervlak buiten Limburg. Aan het aardoppervlak worden de opgaande en neergaande golf tegelijkertijd gemeten. Dit leidt tot een verdubbeling van de amplitude ten opzichte van een meting op diepte. Deze verdubbeling wordt het vrije veld effect genoemd. Vooralsnog wordt een correctiefactor voor A_{wa} van 2.5 gebruikt voor de conversie van boorgatruïsniveau naar oppervlakteruïsniveau. Deze factor is een combinatie van het lagere ruïsniveau in een boorgat (ca. 5x lager) en het vrije oppervlakte effect (factor 2).

Of relatie (1) of (2) geldig is, hangt af van de sedimentaire invulling en van de afstand tot de kust. Over het algemeen geldt dat hoe dichter een station bij de kust staat, hoe sterker de achtergrondruis, die veroorzaakt wordt door de interactie van de golven en de kust, gemeten wordt. Voor 2018 is het ruïsniveau van een aantal stations bepaald (Figuur 2-6). Deze figuur is voor een lagere frequentie dan de frequentieband die voor magnitudebepaling gebruikt wordt. De grens tussen noord en zuid is voorlopig bepaald

door de lijn die ongeveer langs stations T061 en OPLO loopt (Figuur 2-6a). Ten noorden van deze lijn wordt relatie (1) toegepast, ten zuiden van deze lijn relatie (2). Relaties (1) en (2) zijn voor verschillende type sensoren (aan oppervlakte of in boorgat) weergegeven in Figuur 2-7.



Figuur 2-6: a. Ligging van stations beschouwd in de bepaling van ruisniveau in 2018. De rode lijn geeft aan waar relatie (1) (ten zuiden van de lijn) en relatie (2) (ten noorden van de lijn) toegepast wordt. b. Ruisniveau over 2018, uitgedrukt als Power Spectral Density (PSD) bij 0,3 Hz als functie van de afstand tot de kust. De cirkels geven de gemiddelde PSD van tweewekelijkse periodes weer, de foutenbalk geeft de band tussen -3σ en $+3\sigma$ weer (99.7% kansregio).



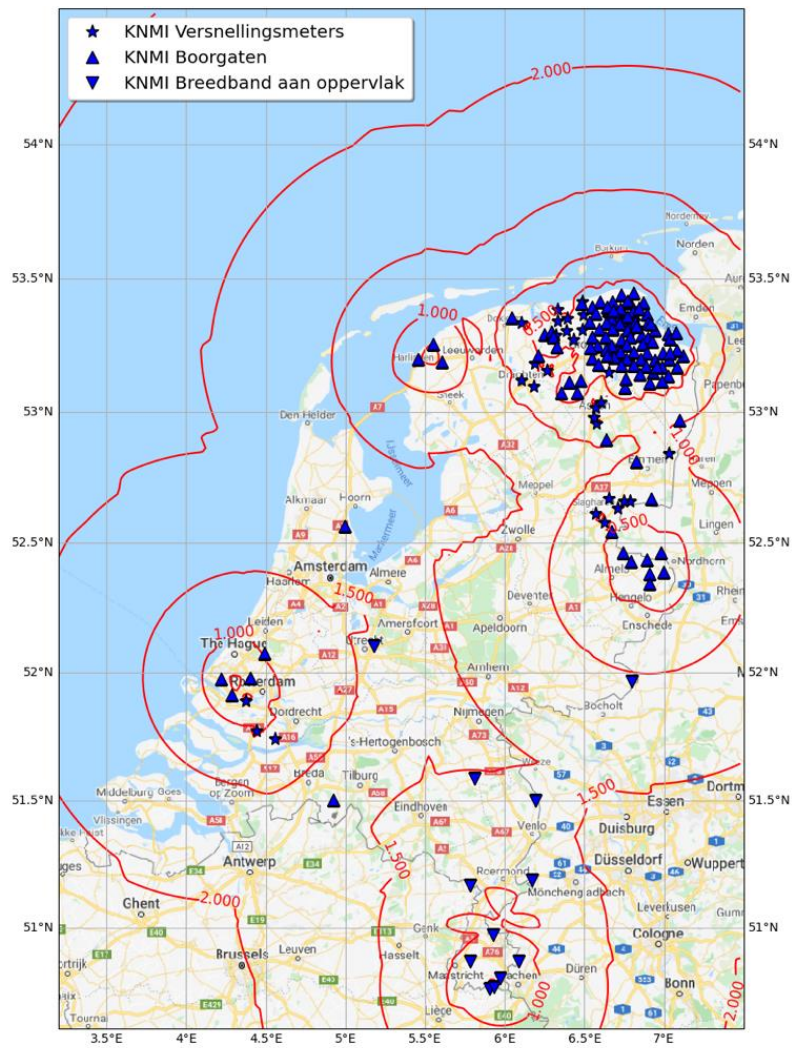
Figuur 2-7: Relaties (1) en (2) uitgaande van de afgeleide en aangenomen ruisniveaus voor verschillende sensoren.

Hoewel de gemiddelde ruisniveaus zijn gebaseerd op enkele metingen, is het van belang om met het huidige, sterk uitgebreide, netwerk de bestaande dempingsrelaties te toetsen en eventueel nieuwe relaties af te leiden. Bovendien is het van belang om locatie-specifieke metingen van ruisniveaus in de waarneemstations te evalueren en te gebruiken in de toekomst.

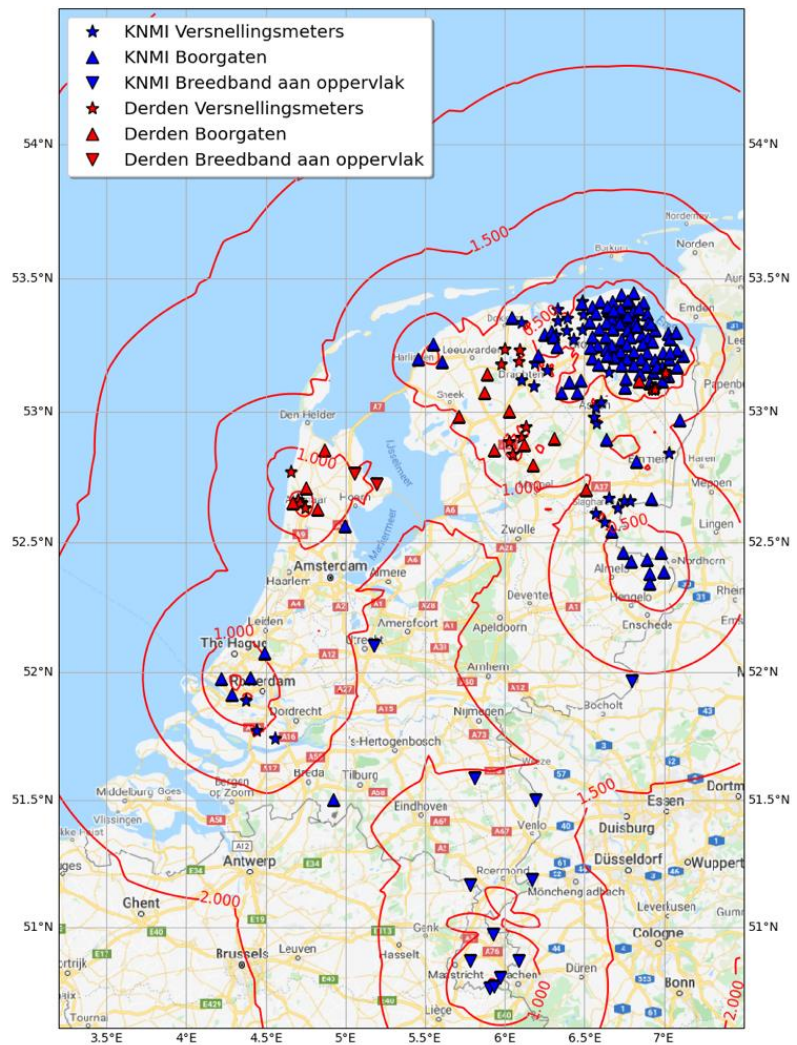
Op basis van de bovenstaande dempingsrelaties en uitgangspunten is de MoC van huidige netwerk bepaald. Dit is gedaan voor de stations die in eigendom zijn bij het KNMI (Figuur 2-8) en voor alle Nederlandse stations die op het KNMI portal binnenkomen (Figuur 2-9). In het laatste geval zijn ook stations meegenomen van bijvoorbeeld operators van kleine gasvelden buiten Groningen.

Voor de stations die in eigendom van het KNMI zijn, is het KNMI verantwoordelijk voor onderhoud en beheer en hebben medewerkers altijd vrije toegang tot de verschillende stations. In andere situaties is dit vaak niet het geval en is het KNMI afhankelijk van derden. Het KNMI kan dan niet altijd garanderen dat een station op tijd onderhouden kan worden of dat een sensor beschikbaar blijft, hetgeen van invloed zal zijn op de MoC en de nauwkeurigheid van de bepaling van de aardbevingslocaties. Het is van belang om goede afspraken te maken met derde partijen over de rollen en verantwoordelijkheden bij onderhoud en beheer om de integratie van beide typen netwerken te kunnen realiseren.

Uitgaande van het KNMI netwerk (Figuur 2-8) kunnen in het hele land aardbevingen met een magnitude van 2,0 en hoger worden geregistreerd. Het zuiden en oosten van het land heeft een MoC van 1,5. Bij het recent aangelegde netwerk in het Westland bedraagt de MoC grotendeels 1,0. Bij het dichte netwerk in Groningen wordt zelfs een MoC van 0,5 gehaald. De dekking in Noord-Holland is afhankelijk van stations van derden (Figuur 2-9). Indien de stations die niet in eigendom zijn van het KNMI wel meegenomen worden, dan bedraagt de MoC in Noord-Holland 1,5 of 1,0. Ook is MoC in Friesland lager indien de sensoren van derden meegenomen worden. In de verdere analyse van dit rapport zijn de stations van derden wel meegenomen, omdat ervan uitgegaan wordt dat het KNMI kan beschikken over de meetdata van deze stations.



Figuur 2-8: MoC van het huidige KNMI netwerk (eigendom).



Figuur 2-9: MoC van het huidige netwerk waarvan het KNMI real-time signalen binnenkrijgt. De rode stations zijn in eigendom van derde partijen zoals operators.

3 Mijnbouwactiviteiten

3.1 Soorten mijnbouwactiviteiten en mogelijke geïnduceerde seismiciteit

In Nederland zijn tot nu toe de meeste geregistreerde geïnduceerde aardbevingen gerelateerd aan de gaswinning. In 1986 is deze activiteit eerst bij kleine gasvelden buiten Groningen opgetreden (Haak, 1993). Sinds 1991 worden bevingen in het Groningen gasveld gelokaliseerd, waarbij de seismiciteit in aantal en kracht is toegenomen met de tijd en met toenemende gasproductie (bijv. Dost et al., 2017). De afnemende gasproductie in de laatste jaren zorgt voor een geleidelijke afname in de seismiciteit. De langzame inklinking van het reservoirgesteente veroorzaakt bij bestaande breuken in de buurt van het reservoir een spanningstoename, zodat de breuken opnieuw geactiveerd kunnen worden.

Meer recent zijn ook geïnduceerde bevingen bij andere vormen van mijnbouwactiviteit waargenomen. Bij de zoutwinning zijn sinds 2017 kleine bevingen geregistreerd in de omgeving van Veendam en Winschoten. Deze bronnen zijn ondiep (< 1500 m) en sterkte van de bevingen is klein ($M < 1,5$). Bewegingen langs ondiepe breuken in de buurt van de zoutvoorkomens en afbrokkelingen van materiaal in cavernes lijken de belangrijkste oorzaken van de bevingen. Cavernes worden ook gebruikt voor de opslag van stoffen

In de omgeving van geothermie operaties in Nederland zijn tot nu toe vooral kleine, niet voelbare bevingen geregistreerd. Uitzondering is een beving in de nabijheid van de geothermie operaties bij Grubbevorst (Venlo), waar in 2018 een beving van $M_L 2,0$ is opgetreden. Het is niet met zekerheid vast te stellen of deze beving direct gerelateerd is aan geothermie ter plaatse, maar dit is wel de meest waarschijnlijke verklaring (Spetzler et al., 2018).

In het algemeen kan verwacht worden dat door de verandering van de temperatuur van het water in de ondergrond spanningen worden opgebouwd, die kunnen leiden tot een beweging langs een bestaande breuk (Buijze et al., 2019). Uit het onderzoek van Ter Heege et al. (2020) komt naar voren dat factoren die het (mogelijk) optreden van geïnduceerde seismiciteit beïnvloeden onder andere de aanwezigheid van natuurlijke seismiciteit, de afstand tot (kritisch gespannen) breuken en het samenspel van de lokale spanningstoestand, populaties van breuken, en stromingsregime in het reservoir zijn. Ook spelen reservoirdiepte en -temperatuur, de samenstelling en stijfheid van het reservoirgesteente, de hydraulische en mechanische (ont-)koppeling met het over- en onderliggende gesteente en interactie met andere activiteiten in de ondergrond zoals (voormalige) gaswinning of zoutwinning een rol. Tevens is het samenspel van operationele factoren zoals stromingssnelheid, injectiedruk, injectietemperatuur relevant.

Ter Heege et al. (2020) stelt verder dat de kans op geïnduceerde seismiciteit die door mensen gevoeld kan worden (potentieel voor voelbare seismiciteit) laag tot gemiddeld is voor projecten die warmte winnen uit de Dinantiën kalksteenreservoirs. Aanvullend hierop is er mogelijk een risico op geïnduceerde bevingen bij (oude) gasvelden ten gevolge van geothermie. Het stimuleren van het reservoir (fracking) kan mogelijk tot seismiciteit leiden. Dit stimuleren van reservoirs is nog niet voorzien, maar speelt mogelijk een rol bij een deel van de diepere geothermie.

Het KNMI voert analyses uit van bevingen die niet evident aan gaswinning zijn gerelateerd. Rapporten over deze 'speciale' events zijn te vinden op <http://publicaties.minienm.nl/>.

3.2 Huidige en toekomstige mijnbouwactiviteiten

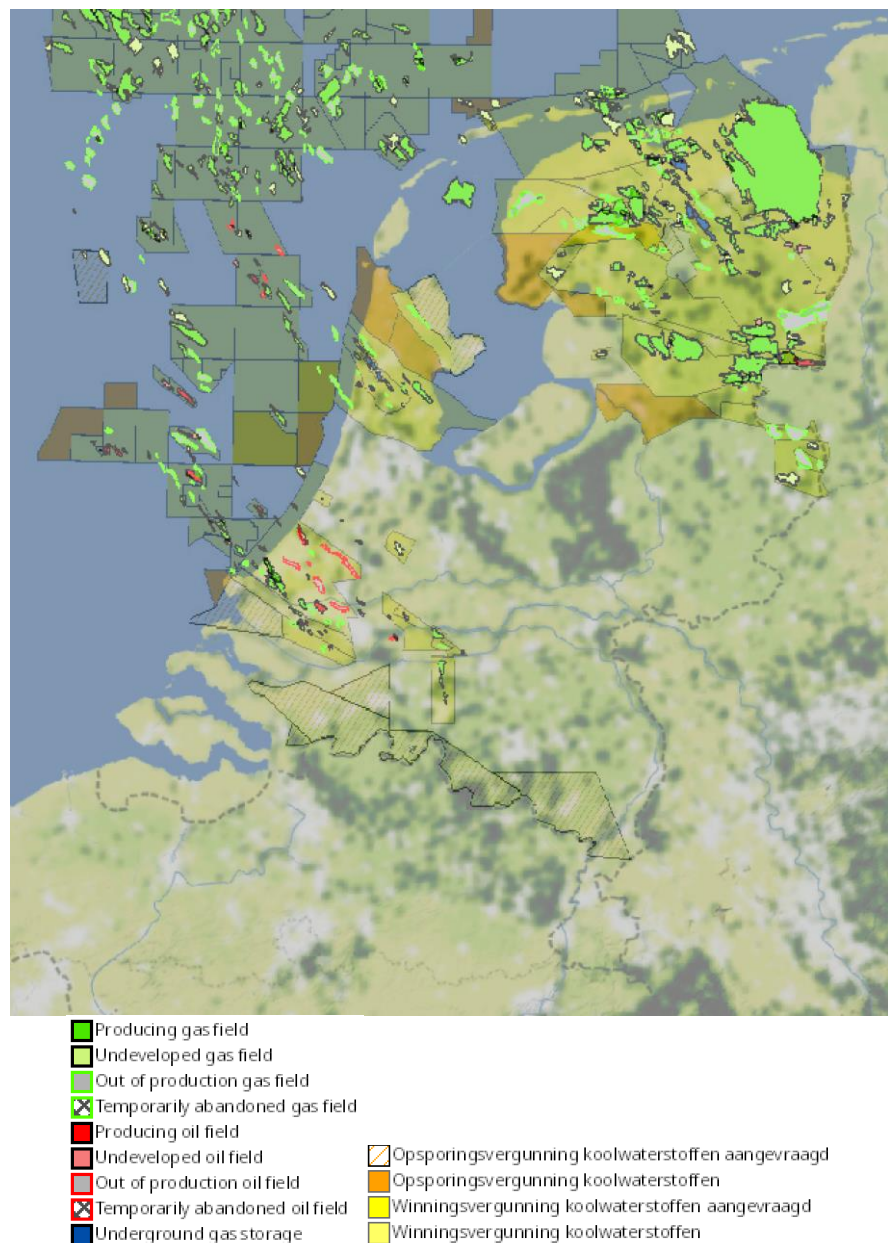
Op nlog.nl is uitgebreide informatie beschikbaar over de verleende en aangevraagde mijnbouwvergunningen. De informatie van nlog.nl is gebruikt bij de inventarisatie van de locaties van mijnbouwactiviteiten in Secties 0 tot en met 0. De peildatum was 20 november 2020. Er is uitgegaan van de verleende en van de aangevraagde vergunningen. Er is geen rekening gehouden met toekomstige vergunningen waarvoor nog geen aanvraag is ingediend. Voor geothermie is tevens gebruik gemaakt van de onlangs afgeronde studie naar de potentie van de ondergrond voor aardwarmte (WARM, 2020). In deze studie is wel enigszins naar de toekomst gekeken. De bijbehorende GIS kaarten zijn via EBN verkregen. De kaartlagen die in de volgende paragrafen zijn weergegeven zijn opgenomen in Tabel 3-1.

Tabel 3-1: Bronnen voor de analyse van de mijnbouwactiviteiten (datum 20 november 2020).

Mijnbouwactiviteit	Kaartlaag	Bron
Olie en gas	GDW_NG_FIELD_UTM	nlog.nl
Olie en gas	GDW_NG_LICENCE_UTM_HYDROCARBONS	nlog.nl
Ondergrondse opslag	GDW_NG_LICENCE_UTM_STORAGE	nlog.nl
Zoutwinning	GDW_NG_LICENCE_UTM_SALT	nlog.nl
Geothermie	GDW_NG_LICENCE_UTM_EARTHHEAT	nlog.nl
Geothermie	Aardwarmte Potentieel Ondergrond Gecombineerd	EBN (WARM studie)
Geothermie	Gecombineerd Onder- en Bovengrond	EBN (WARM studie)

3.2.1 Olie- en gas

De olie- en gasvoorkomens en de bijbehorende vergunningen zijn weergegeven in Figuur 3-1. De onshore olie- en gasvelden bevinden zich voornamelijk in het noorden van het land. In het zuiden zijn wel winningsvergunningen aangevraagd.



Figuur 3-1: Olie- en gasvoorkomens (bron: nlog.nl, datum 20 november 2020).

3.2.2 Ondergrondse opslag

Op verschillende plaatsen vindt ondergrondse opslag van aardgas of stikstof plaats of zijn er plannen om dit te gaan doen. De mogelijkheden voor de ondergrondse opslag van waterstof of koolstofdioxide worden door diverse partijen onderzocht. De nu bekende verleende en aangevraagde vergunningen voor ondergrondse opslag gepubliceerd op nlog.nl zijn weergegeven in Figuur 3-2. Deze activiteiten vinden plaats in Noord-Holland en in het noorden van het land.



Figuur 3-2: Ondergrondse opslag (bron: nlog.nl, datum 20 november 2020).

Afgezien van mogelijke aanpassingen in de vergunningen van bestaande opslaglocaties zijn er enkele plannen voor opslag offshore. De eerste is Porthos, een CO₂-opslag en -transport project in de Haven van Rotterdam van de Gasunie, EBN en Havenbedrijf Rotterdam. Zij willen vanaf 2023 de opslag CO₂ afkomstig van industrie in de Haven van Rotterdam mogelijk maken in lege gasvelden diep in de Noordzeebodem.

De tweede is Athos, voor de kust bij IJmuiden. Dit project is een gezamenlijk initiatief van Gasunie, EBN, Haven Amsterdam en Tata Steel en streeft naar de aanleg van een infrastructuur voor het afvangen en transporteren van CO₂ om het gebruik en de opslag van CO₂ mogelijk te maken. Na een positieve haalbaarheidsstudie in 2019

wordt momenteel onderzoek gedaan naar mogelijke technologieën, routes en scenario's. Het netwerk zal naar verwachting in 2027 operationeel zijn.

Bij het voorgestelde netwerk is geen rekening gehouden met offshore monitoringsstations.

3.2.3 Zoutwinning

De locaties van zoutwinning zijn weergegeven in Figuur 3-3. Zoutwinning vindt voornamelijk in het noorden en oosten van het land plaats.



Figuur 3-3: Zoutwinning (bron: nlog.nl, datum 20 november 2020).

3.2.4 Geothermie

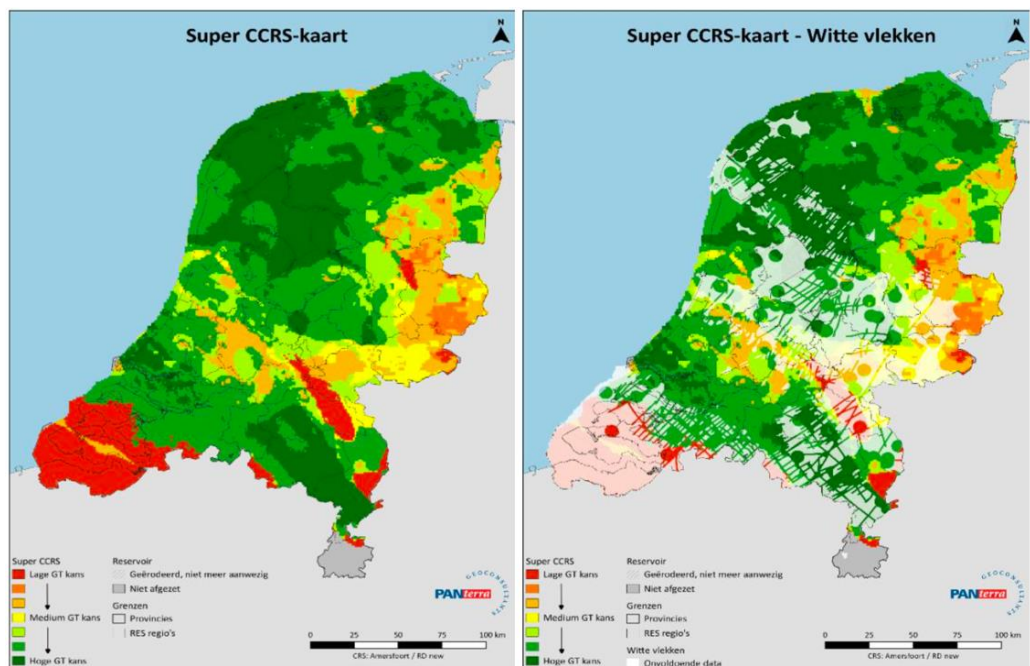
De aangevraagde en verleende opsporings- en winningsvergunningen voor geothermie zijn weergegeven in Figuur 3-4. Dit figuur geeft de stand van zaken weer in december 2020. In opdracht van EBN is in 2020 een studie afgerond naar de potentie van de ondergrond voor geothermie (van Gils et al., 2020) en de combinatie van de bovengrondse vraag naar aardwarmte en de ondergrondse potentie (Schellekens et al., 2020). De potentie van de ondergrond op basis van de huidige stand van kennis van de ondergrond.

Binnen de aangevraagde vergunningen hebben er twee betrekking op UltraDiepe geothermie, namelijk Renkum en GOUD (bij Utrecht). Deze zijn in de kaart van Figuur 3-4 opgenomen. Er zijn in nog drie consortia met een concrete ultradiepe warmtevraag, namelijk Leeuwarden, Rotterdam en Oost-Brabant (Heijnen et al, 2019; EBN online nieuwsbericht 10 september 2020). Deze gebieden zijn nog niet ingetekend op de kaart van Figuur 3-4.



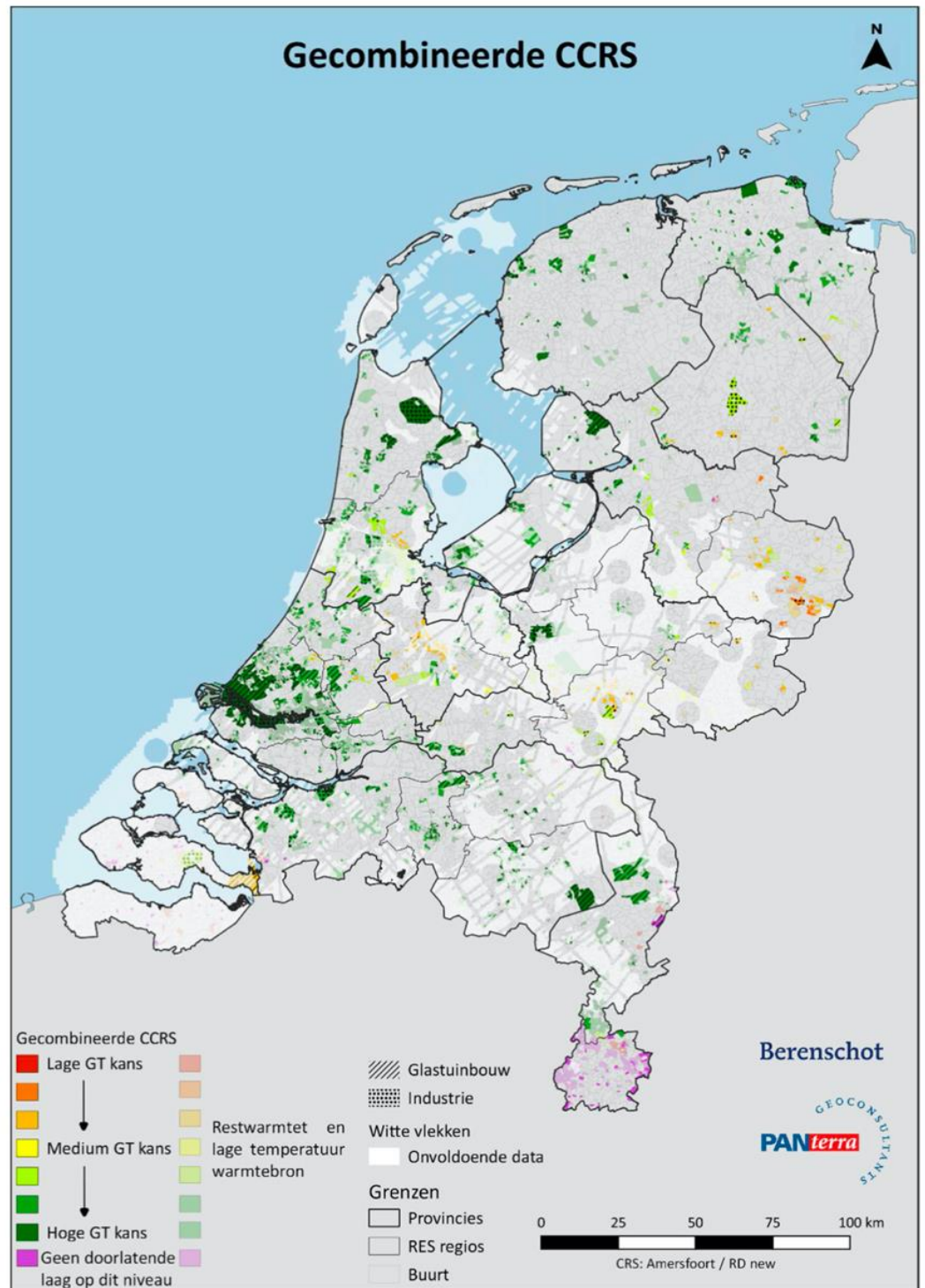
Figuur 3-4: Geothermie (bron: nlog.nl, datum 20 november 2020).

De informatie over de verschillende formaties in de ondergrond in relatie tot geothermie is bijeengebracht in een CCRS (Combined Common Risk Segment) kaart (Figuur 3-5). Deze kaart geeft met een kleurcodering aan wat de potentie van de ondergrond is voor geothermie. Grote delen van Nederland hebben ondergrondse potentie. Een uitzondering hierop is Zeeland en oostelijk Noord-Brabant (rode vlakken). Delen van het oosten en midden van het land hebben een vrij lage potentie (oranje vlakken). Het rechterpaneel geeft aan dat er "witte vlekken" in de gegevens aanwezig zijn. Het SCAN project (<https://scanaardwarmte.nl/>) zal meer inzicht geven in de opbouw van de ondergrond en deze vlekken deels opvullen.



Figuur 3-5: Samengestelde super-CCRS geothermie kansenkaart (links) waarin de geothermische kansen van alle geologische plays zijn samengevoegd (m.u.v. de Dinantien play en de Paleogeen play ondieper dan 500 m). Rechts: witte vlekken in de achterliggende gegevens. Bron: WARM, van Gils et al. (2020).

De potentie van de ondergrond is gecombineerd met de bovengrondse vraag voor aardwarmte voor de bebouwde omgeving, glastuinbouw en industrie. De aannames van deze analyse zijn gegeven in van Schellekens et al. (2020). Deze kaart geeft aan dat wanneer de potentie vanuit de ondergrond gunstig is, er vaak ook potentie is vanuit de bovengrond. Gezien de grote ambitie voor aardwarmte in de energietransitie is te verwachten dat in de toekomst in meer regio's dan de huidige vergunningsgebieden geothermie zal gaan plaatsvinden.



Figuur 3-6: Economische potentie en ondergrondse potentie van aardwarmte in Nederland. De kaart toont de slaagkans van aardwarmteprojecten op buurtniveau voor de gebouwde omgeving (variant 2A en strategie 3), de glastuinbouw en de industrie. Bron: WARM, Schellekens et al. (2020).

4 Eisen aan een monitoringsnetwerk

Het monitoringsnetwerk dient in staat te zijn om elke aardbeving vanaf een gespecificeerde magnitude (MoC) in een gebied te lokaliseren en het epicentrum met een bepaalde nauwkeurigheid aan te geven. Verder dient het robuust en toekomstbestendig te zijn. Aspecten die invloed hebben op de nauwkeurigheid van de bepalingen uit het netwerk zijn de locaties van de sensoren, de onderlinge afstanden, het type sensor, en de snelheidsopbouw van de ondergrond en onze gedetailleerde kennis daarvan. Dit zijn wetenschappelijke achtergronden. Deze worden beschreven in dit hoofdstuk. De eisen aan de nauwkeurigheid van het netwerk hangen samen met de activiteiten in de ondergrond (bijvoorbeeld één of meerdere mijnbouwactiviteiten vlak bij elkaar) en hoe omgegaan wordt met de risico's. Dat zijn beleidskeuzes die niet in dit rapport behandeld worden.

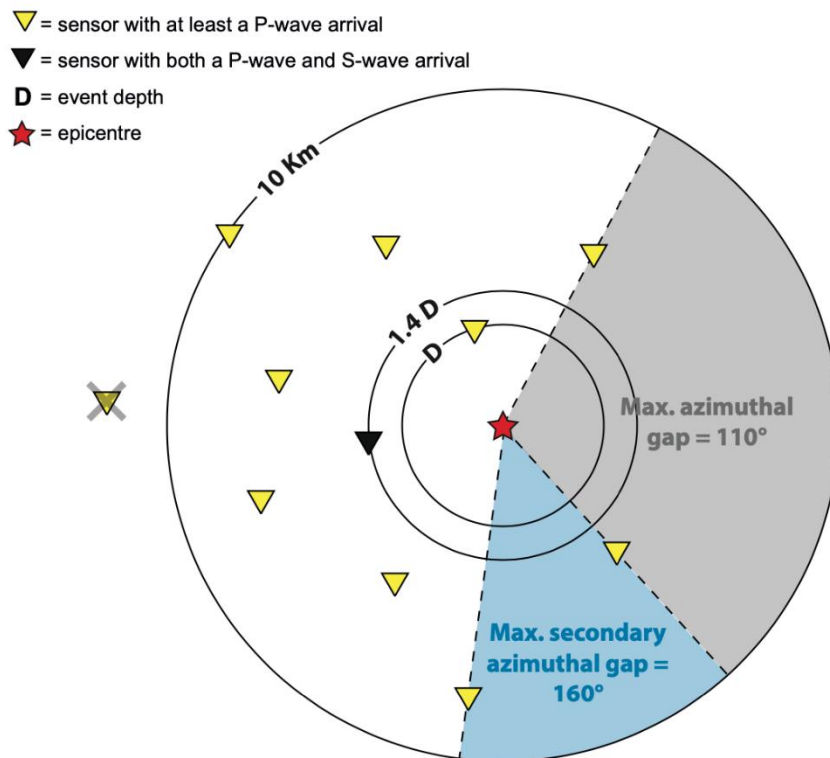
4.1 Magnitude of completeness

De MoC van het uitgebreide monitoringsnetwerk is gebaseerd op het feit dat aardbevingen vanaf een magnitude van 1,5 in Groningen door mensen gevoeld kunnen worden. Een MoC van 1,5 lijkt op basis hiervan een goede keuze te zijn. Bij eventuele seismiciteit die gerelateerd zou zijn aan ondiepe activiteiten zoals geothermie of zoutwinning kunnen aardbevingen minder diep optreden en daarmee kunnen lagere magnitudes gevoeld worden. Bij Winschoten zijn bijvoorbeeld trillingen gevoeld van een beving op een diepte van 0,5-1,5 km met een magnitude van 1,3 (Ruigrok et al., 2018). Het is niet bekend welke minimale magnitude voor ondiepere aardbevingen door mensen gevoeld zou kunnen worden. Er wordt voorlopig uitgegaan van een minimale magnitude van 1,0 ter plaatse van ondiepe mijnbouwactiviteiten.

4.2 Nauwkeurigheid van plaatsbepaling

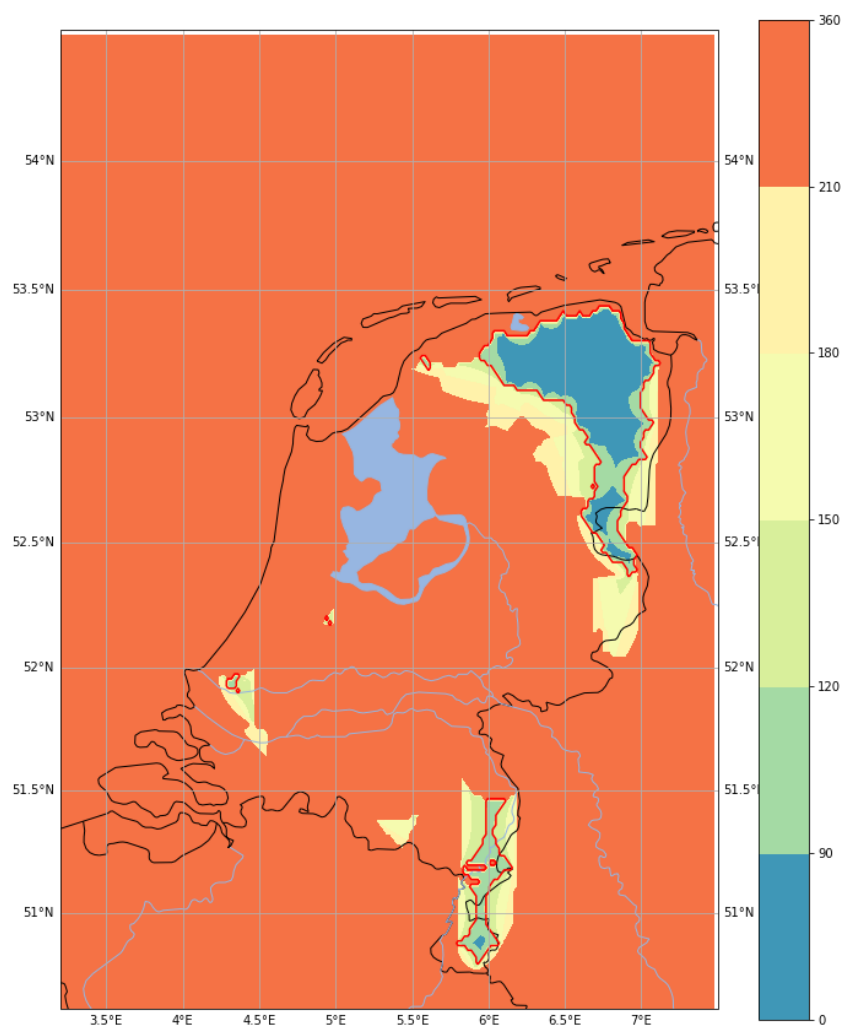
4.2.1 Ruimtelijke dekking (azimut)

De locatie van een aardbeving kan in principe bepaald worden als trillingen op minimaal drie stations vastgesteld kan worden. De locatie bestaat uit het hypocentrum (de bronlocatie op een zekere diepte) en het epicentrum (de projectie hiervan op het aardoppervlak). De nauwkeurigheid van deze plaatsbepaling hangt af van het aantal stations, hun afstand tot de beving, hun ruimtelijke dekking en kennis van de seismische snelheden in de ondergrond. Idealiter wordt de beving vanuit meerdere richtingen waargenomen. Een vuistregel voor een goede ruimtelijke dekking is de beving op minimaal 3 stations (epicentrum) of 4 stations (hypocentrum) is waargenomen en dat de maximale hoek tussen de aardbeving en stations (azimutgat) niet groter dient te zijn dan 120°. NORSAR noemde een iets strengere eis van 110° (NORSAR, 2020). De schematische weergave van de aardbevingslocatie, omliggende stations, de azimut dekking en het azimut gat zijn weergegeven in Figuur 4-1. Het maximale azimutgat is te beschouwen als de grootste taartpunt tussen de stations, met de aardbeving in het midden.

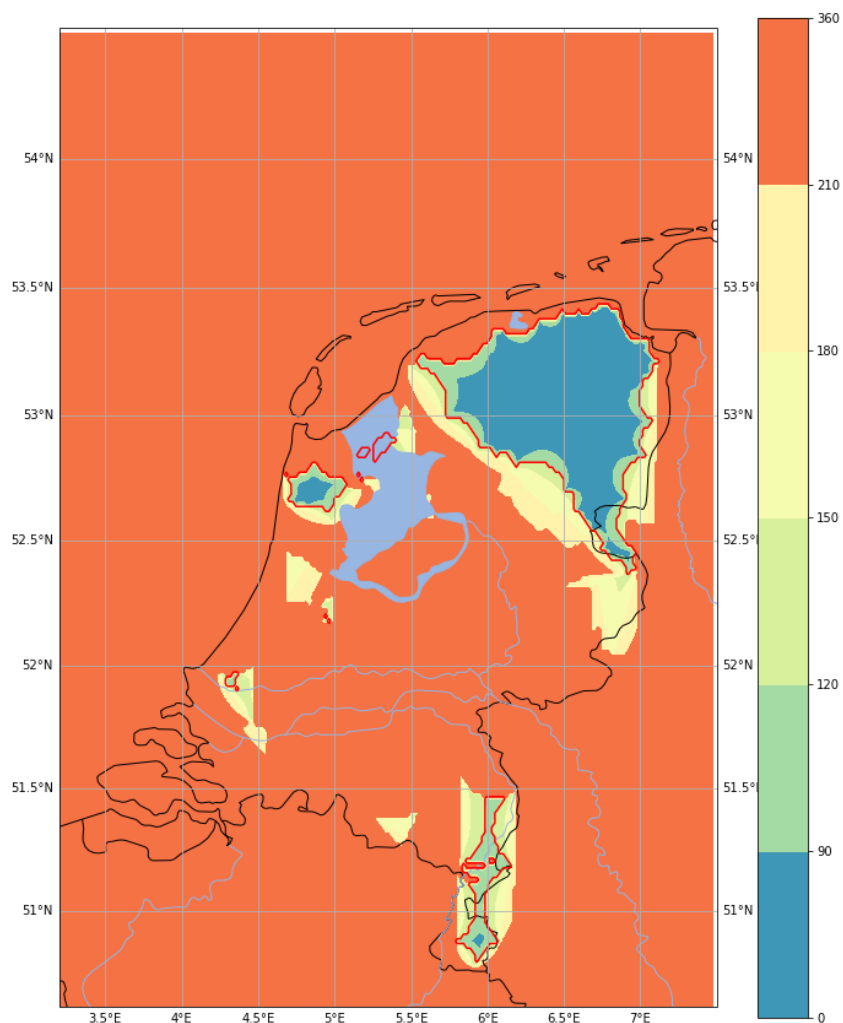


Figuur 4-1: Schematische weergave van de aardbevingslocatie (rode ster), omliggende stations (gele driehoeken), de hoeken tussen de aardbevingslocatie en de stations en het azimuth gat (in de figuur "Max. azimuthal gap"). Figuur van Norsar (2020).

Voor het huidige netwerk van stations is de azimuthdekking berekend. De afstand van de stations die zijn beschouwd, is gerelateerd aan de MoC. Alleen de stations die voldoen aan een bepaalde MoC worden meegenomen in de bepaling van de hoek. Voor een MoC van 2,0 (te detecteren tot op grotere afstand van epicentrum) zijn dat derhalve meer stations dan voor een MoC van 1,0. De azimuthdekking voor het huidige KNMI netwerk is weergegeven in Figuur 4-2 en voor het gehele netwerk in Figuur 4-3.



Figuur 4-2: Maximale azimutgat voor het huidige KNMI netwerk, uitgaande van ten minste 3 stations en een MoC van 1,5. De grens van 120° is weergegeven met de rode lijn.



Figuur 4-3: Maximale azimutgat voor het huidige netwerk (KNMI en derden), uitgaande van ten minste 3 stations en een MoC van 1,5. De grens van 120° is weergegeven met de rode lijn.

De huidige azimutdekking is goed in Groningen en in delen van Friesland. In Noord-Holland is de dekking afhankelijk van de stations van derden. Langs de grens en langs de kust liggen de stations aan één kant, waardoor de dekking daar altijd minder goed is. De azimutdekking langs grens is wel beter dan weergegeven in Figuur 4-2 en Figuur 4-3, omdat er gebruik gemaakt kan worden van Belgische en Duitse stations. Voor deze stations geldt echter net als de Nederlandse stations van derden dat het KNMI geen invloed heeft op de kwaliteit en de beschikbaarheid van de monitoringsgegevens.

4.2.2 Stationsafstand

In het vroegere netwerk rond van het Groningen gasveld (8 boorgaten, sinds 1995 operationeel) was uitgegaan van een stationsafstand van 20 km. Dit bleek onvoldoende te zijn voor een nauwkeurige plaatsbepaling en vormde de aanleiding om het netwerk in Groningen te verdichten tot de huidige dekking in Groningen, met een stationsafstand van 5 tot 10 km. De geschatte onnauwkeurigheid in het epicentrum in het oude netwerk was ongeveer 1 km. Voor de diepte bedroeg de onnauwkeurigheid minstens 2 tot 3 km.

Bij het bepalen van het epicentrum van de beving worden voornamelijk aankomsttijden van de drukgolf gebruikt. De tijdsbepaling van een dergelijke aankomst wordt een 'Ppick' genoemd, waar 'pick' de aanduiding is voor een tijdsbepaling en 'P' staat voor de eerste drukgolf. Met een toenemende afstand tussen bron (aardbeving) en ontvanger (station), neemt de amplitude van het directe golfveld af. Vanaf een bepaalde afstand is de amplitude van P dusdanig gering dat het niet te onderscheiden valt van ruisbronnen nabij de ontvanger. Om te bepalen wat de maximale afstand is waarop P goed te meten is, is een database van Ppicks van geïnduceerde bevingen geanalyseerd. Deze database wordt gedomineerd door bevingen in Groningen. In de database staan 70 bevingen met een magnitude van 1,5. De maximale Ppick afstand voor deze subset bedraagt 31.2 ± 5.0 km. Op basis hiervan wordt een stationsafstand van ten hoogste 30 km beschouwd in het eerste scenario van uitbreiding.

De volgende overweging voor de stationsafstand is gerelateerd aan de bepaling van het hypocentrum. Geïnduceerde en tektonische bevingen kunnen van elkaar onderscheiden worden door de diepte van de aardbeving te bepalen. Voor geïnduceerde bevingen vindt de beving plaats in de buurt van waar het ondergrondse productieproces actief is, bijvoorbeeld bij winning uit een gasveld op ongeveer 3 km diepte. Tektonische bevingen vinden dieper plaats en zijn gerelateerd aan bestaande tektonisch actieve breuken in de ondergrond.

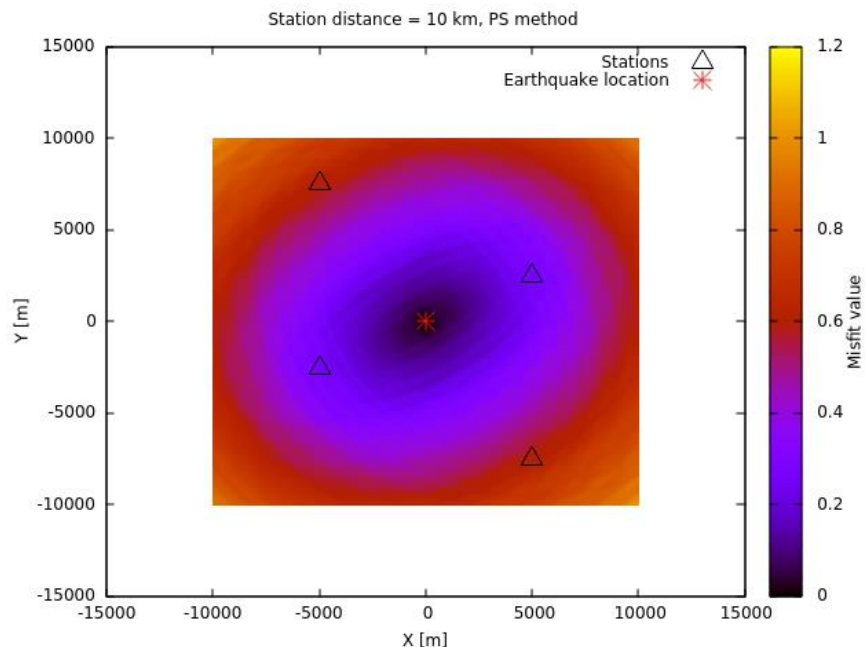
De onzekerheid in de bepaling van het hypocentrum hangt af van de volgende factoren:

1. De nauwkeurigheid van de kennis van de ondergrond
2. De dichtheid van de meetnetwerk
3. De toegepaste hypocentrummethode
4. De onzekerheden in metingen van seismische stations

Het seismische netwerk in Groningen met een geringe stationsafstand en goede kennis van de opbouw en structuur van de ondergrond is een voorbeeld van een situatie waarin het hypocentrum nauwkeurig kan worden bepaald. Aan de andere kant van het spectrum bevinden zich de tektonische bevingen in het zuiden van Nederland. De onzekerheden rondom de diepte van de bevingen is hier groot. Het KNMI, de Koninklijke Sterrenwacht in België en de Bensberg aardbeving netwerk in Duitsland delen stationsgegevens voor bevingen langs de grenzen tussen de drie landen. Het komt vaak voor dat het verschil in brondiepte van tektonische bevingen bepaald door de drie seismische autoriteiten 5 tot 10 km afwijkt.

Wat een optimale station afstand voor een monitoringsnetwerk zou moeten zijn onder de voorwaarde dat het mogelijk is overal in Nederland een geïnduceerde en tektonisch beving van elkaar te kunnen onderscheiden is niet eenvoudig te beantwoorden. Het KNMI heeft simulaties voor verschillende netwerkconfiguraties uitgevoerd. De meest recente kennis van de ondergrond tot 20 km is meegenomen en een hypocentrummethode (finite-difference golf propagatie) met de minste last van methodieken beperkingen is toegepast. Het NORSAR (2020) voorstel voor een grid van versprongen stations is in de simulaties gebruikt. Er zijn simulaties voor verschillende stationsafstanden gedaan.

Over het algemeen laten de simulaties zien dat het epicentrum van een beving goed te bepalen is voor zowel korte als lange stationsafstanden. Een voorbeeld van de onzekerheid rond de bepaling van het epicentrum is weergegeven in Figuur 4-3. Dit figuur toont de misfit, wat het verschil tussen het model en de waarneming is. De meest waarschijnlijke plaats van de aardbeving is daar waar de misfit het kleinste is. Figuur 4-3 laat zien dat de misfit toeneemt naarmate afstand tot het epicentrum



Figuur 4-4: Voorbeeld van plaatsbepaling volgens de standaard PS methode voor een stationsafstand van 10 km. De kleuren geven de misfit weer. Het epicentrum bevindt zich in het minimum van de misfit.

groter wordt. Het epicentrum bevindt zich in het minimum van de misfit (donkerpaarse kleur). Hoe steiler de kom van de misfit is (scherp minimum), hoe nauwkeuriger de plaatsbepaling.

De onzekerheid van de brondiëpte is veel moeilijker in een eenvoudige illustratie te laten zien. Dit is beter te illustreren aan de hand van een voorbeeld. Bij een recente beving in het zuiden van Groningen met een magnitude van 0,6 was het te zien dat de nauwkeurigheid van de meting bij stations onder 5-10 km afstand goed was. Voor afstanden groter dan 10 km was er teveel ruis in de data aanwezig. Deze data konden niet gebruikt worden om het hypocentrum te bepalen.

De onzekerheid in het hypocentrum van een geïnduceerde en van een tektonische beving is sterk afhankelijk van de kennis van de ondergrond, de dichtheid van het meetnetwerk, de hypocentrummethode en de onzekerheid in de meting bij seismische stations. Over het algemeen geldt dat een kleinere afstand tussen de stations meer metingen oplevert, wat de nauwkeurigheid van het hypocentrum ten goede komt.

Op basis van de gecombineerde wens van kleine stationsafstand voor hypocentrum bepaling en een werkbaar aantal stations, is een stationsafstand van 15 km gekozen voor het tweede scenario voor uitbreiding.

4.3 Robuust

De robuustheid van het uitgebreide monitoringsnetwerk komt tot uiting door de gebruikte kwaliteit van de sensoren en door uit te gaan van een zeker overschot aan sensoren. Het theoretische minimum aantal sensoren dat nodig is om een magnitude en epicentrum te bepalen is drie. Het praktische minimum aantal stations in de huidige procedures is zes. De bepaling wordt nauwkeuriger wanneer meer stations in de analyse gebruikt kunnen worden.

Wanneer één of meerdere sensoren tijdelijk uitvallen, dienen aardbevingen toch geregistreerd te kunnen worden. De ervaringen met de instrumenten in het moderne KNMI netwerk (bijvoorbeeld Groningen) leren dat deze sensoren niet veel storingen hebben. Deze stations staan bovendien op goed toegankelijke locaties en zijn uitgerust met een dubbele dataverbinding van DSL en 4G backup. Indien er een storing is, dan is de sensor meestal snel weer online te brengen. Ook de mogelijkheid om op afstand de router/datalogger een herstart te geven (stroom onderbreken) door middel van een sms (via aparte simkaart) helpt hierbij veel. De oudere stations (in het zuiden) bevinden zich op minder toegankelijke locaties, veelal op particulier terrein. De oudere instrumenten hebben vaker storingen en deze zijn minder snel te verhelpen. Ook bestaat het netwerk in het zuiden uit relatief weinig stations. Als er 1 of 2 stations uitvallen, levert dit direct een grotere beperking in de detectiecapaciteit in het netwerk op. Hiermee dient rekening gehouden te worden in verband met de robuustheid van het netwerk.

Als een boorgatgeofon echt defect is, dan is deze niet te vervangen, omdat deze zit ingegoten in het boorgat. Er kan dan wel gebruik worden gemaakt van het signaal dat geregistreerd wordt op een andere diepte in hetzelfde boorgat. Boorgatstations hebben vanwege hun ontwerp dus een zekere mate van overcapaciteit.

Bij de aanleg van nieuwe stations is het aan te raden om uit te gaan van manier installeren zoals ze in Groningen zijn aangelegd, namelijk goed bereikbaar en stand-alone. Indien ook uitgegaan wordt van boorgatstations, is niet veel overcapaciteit nodig.

Een ander aspect aan robuustheid betreft het eigendom van de stations. Het KNMI is verantwoordelijk voor de kwaliteit en beschikbaarheid van de eigen stations. Voor stations in eigendom van derden kan het KNMI momenteel niet garant staan voor de kwaliteit en beschikbaarheid. Voordat deze stations in het netwerk opgenomen kunnen worden, dienen de kwaliteit en beschikbaarheid van de data voor het KNMI geborgd te worden.

4.4 Toekomstbestendig

Om te zorgen dat het uitgebreide monitoringsnetwerk toekomstbestendig is, is uitgegaan van de bekende gasvelden (§3.2.1), zoutvoorkomens (§3.2.3) en van de huidige en aangevraagde vergunningen op het gebied van geothermie (§3.2.4). Voor geothermie zijn er twee scenario's beschouwd: uitgaande van de huidige vergunningen en uitgaande van de gecombineerde ondergrondse en bovengrondse potentie (WARM, 2020). Voor ondergrondse opslag is alleen rekening gehouden met de huidige locaties (§3.2.2).

4.5 Basis en verdichting

Boven op de basis zijn plaatselijke verdichtingen van het netwerk aan te raden, bijvoorbeeld bij specifieke mijnbouwactiviteiten. Een reden voor een lokale verdichting kan het omlaag brengen van de minimaal te detecteren magnitude zijn, als dit in de winningsvergunning vereist is. Een andere reden voor een plaatselijke verdichting van het netwerk is een nauwkeurigere plaatsbepaling van het epicentrum of hypocentrum. Zeker in gebieden waar zowel natuurlijke als mogelijk geïnduceerde aardbevingen voor zouden kunnen komen, is het belangrijk om onderscheid te kunnen maken tussen de verschillende bronnen van een aardbeving. Een nauwkeurige locatiebepaling is daarvoor belangrijk.

4.6 Sensoren

Het ruisniveau van een station hangt samen met de plaatsing aan ofwel oppervlak of in een boorgat en met de bodemopbouw, de afstand tot de kust en de nabijheid van antropogene ruisbronnen zoals snelwegen, windturbines en fabrieken (Lecocq et al., 2020), een belangrijke rol. Tevens levert een homogeen netwerk beter vergelijkbare data tussen stations op. Op basis van de huidige dempingsrelaties en waarnemingen wordt bij de uitbreiding van het netwerk aangeraden om ten zuidoosten van de lijn in Figuur 2-6 oppervlaktesensoren (versnellingsmeters) aan te leggen en zo veel mogelijk het centrale deel van de Roerdalslenk waar een dikke sedimentlaag aanwezig is, te vermijden. In de rest van het land voldoen verticale boorgatstations zoals deze in Groningen zijn aangelegd beter. Hierbij zijn gefoons op aangelegd op 50, 100, 150 en 200 m diepte en is een versnellingsmeter aan de oppervlakte geplaatst.

5 Voorstel uitbreiding monitoringsnetwerk

5.1 Uitgangspunten m.b.t. magnitude, stationsafstand en type sensor

De minimaal door mensen gevoelde magnitude van aardbevingen bedraagt ongeveer 1,5 in Groningen. Bij ondiepere bevingen, bijvoorbeeld mogelijk bij zoutwinning of geothermie, worden bevingen met een lagere magnitude door mensen gevoeld. Er zijn daarom twee scenario's uitgewerkt:

- 1) Een MoC van 1,5. Uitgaande van de dempingsrelaties (1) en (2) bedraagt de bijbehorende stationsafstand ongeveer 45 km. Deze afstand is echter te groot voor een goede plaatsbepaling. Er wordt in dit scenario dan ook uitgegaan van een stationsafstand van 30 km.
- 2) Een MoC van 1,0. Hierbij is uitgegaan van de stationsafstand van 15 km.

Als type sensor voor de uitbreiding worden versnellingsmeters aan het oppervlak aanbevolen in Limburg, oostelijk Noord-Brabant en oostelijk Gelderland (Figuur 2-6) en boorgatstations in de rest van Nederland.

5.2 Uitbreidingsmogelijkheden

Er zijn mengvormen van de in §5.1 genoemde scenario's mogelijk, waarbij er ter plaatse van mijnbouwactiviteiten een verdichting van het netwerk wordt aangebracht. Ook kan de uitbreiding van het netwerk gefaseerd worden uitgevoerd.

5.2.1 *Reeds gepland*

Een aantal stations is reeds gepland en wordt binnenkort (2021-22) gerealiseerd. Dit zijn twee stations in Zuid-Holland en een aantal stations in Friesland. Tevens worden in Limburg een aantal boorgaten, waarschijnlijk drie, geplaatst in het kader van de Einstein telescoop. Een aantal van deze boorgaten zal worden voorzien worden van breedbandsensoren op een diepte van ca. 250 m. Het monitoringsplan voor de Einstein telescoop is nog in ontwikkeling. De door het KNMI te installeren sensoren zullen op termijn (ca. 2022) aan het netwerk toegevoegd worden.

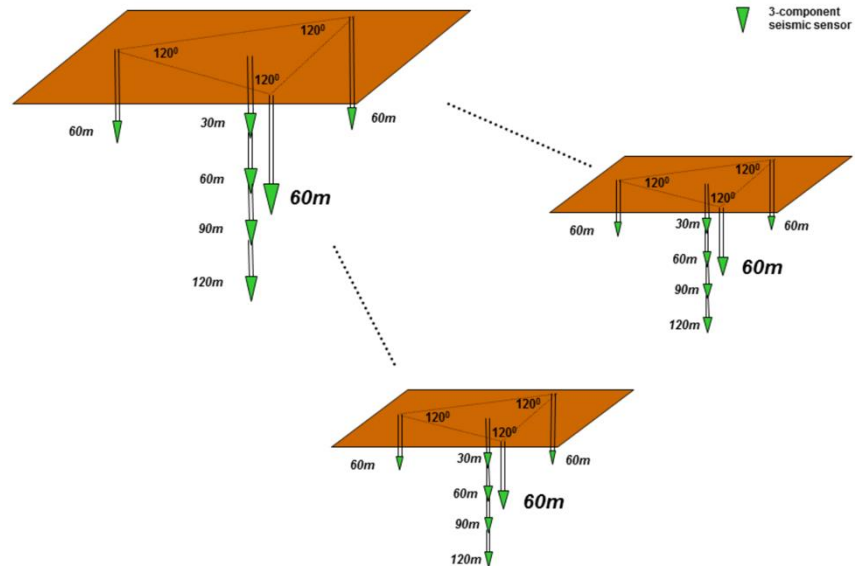
5.2.2 *Stations van andere partijen*

Een aantal stations met name in Noord-Holland en Friesland zijn niet in eigendom van het KNMI. Het KMMI draagt derhalve geen verantwoordelijkheid voor de kwaliteit en beschikbaarheid van de data. Deze stations kunnen wel gebruikt worden voor een verbeterde dekking. De beschikbaarheid en kwaliteit van de data van deze stations dienen daarvoor op korte termijn geborgd te worden voor het KNMI.

5.2.3 *Upgrade van reeds bestaande stations*

In het noorden van het land zijn een aantal seismische arrays van de Low-Frequency Array radiotelescoop LOFAR netwerk aanwezig. Deze zijn aangelegd in 2009-2010 (LOFAR, 2012). Deze seismische arrays bestaan uit een verticaal boorgat tot 120 m diepte met geofoons op 30, 60, 90 en 120 m en driehoekig array van geofoons op 60 m diepte (Figuur 5-1). Na experimenten door de TU Delft zijn een aantal van deze stations rond 2018 overgedragen aan KNMI. De stations beschikten echter over een oude datalogger, waardoor ze niet direct bruikbaar zijn voor aardbevingsdetectie. Twee van de LOFAR stations zijn inmiddels voorzien van moderne dataloggers en

opgenomen in het KNMI netwerk. Indien zes bestaande LOFAR stations worden voorzien van een moderne datalogger (voor locaties zie Figuur 5-2), dan kunnen ze worden opgenomen in het uitgebreide netwerk. In de volgende analyse van de uitbreiding is hiervan uitgegaan.



Figuur 5-1: Configuratie van LOFAR stations (drie getoond). Bron: LOFAR (2012).

5.2.4 Nieuw te plannen stations

Bij de nieuwe te plannen stations is uitgegaan van twee scenario's van MoC en stationsafstanden, namelijk:

1. MoC van 1,5 en een stationsafstand van 30 km.
2. MoC van 1,0 en een stationsafstand van 15 km.

Hier bovenop is ook uitgegaan van:

- a. Gegevens uit nlog.nl over vergunningen voor mijnbouwactiviteiten
- b. Enige blik op de toekomst met betrekking tot geothermie door de resultaten van WARM (2020) mee te nemen.

Dit levert 4 mogelijke uitbreidingen van het netwerk op. Er zijn ook mengvormen tussen deze scenario's mogelijk en de uitbreidingen kunnen gefaseerd worden aangelegd. Er is steeds uitgegaan van het huidige netwerk van het KNMI en van derden en de reeds bekende stations die op korte termijn gerealiseerd gaan worden (Figuur 2-9) en een upgrade van de LOFAR stations (§5.2.3). Voor de opvulling van de gaten in het huidige netwerk wordt gebruik gemaakt van de aanbeveling van NORSAR (2020) om in plaats van een vierkant grid te kiezen voor een grid waarbij om en om een rij stations versprongen is. De locaties van stations voor verschillende keuzes voor uitbreiding zijn weergegeven in Figuur 5-3 voor een stationsafstand van 30 km en in Figuur 5-3 voor een stationsafstand van 15 km. De MoC en azimutdekking van het uitgebreide netwerk voor de verschillende opties zijn weergegeven in bijlage A.

Het verschil tussen opties a en b levert in het gebied rond Deventer en Apeldoorn geen of wel dekking op. Volgens nlog.nl zijn er geen vergunningen voor mijnbouwactiviteiten in deze regio, maar volgens WARM (2020) is er wel potentie voor geothermie. In de toekomst zijn er derhalve wel vergunningen te verwachten. De dekking in Zeeland is tot een hogere MoC dan in de rest van het land, omdat daar

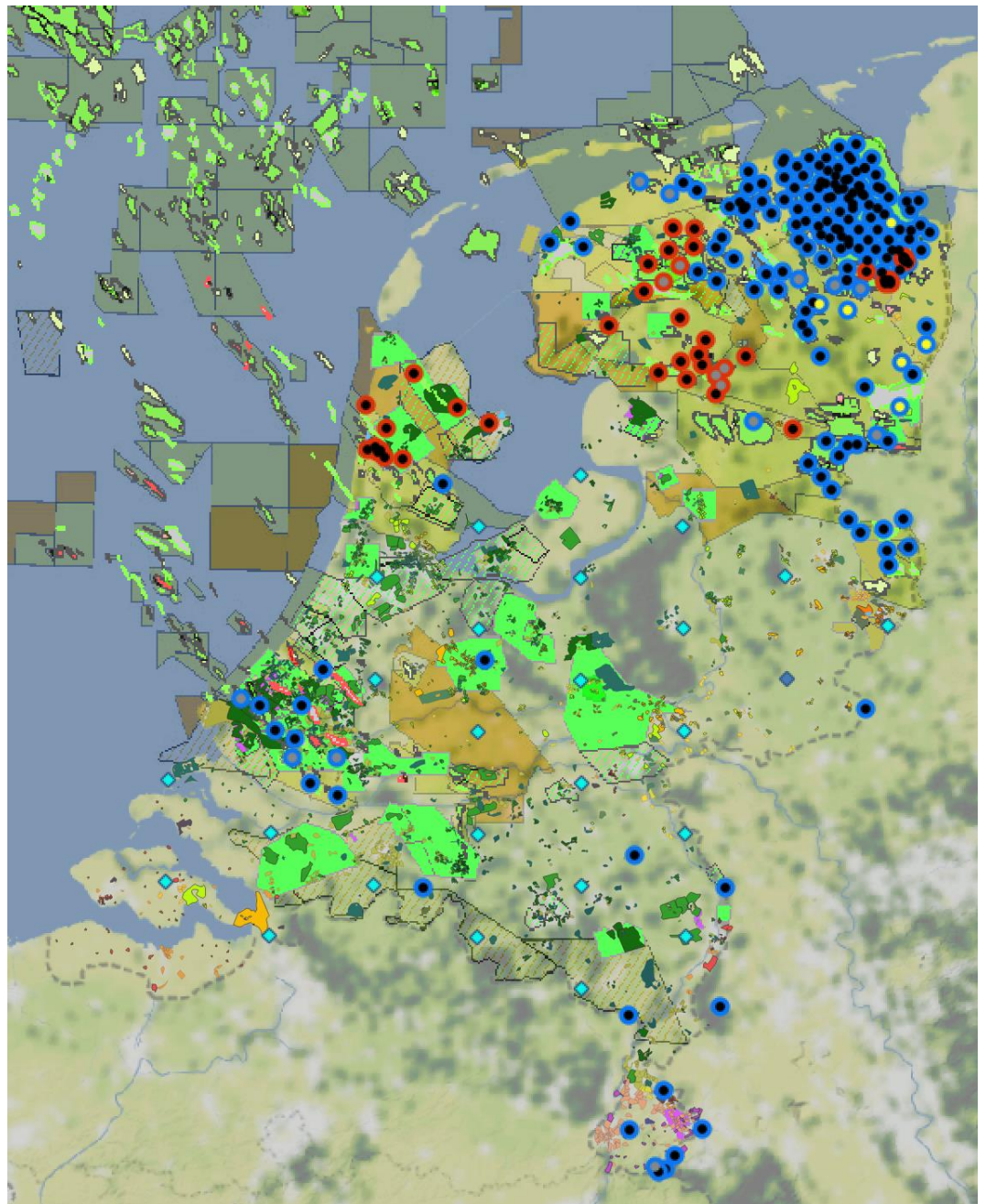
geen vergunningen zijn volgens nlog.nl en er geen potentie voor geothermie aanwezig is vanwege de opbouw van de ondergrond (WARM, 2020). De azimutdekking langs de zuid- en zuidoostgrens kan verbeterd worden door gebruik te maken van de netwerken van de Belgische en Duitse meetstations. Langs de kust zou de dekking verbeterd kunnen worden door gebruik te maken van offshore stations.

De aantallen stations voor de verschillende opties zijn samengevat in Tabel 5-1. De aantallen voor de uitbreiding zijn op de onderste regels opgenomen. Hierbij zijn een aantal stations in het zuiden opgenomen in verband met de robuustheid van het netwerk voor de monitoring natuurlijke seismiciteit. De genoemde getallen zijn indicatief. Er is nog geen optimalisatie van de werkelijk te kiezen locatie gedaan.

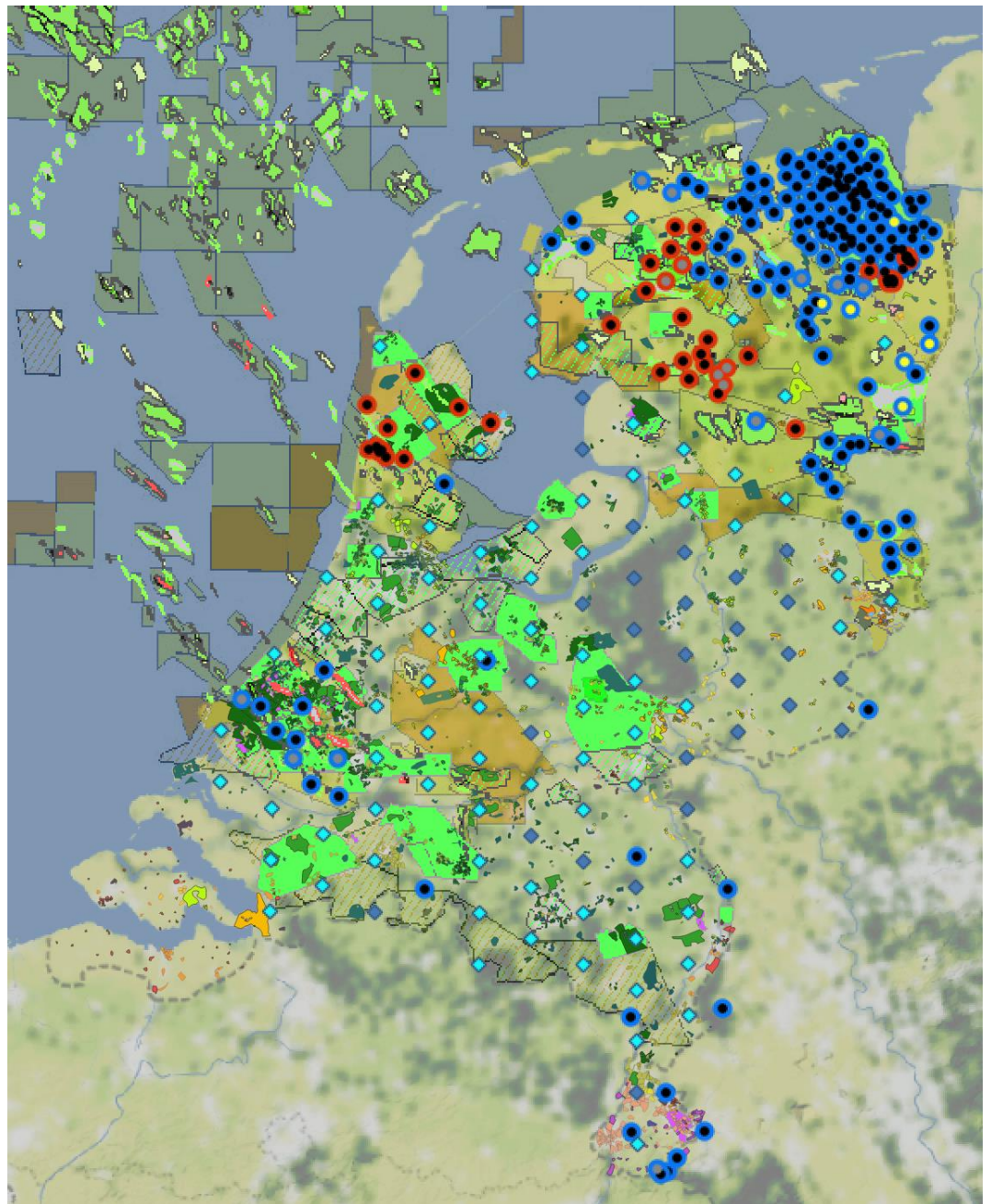
Afhankelijk van de keuze van het scenario bedraagt het aantal stations van de uitbreiding circa 30 tot 115 stations.

Tabel 5-1: Aantallen stations voor het uitgebreide netwerk met per optie de nog te installeren aantallen stations.

Eigenaar / aannname uitbreiding	Status	Aantal stations	Totaal	Waarvan aan oppervlakte	In boorgaten
KNMI	huidig	160		42	118
KNMI	gepland	11		8	3
derden	huidig	41		25	16
derden	gepland	5		5	0
			217	80	137
uitbreiding nlog 15 km stationsafstand (1a)	uitbreiding	87		18	69
			304	98	206
extra voor WARM (1b)	uitbreiding	27		8	19
			331	106	225
uitbreiding nlog 30 km stationsafstand (2a)	uitbreiding	30		10	20
			247	90	157
extra voor WARM (2b)	uitbreiding	1		1	0
			248	91	157



Figuur 5-2: Uitbreiding van netwerk voor scenario 1 met een MoC van 1,5 en stationsafstand van 30 km. Alle vergunningen (nlog), bestaande en geplande stations (KNMI en derden) en de WARM (2020) locaties uit de gecombineerde ondergrond/bovengrond potentie zijn aangegeven. De bestaande (zwarte stipje) en zeer binnenkort te realiseren stations (grijze stipje) zijn weergegeven op grote stippen die de eigenaar van het station aangeven (blauw = KNMI, rood = derden). De uitbreiding van het netwerk bestaat uit gele stippen (LOFAR), de opvulling ter plaatse van vergunningen (cyaan ruiten) en aanvullende opvulling om ook WARM gebieden te dekken (blauwe ruiten).



Figuur 5-3: Uitbreiding van netwerk voor scenario 2 met een MoC van 1,0 en stationsafstand van 15 km. Alle vergunningen (nlog), bestaande en geplande stations (KNMI en derden) en de WARM (2020) locaties uit de gecombineerde ondergrond/bovengrond potentie zijn aangegeven. De bestaande (zwarte stipje) en zeer binnenkort te realiseren stations (grijze stipje) zijn weergegeven op grote stippen die de eigenaar van het station aangeven (blauw = KNMI, rood = derden). De uitbreiding van het netwerk bestaat uit gele stippen (LOFAR), de opvulling ter plaatse van vergunningen (cyaan ruiten) en aanvullende opvulling om ook WARM gebieden te dekken (blauwe ruiten).

6 Conclusies en aanbevelingen

In de Motie voorgesteld op 11 maart 2020 wordt verzocht om een fijnmazig netwerk voor de monitoring van aardbevingen bij mijnbouwactiviteiten met als doel de ongerustheid bij burgers die in de omgeving van een mijnbouwlocatie wonen weg te nemen. Ter voorbereiding op een reactie op deze motie heeft het Ministerie van EZK het KNMI verzocht om het seismische monitoringsnetwerk te evalueren. De gegevens van het monitoringsnetwerk worden tevens gebruikt om schadecontouren van aardbevingen te bepalen voor de Commissie Mijnbouwschade. Het huidige meetnetwerk is beschouwd en er is door het KNMI een voorstel gedaan voor de uitbreiding van het netwerk voor de monitoring van aan nieuwe mijnbouwactiviteiten gerelateerde geïnduceerde seismiciteit.

Het huidige netwerk, bestaande uit sensoren van het KNMI en derden (o.a. operators), is passend voor de huidige mijnbouwactiviteiten waarvan de seismische monitoring in de winningsvergunningen is vastgelegd. De *Magnitude of Completeness* (MoC) is de minimale magnitude van een aardbeving die geregistreerd en gelokaliseerd kan worden. Het huidige netwerk heeft een MoC van 2,0 voor het gehele land en van 1,5 voor grote delen. Plaatselijk bij verdichtingen van het netwerk zijn er lagere waarden voor MoC: 1,0 in delen van Friesland, Drenthe, Noord-Holland, Zuid-Holland en Limburg en 0,5 in Groningen.

Het uitgebreide netwerk dient toekomstbestendig en robuust te zijn. Voor de toekomstbestendigheid is uitgegaan van de locaties van vergunningen voor mijnbouwactiviteiten van nlog.nl voor olie- en gasextractie, ondergrondse opslag, zoutwinning en geothermie. Tevens zijn de resultaten van de recente WARM studie van EBN (2020) met de potentie voor geothermie meegenomen in de analyse. Voor de robuustheid van het netwerk is uitgegaan van boorgatstations in het grootste deel van het land en versnellingsmeters aan het aardoppervlak in met name het zuiden van het land. Alle stations die real-time data leveren aan het KNMI zijn in de analyse meegenomen. Het KNMI draagt echter geen verantwoordelijkheid voor de kwaliteit en de beschikbaarheid van de monitoringsgegevens van het deel van het netwerk dat in eigendom is van derden. Om de huidige stations van derden in het netwerk op te nemen, dienen de beschikbaarheid en kwaliteit van de data op korte termijn geborgd te worden voor het KNMI. Dit geldt tevens voor mogelijk toekomstige stations van derden.

Op basis van de gegevens uit nlog.nl en WARM zijn er twee scenario's voor de uitbreiding van het netwerk uitgewerkt, namelijk:

1. Een MoC van 1,5 met een stationsafstand van 30 km, gebaseerd op de waarneming dat in Groningen aardbevingen vanaf een magnitude van ongeveer 1,5 door mensen gevoeld worden.
2. Een MoC van 1,0 met een stationsafstand van 15 km, gebaseerd op het feit dat aardbevingen gerelateerd aan ondiepere activiteiten dan gaswinning (op 3 km) al bij een lagere magnitude gevoeld kunnen worden.

Er zijn ook mengvormen tussen deze scenario's mogelijk en de uitbreidingen kunnen gefaseerd worden aangelegd. Afhankelijk van de keuze van het scenario bedraagt het aantal stations van de uitbreiding circa 30 tot 115 stations. Behalve de MoC is ook de nauwkeurigheid waarmee bevingslocaties kunnen worden bepaald van belang. Een eerste studie laat zien dat de nauwkeurigheid in de diepte voor een stationsafstand van 15 km significant beter is dan bij 30 km afstand. Om deze reden wordt een stationsafstand van 15 km aanbevolen voor het uitgebreide netwerk.

Om de nieuwe data uit het uitgebreide netwerk zo goed mogelijk te benutten zijn er een aantal wetenschappelijke onderzoeken nodig, onder andere:

- Het opstellen van een ruisniveaumodel met dempingsrelaties voor heel Nederland, voor verschillende sensoren.
- Het bepalen van de onzekerheid in epicentrum- en hypocentrumlocatie voor verschillende netwerkconfiguraties.
- Het samenstellen en waar nodig ontwikkelen van een 3D snelheidsmodel voor de ondergrond ten behoeve van locatiebepaling van hypocentra.

Referenties

Dost, B. & Haak, H. (2002). A comprehensive description of the KNMI seismological instrumentation. KNMI rapport TR-245. Beschikbaar via: <http://publicaties.minienm.nl/documenten/a-comprehensive-description-of-the-knmi-seismological-instrument>

Dost, B., Goutbeek, F., van Eck, T. & Kraaijpoel, D. (2012). Monitoring induced seismicity in the North of the Netherlands: status report 2010. KNMI rapport WR 2012-03. Beschikbaar via: <http://publicaties.minienm.nl/documenten/monitoring-induced-seismicity-in-the-north-of-the-netherlands-st>

Dost, B., Ruigrok, E., & Spetzler, J. (2017). Development of seismicity and probabilistic hazard assessment for the Groningen gas field. *Netherlands Journal of Geosciences*, **96(5)**, s235-s245. <https://doi.org/10.1017/njg.2017.20>

EBN online nieuwsbericht, <https://www.ebn.nl/nieuws/update-uit-het-programma-ultradiepe-geothermie/>. Geraadpleegd op 10 december 2020.

van Gils, H., de Jager, J., Vinci, F. (2020) De mogelijkheden en potentie om aardwarmte op te schalen vanuit een ondergrond perspectief. Rapportage Berenschot en Panterra in het kader van WARM. Beschikbaar via <https://kennisbank.ebn.nl/rapport-ondergrondse-potentie-van-aardwarmte/>

Haak, H. (Ed.) (1993). Summary of the final report on a multidisciplinary study of the relation between Gas production and earthquakes in the northern part of the Netherlands, p. 16, Royal Netherlands Meteorological Institute (de Bilt), ISBN 90-369-2052-3.

Heijnen, L., Jaarsma, B., Veldkamp, H., Schavemaker, Y (2019) Ultra Deep Geothermal program in the Netherlands. European Geothermal Congress 2019, Den Haag, 11-14 juni 2019. Beschikbaar via: <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/382.pdf>

Lecocq, T. et al. (2020) "Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures." *Science* **369** (6509): 1338-1343. DOI: 10.1126/science.abd2438

LOFAR (2012). Specifications Seismic System as part of the LOFAR Project. Rapport GeoLOFAR-004 (concept, versie 5 d.d. mei 2012).

Motie (2020) Motie van de leden Agnes Mulder en Sienot over onafhankelijke metingen in de omgeving van mijnbouwlocaties, Kamerstuk kst-33529-733. Beschikbaar via <https://zoek.officiëlebezoekingen.nl/kst-33529-733>

nlog.nl: <https://www.nlog.nl/bestanden-interactieve-kaart> geraadpleegd op 20 november 2020

NORSAR (2020) Assessing data collection methods for the purpose of GMPE calculations at Groningen, KEM 11 Phase 2A.

Reamer, S.K., and K-G. Hinzen (2004) An Earthquake catalog for the Northern Rhine area, central Europe (1975-2002), *Seismological Research Letters* **75**, 713-725.

Ruigrok, E., Spetzler, J., Dost, B., Evers, L. (2018). Winschoten events, 19-11-2017. KNMI rapport TR-368. Beschikbaar via: <http://publicaties.minienm.nl/documenten/winschoten-events-19-11-2017>

Ruigrok, E. & Dost, B. (2019). Seismic Monitoring and Site-Characterization with Near-Surface Vertical Arrays, In: *Conference Proceedings, 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.

Schellekens, J., Verbeek, W., van Gils, H., den Ouden, B (2020) Een studie naar de potentie van aardwarmte als duurzame warmtebron voor de gebouwde omgeving, glastuinbouw en industrie. Rapportage Berenschot en Panterra in het kader van WARM. Beschikbaar via <https://kennisbank.ebn.nl/eindrapport-warm/>

Spetzler, J., & Dost, B. (2017). Hypocentre estimation of induced earthquakes in Groningen. *Geophysical Journal International*, **209(1)**, 453-465. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx020>

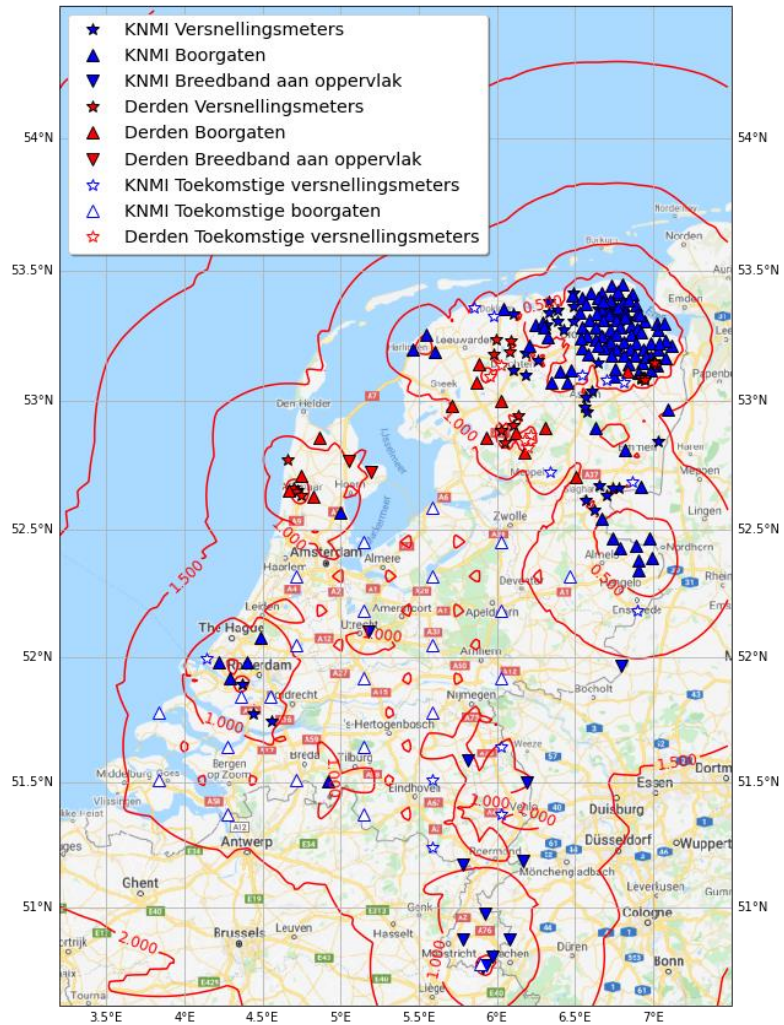
Spetzler, J., Ruigrok, E., Dost, B. Evers, L. (2018) Hypocenter Estimation of Detected Event near Venlo on September 3rd 2018. KNMI rapport TR369. Beschikbaar via: <http://publicaties.minienm.nl/documenten/hypocenter-estimation-of-detected-event-near-venlo-on-september-3rd-2018>

Tcbb (2018). Representatieve nulmeting aan gebouwen. Brief van de Technische commissie bodembeweging aan de Minister van Economische Zaken en Klimaat, kenmerk Tcbb 18236399 d.d. 6 september 2018.

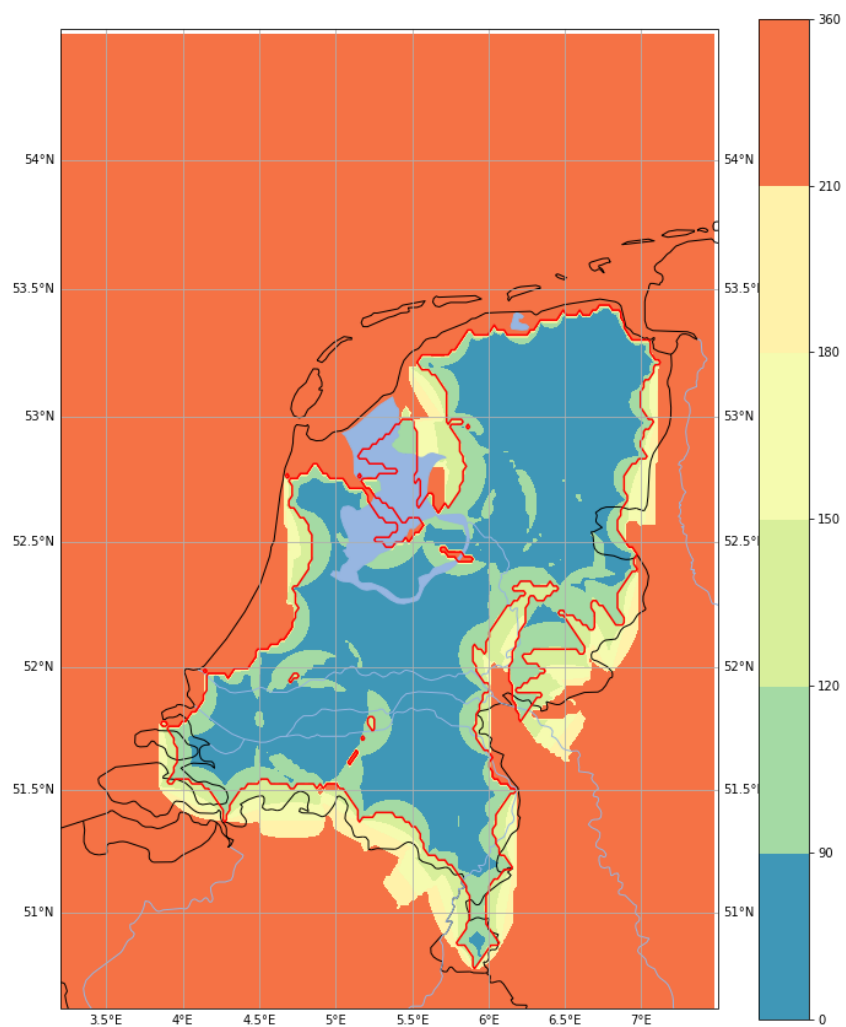
Bijlage A: Kaarten met MoC en azimutdekking voor verschillende uitbreidingsscenario's

Scenario's:

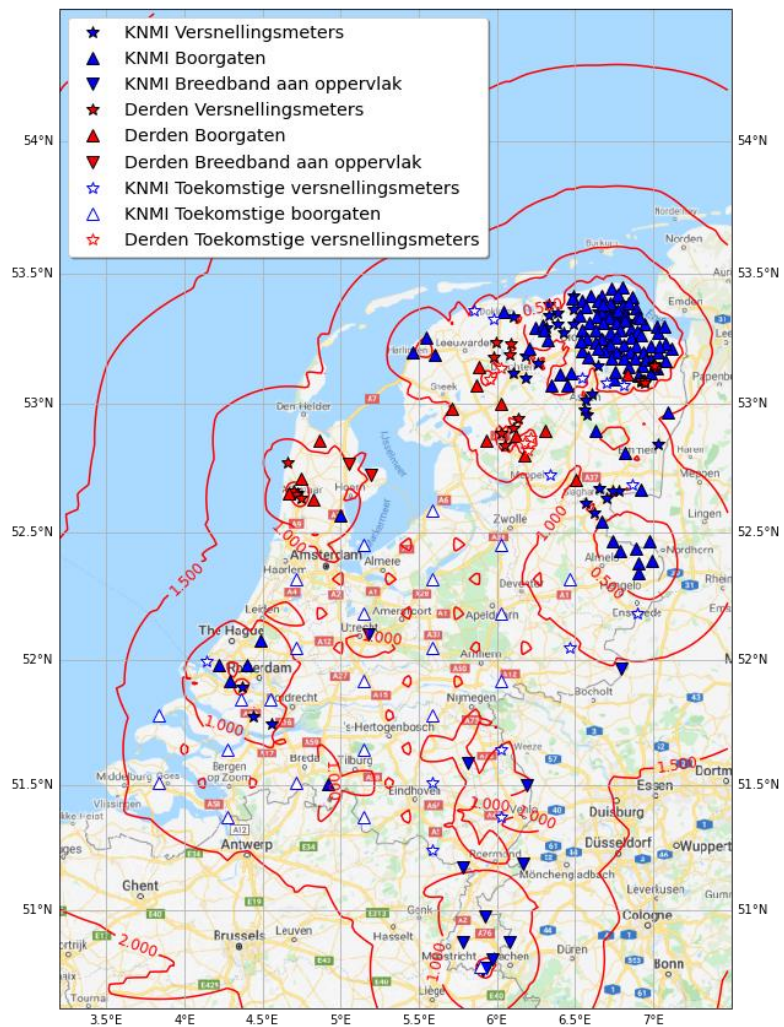
Optie	MoC	Stationsafstand	Uitbreiding gebaseerd op:
1a	1,5	30 km	nlog.nl
1b	1,5	30 km	nlog.nl en WARM (2020)
2a	1,0	15 km	nlog.nl
2b	1,0	15 km	nlog.nl en WARM (2020)



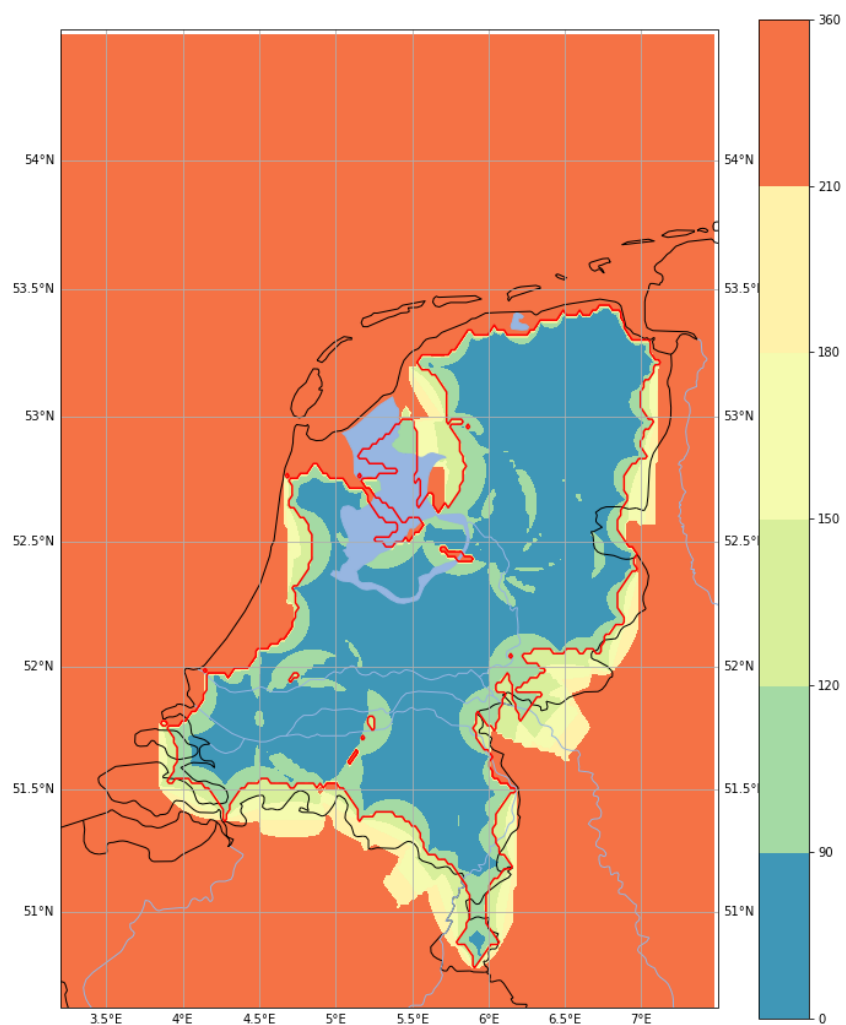
Figuur A-1: MoC voor het uitgebreide netwerk voor scenario 1a: MoC = 1,5, stationsafstand = 30 km, uitbreiding gebaseerd op nlog.nl.



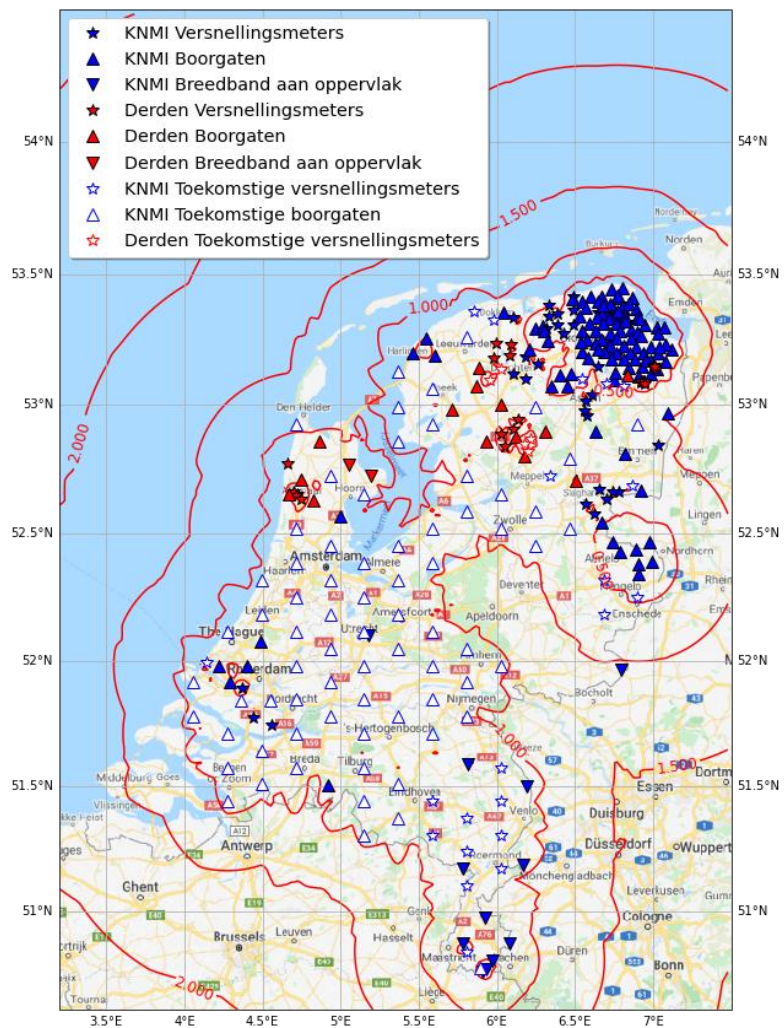
Figuur A-2: Azimutdekking (maximale azimutgat) voor het uitgebreide netwerk voor scenario 1a: MoC = 1,5, stationsafstand = 30 km, uitbreiding gebaseerd op nlog.nl.



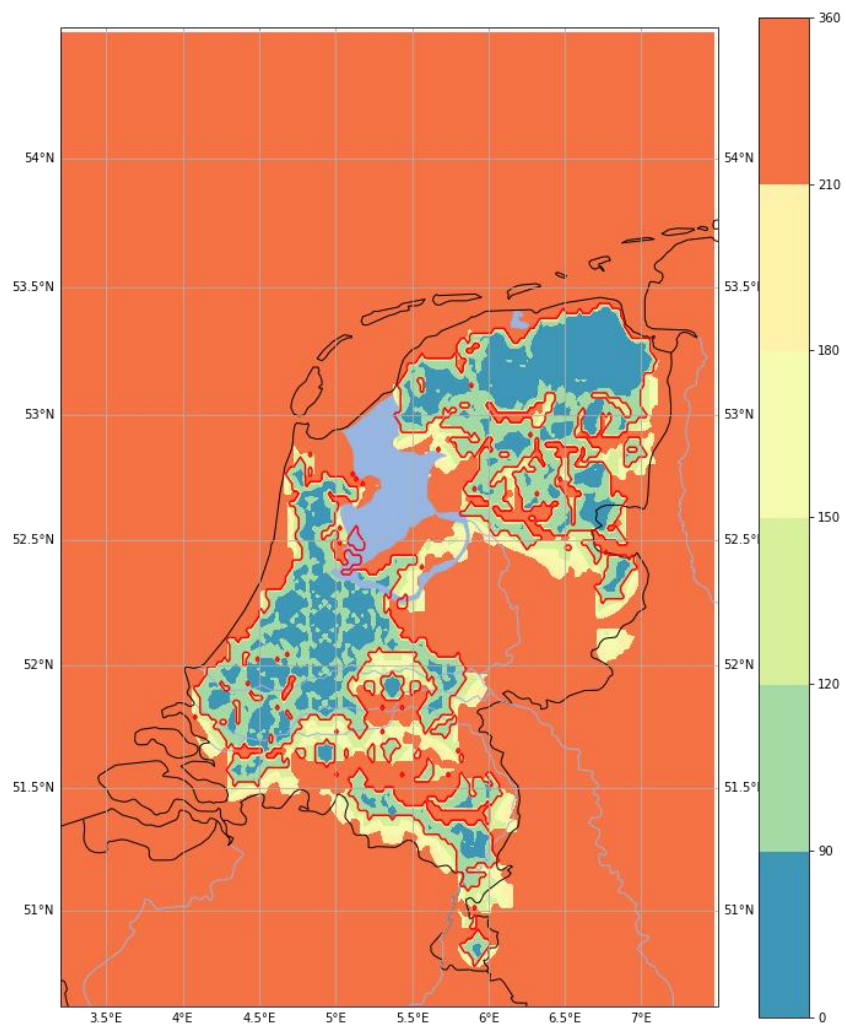
Figuur A-3: MoC voor het uitgebreide netwerk voor scenario 1b: MoC = 1,5, stationsafstand = 30 km, uitbreiding gebaseerd op nlog.nl en WARM (2020).



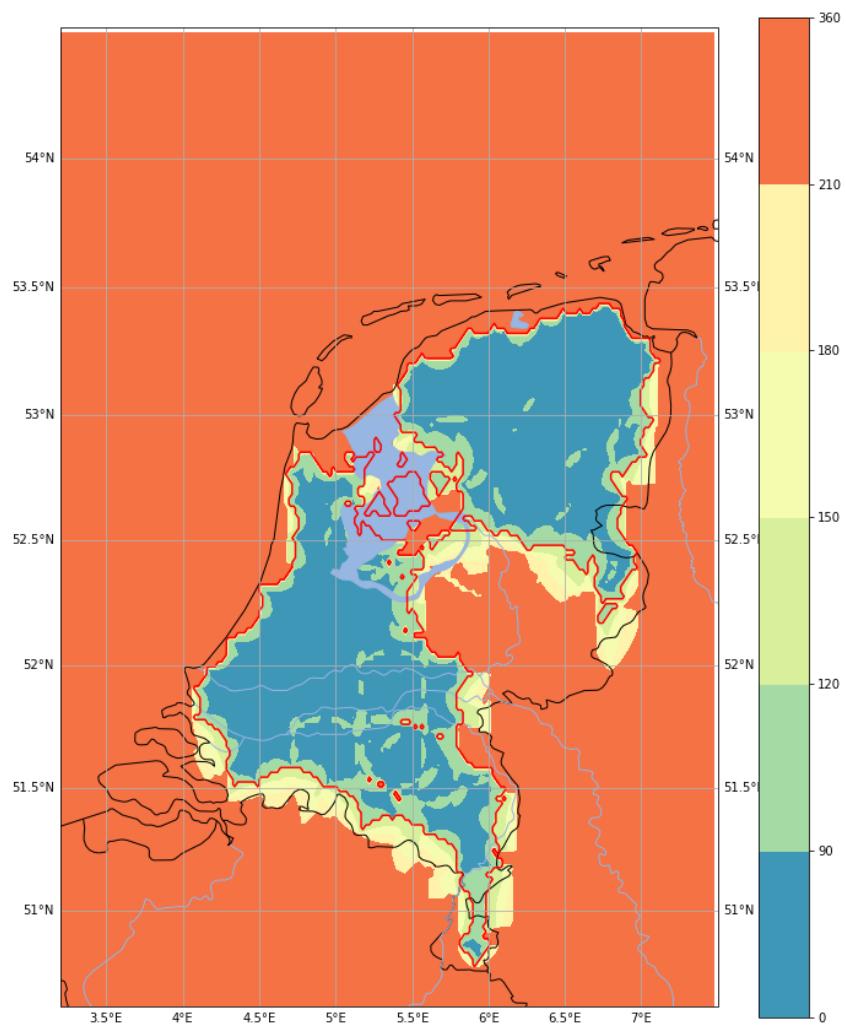
Figuur A-4: Azimutdekking (maximale azimutgat) voor het uitgebreide netwerk voor scenario 1b: MoC = 1,5, stationsafstand = 30 km, uitbreiding gebaseerd op nlog.nl en WARM (2020).



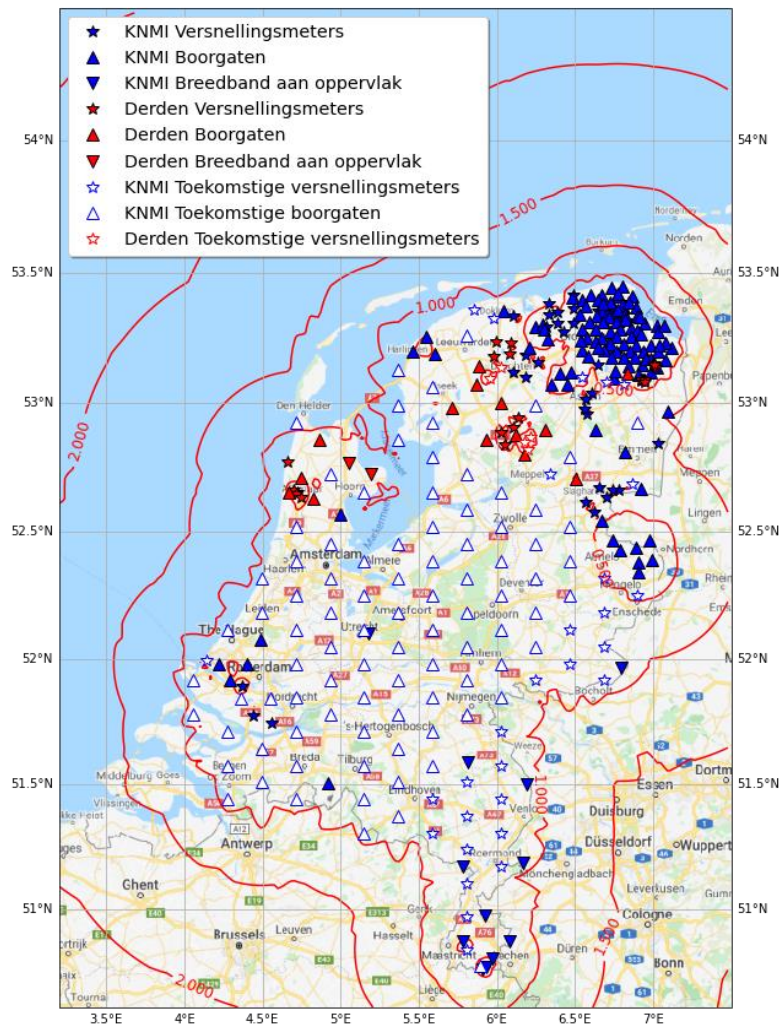
Figuur A-5: MoC voor het uitgebreide netwerk voor scenario 2a: MoC = 1,0, stationsafstand = 15 km, uitbreiding gebaseerd op nlog.nl.



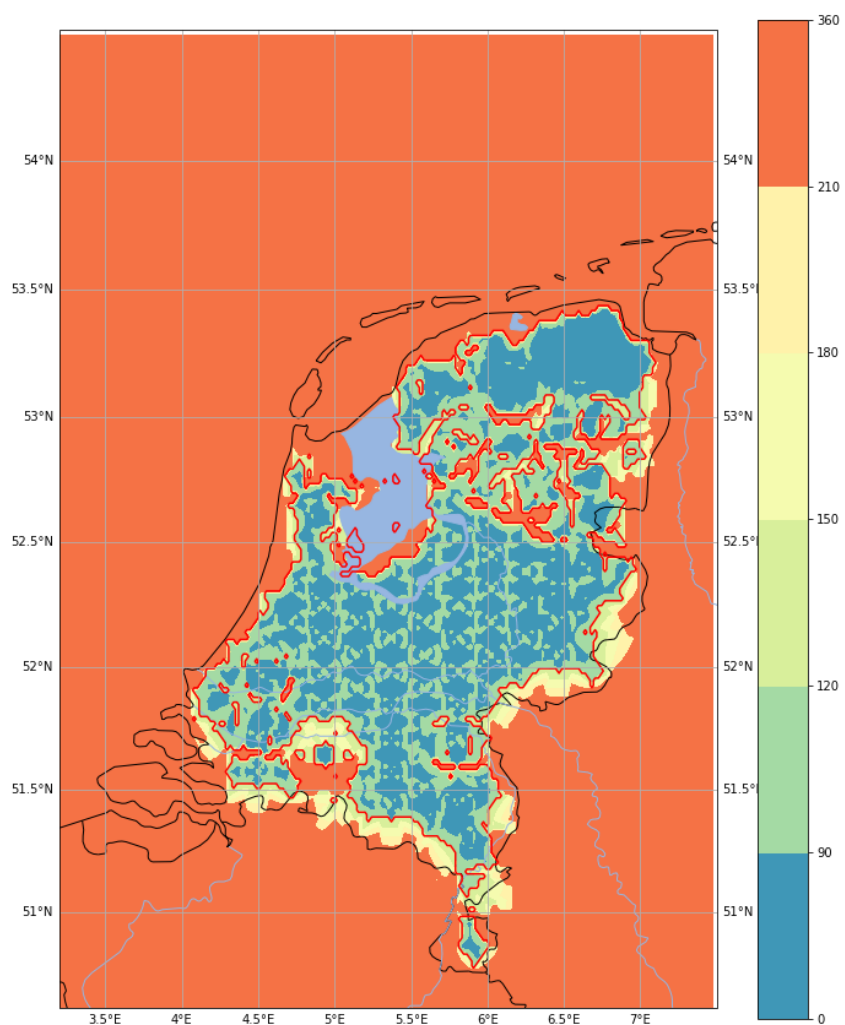
Figuur A-6: Azimutdekking (maximale azimutgat) voor het uitgebreide netwerk voor scenario 2a: MoC = 1,0, stationsafstand = 15 km, uitbreiding gebaseerd op nlog.nl.



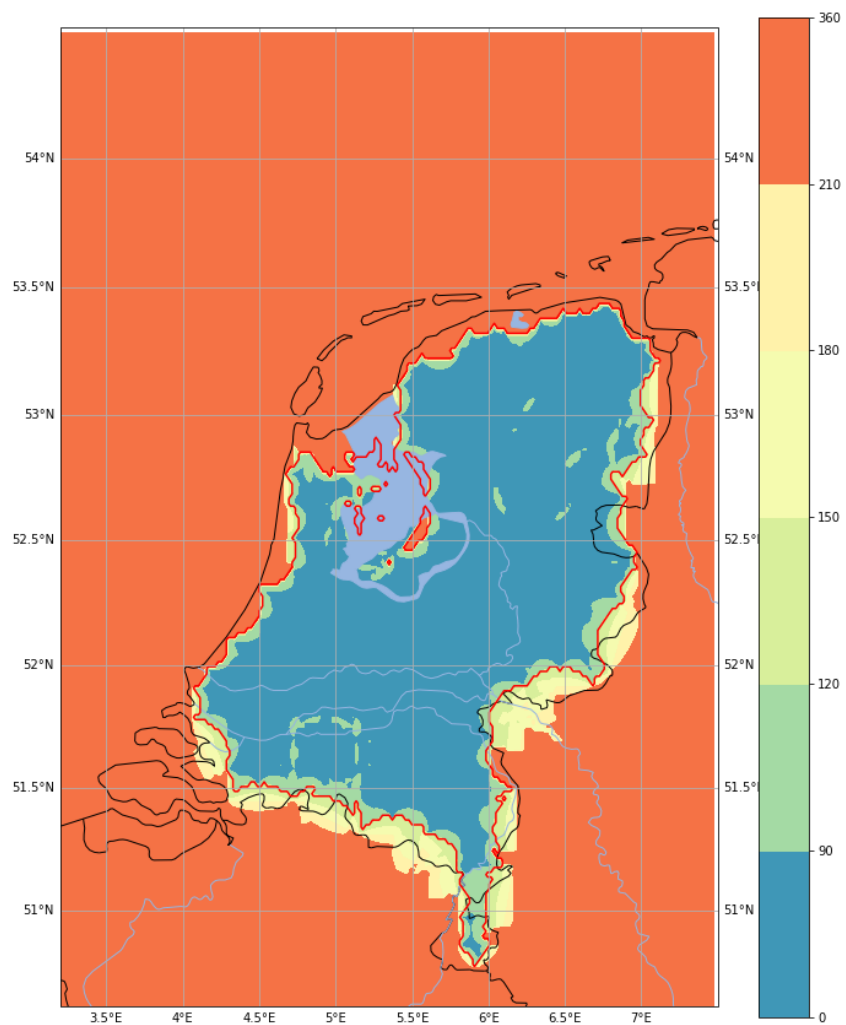
Figuur A-7: Azimutdekking (maximale azimutgat) voor het uitgebreide netwerk voor scenario 2b: alternatief MoC = 1,2 voor azimut, stationsafstand = 15 km, uitbreiding gebaseerd op nlog.nl.



Figuur A-8: MoC voor het uitgebreide netwerk voor scenario 2b: MoC = 1,0, stationsafstand = 15 km, uitbreiding gebaseerd op nlog.nl en WARM (2020).



Figuur A-9: Azimutdekking (maximale azimutgat) voor het uitgebreide netwerk voor scenario 2b: MoC = 1,0, stationsafstand = 15 km, uitbreiding gebaseerd op nlog.nl en WARM (2020).



Figuur A-10: Azimutdekking (maximale azimutgat) voor het uitgebreide netwerk voor scenario 2b: alternatief MoC = 1,2 voor azimut, stationsafstand = 15 km, uitbreiding gebaseerd op nlog.nl en WARM (2020).



Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Postbus 201 | 3730 AE De Bilt
T 030 220 69 11 | www.knmi.nl