

Seismische Dreigings- en Risicoanalyse voor
aardwarmteprojecten in Nederland

*Seismic Hazard and Risk Assessment for
geothermal projects in The Netherlands*

Rapport versie 16 november 2023

Report version 16 November 2023

Auteurs / Authors:

Harmen Mijnlief (TNO-AGE)

Sjoukje de Vries (EBN)

Bastiaan Jaarsma (EBN)

Bouko Vogelaar (TNO-AGE)

Inhoud

| | |
|--|----|
| DEEL I..... | 3 |
| Introductie van de “Seismische Dreigings- en Risico Analyse” (SDRA)..... | 3 |
| SDRA-kaders..... | 4 |
| Technisch kader | 5 |
| Typen aardwarmtereservoirs en permeabiliteitssystemen..... | 6 |
| Aardbevingen: Begrippen en toelichting | 7 |
| Schade ten gevolge van aardbevingen | 10 |
| Historische seismiciteit bij aardwarmtewinning..... | 11 |
| KADER Basistheorie voor breukbeweging | 11 |
| Verschil tussen spanningsontwikkeling bij gas- en aardwarmtewinning uit matrix permeabele reservoirs | 13 |
| Wettelijk- en beleidskader..... | 16 |
| Referentie naar artikelen in Mijnbouwwet, -besluit en -regeling | 16 |
| Kamerbrief t.a.v. verantwoord omgaan met risico’s en onzekerheden bij aardwarmtewinning | 19 |
| Vergunningskader | 21 |
| Implicatie van de kaders voor de SDRA Aardwarmte en verantwoording van de nieuwe methodiek .. | 22 |
| Inschatten seismiciteit bij aardwarmtewinning..... | 22 |
| Koppeling seismiciteitsinschatting met het beleidsdomein | 23 |
| SDRA Aardwarmte op hoofdlijnen | 27 |
| Seismische dreigingscreening (SDS) | 28 |
| Standaard uitgebreide SDRA..... | 31 |
| Bepaling potentiële schadevoorziening..... | 33 |
| Maatwerk SDRA | 34 |
| Aansluiting van de SDRA bij andere onderdelen van de seismiciteitsgovernance | 36 |
| Toekomstperspectief | 37 |
| DEEL II..... | 38 |
| Details of the Seismic Hazard and Risk Assessment procedure..... | 38 |
| Permeability system and pressure communication between wells | 38 |
| Geothermal systems and permeability types | 38 |
| Primary and secondary permeability systems | 38 |
| Pressure communication between injector and producer wells..... | 39 |
| Closed loop systems..... | 40 |
| Mine shafts and galleries | 40 |

| | |
|--|----|
| ‘Permeability system’ workflow..... | 40 |
| Area of Influence of a geothermal system..... | 42 |
| General approach..... | 42 |
| Reservoir modelling approach | 45 |
| Custom GT-Aol definition..... | 46 |
| Seismic data coverage and quality..... | 47 |
| Seismic data coverage..... | 47 |
| Seismic data quality | 47 |
| Outcome of the seismic data coverage and quality workflow | 48 |
| Areas with aberrant stress conditions where faults may be close to critically stressed | 49 |
| Areas where faults may be close to critically stressed due to subsurface mining activities | 49 |
| Larger Roer Valley Graben Area..... | 57 |
| Major relevant fault zones..... | 61 |
| Presence of faults and their reactivation potential | 63 |
| Presence of faults in the GT-Aol | 64 |
| Fault reactivation potential assessment..... | 65 |
| Standard extensive SHRA-procedure..... | 72 |
| Event location and depth..... | 72 |
| Magnitude..... | 73 |
| Ground motion (conversion to Peak Ground Velocity) | 75 |
| Seismic hazard..... | 76 |
| Custom SHRA | 77 |
| Procedure to assess required amount of damage claim provision (‘schadevoorziening’) | 79 |
| Ground motion and potential damage area | 79 |
| Number of buildings within the potential damage area..... | 79 |
| Fragility of the exposed buildings | 80 |
| Number of potentially damaged buildings | 80 |
| Potential amount of damage claim provision required..... | 81 |
| References | 82 |
| Appendix A – Handleidingen / User manuals | 86 |
| Appendix A1 – Handleiding Seismische Dreiging en Risico Analyse | 86 |
| Appendix A2 – User manual Location Specific SHRA tooling (“SRIMA”) | 86 |

DEEL I

Introductie van de “Seismische Dreigings- en Risico Analyse” (SDRA)

In de Mijnbouwwet (MBW, versie ingangsdatum 1 juli 2023) staat dat voor iedere aardwarmte start- en vervolvergunning de verwachte bodembeweging ten gevolge van de winning van aardwarmtewinning beschreven dient te worden. En, indien dit nodig is gelet op de verwachte bodembeweging, moeten de volgende zaken worden bepaald: ‘de veiligheidsrisico’s voor omwonenden, het risico op schade aan gebouwen of infrastructurele werken of het risico op verstoring van functionaliteit daarvan’ (MWB Artikelen 24o en 24af). Op basis van deze vereisten dient voor ieder aardwarmteproject een Seismische Dreiging- en Risico Analyse (SDRA), in het Engels “Seismic Hazard and Risk Analysis” (SHRA) uitgevoerd te worden. De dreiging is in dit geval dat, als gevolg van aardwarmtewinning (geothermie), een aardbeving geïnduceerd zou kunnen worden. Het risico is de mate van de gevolgen van zo’n aardbeving (schade- en/of veiligheidsrisico) maal de kans van optreden daarvan.

Om invulling te geven aan de wettelijke vereisten, heeft het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) de Adviesgroep Economische Zaken van TNO (TNO-AGE) en Energie Beheer Nederland (EBN) de opdracht gegeven om een nieuwe SDRA-methodiek voor winning van aardwarmte te ontwikkelen, ter vervanging van de huidige gebruikte methode van Baisch et al. (2016). De nieuwe SDRA-methodiek wordt beschreven in dit document.

Deze SDRA-methodiek geldt voor alle aardwarmteprojecten beneden de 500 m diepte. Aardwarmte uit het dieptebereik van 0 tot 500 m wordt ook wel aangeduid met de term ‘bodemenergie’. Dit dieptebereik valt buiten de mijnbouwwet en derhalve buiten de scope van deze SDRA. Deze SDRA is toepasbaar voor de beoordeling van de seismische dreiging en het risico tijdens de (beoogde) winning van aardwarmte en is niet toepasbaar voor het beoordelen van eventuele seismische dreiging en risico’s gedurende de boorfase van de aardwarmteput(ten)¹.

De SDRA-methodiek is specifiek ontworpen voor de analyse van de seismische dreiging en het eventuele risico van aardwarmteprojecten *onshore* (op land) in Nederland. De methodiek is niet bedoeld voor andere doeleinden, of voor projecten buiten bovengenoemde diepte en/of geografisch bereik.

De uitkomst van de SDRA-methodiek moet worden gezien als een zo goed als realistisch mogelijke benadering van de seismische dreiging en het potentieel bijbehorende risico. Wetenschappelijke inzichten en modellen zijn momenteel nog niet toereikend om precieze dreigings- en risicoberekeningen te maken. Ook ontbreekt het nog aan voldoende lokale geomechanische en kalibratiedata om berekeningen die wel mogelijk zijn te preciseren en verifiëren. De huidige methode is bedoeld, en wordt voldoende geacht, voor de komende jaren. De veronderstelling is dat deze (uiterlijk) op termijn van een jaar of vijf tot tien zal kunnen worden verfijnd en verbeterd op basis van voortschrijdende inzichten. Voorwaarde hiervoor is dat de komende jaren structureel en significant geïnvesteerd zal worden in het vergaren van data, zowel bij het boren van aardwarmteputten als tijdens de operaties, en in verder onderzoek op het gebied van seismiciteit bij de Nederlandse types van aardwarmtesystemen en vergelijkbare systemen in het buitenland. Dit laat onverlet dat in de komende jaren goed bekeken moet

¹ Seismische dreiging en risico tijdens de boorfase vallen onder het boorplan, niet onder de vergunningsaanvra(a)g(en). Daarnaast zijn de technische risico’s tijdens de boorfase anders dan tijdens de productieperiode (bijvoorbeeld het doorboren van breuken en spoelingsverliezen, die voor de productieperiode niet relevant zijn). Hierdoor is de SHRA-methodiek niet toepasbaar voor risico analyse tijdens de boorfase.

worden of de in dit rapport beschreven SDRA-methodiek voldoet in het kader van de vergunningverlening en dat deze zo nodig tussentijds aangepast zal kunnen worden.

Leeswijzer

Dit rapport is opgedeeld in twee delen. Het eerste deel (DEEL I), geschreven in het Nederlands, geeft de kaders waarbinnen de SDRA is ontworpen en een beschrijving van de nieuwe SDRA op hoofdlijnen. Besproken worden achtereenvolgens het technisch kader en het wettelijk- en beleidskader (in 'SDRA-kaders'). Vervolgens wordt de implicatie van deze kaders voor het ontwerp van de SDRA gegeven (in '

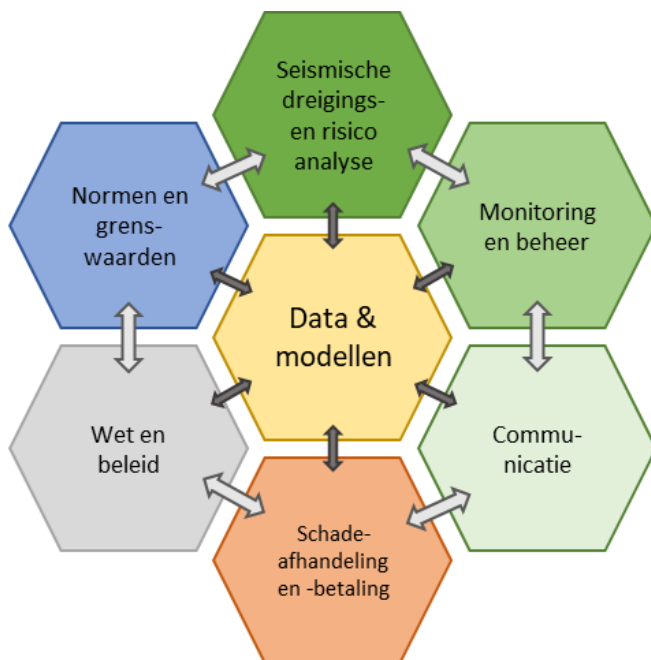
Implicatie van de kaders voor de SDRA '). Ook wordt een korte samenvatting gegeven van de SDRA-procedure als geheel, en hoe deze relateert aan de monitoring- en beheerstrategie ('

SDRA Aardwarmte op hoofdlijnen'). Het eerste deel wordt afgesloten met een toekomstperspectief ('Toekomstperspectief'). In het tweede deel, geschreven in het Engels, worden de verschillende elementen van de SDRA technisch-inhoudelijk besproken en verantwoord (DEEL II).

De appendices bevatten de praktische handleidingen voor het uitvoeren van de SDRA-procedure (Appendix A1 – Handleiding Seismische Dreiging en Risico Analyse and Appendix A2 – User manual Location Specific SHRA tooling ("SRIMA")). Tenslotte bevatten de referenties nog een aantal technisch-inhoudelijke detail rapporten, die nog dieper ingaan op een aantal van de SDRA-elementen.

SDRA-kaders

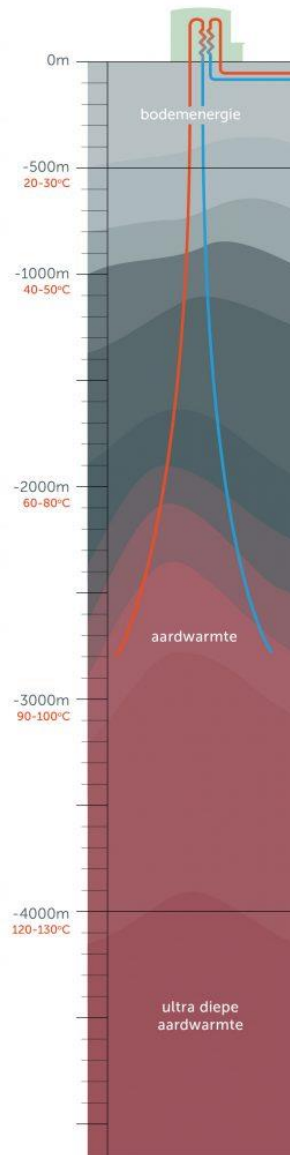
Een SDRA is niet een op zichzelf staande procedure. Zo is de SDRA ingebed in de Mijnbouwwet, het onderliggende Mijnbouwbesluit en de Mijnbouwregeling. Hierin worden randvoorwaarden en rapportageverplichtingen bij het aanvragen van vergunningen gedefinieerd. De uitkomst van de SDRA heeft een relatie met de aard en zwaarte van de seismische monitoring en beheersystematiek. Ook heeft de uitkomst van de SDRA een relatie met een schadeprotocol en schadefonds. Vervolgens heeft de SDRA ook een plek in de communicatie van het project naar de verschillende belanghebbenden. Uiteindelijk heeft de SDRA een directe relatie met kennis en begrip van de ondergrond. Hoe meer gegevens we van de ondergrond hebben, hoe beter we de ondergrond en de effecten van mijnbouwactiviteiten in de ondergrond kunnen begrijpen. Met dat begrip kunnen we betere modellen maken van die ondergrond om een betere indicatie te krijgen, en uiteindelijk voorspelling te maken, van hoe de ondergrond gaat reageren op menselijk handelen. De relaties tussen de verschillende elementen van de seismiciteits 'governance' zijn weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1 Elementen van de seismiciteitsgovernance

Technisch kader

Aardwarmtewinning, of geothermie, is de winning van warmte opgeslagen in gesteentelagen in de ondergrond. In Nederland wordt het per kilometer dat je dieper de aarde ingaat ongeveer 31 graden warmer (Bonté et al., 2012). Voor de winning van aardwarmte is een energie- of warmtedrager nodig. Dit is in reguliere aardwarmtesystemen het (zoute) water dat van nature in de gesteentelagen voorkomt, ook wel formatiewater genoemd. Om daaruit warmte te kunnen winnen moet dit water door de ondergrond kunnen stromen. Dit vereist een gesteentelaag met voldoende porositeit en doorlatendheid (permeabiliteit). Zo'n laag wordt een reservoir of aquifer genoemd. De winning vindt plaats door het warme water op te pompen uit het reservoir via een productieput, bovengronds de warmte uit het water te onttrekken met een warmtewisselaar en vervolgens via een injectieput het afgekoelde water weer terug het reservoir in te pompen (Figuur 2). Het teruggepompte, afgekoelde water vormt een zone rond de injectieput waarin het gesteente ook afkoelt (ook wel de 'koudwaterbel'). De afgekoelde zone rond de injectieput wordt het geothermisch invloedsgebied (*Area of Influence*) genoemd.



Figuur 2 Illustratie van een aardwarmte doublet met een productieput (in rood) en injectieput (in blauw) (bron: allesoveraardwarmte.nl)

Typen aardwarmtereservoirs en permeabiliteitssystemen

In Nederland liggen, voor zover nu bekend, nagenoeg exclusief sedimentaire (of afzettings-) gesteenten in het bereik van aardwarmte. In het buitenland wordt ook veel aardwarmte gewonnen uit vulkanische gesteenten.

Aardwarmtereservoirs kunnen ook geclassificeerd worden op basis van de aard van de permeabiliteit (doorlatendheid) van het gesteente waaruit wordt gewonnen. Er zijn twee dominante permeabiliteitstypes te onderscheiden:

1. Reservoirs die doorlatend zijn omdat de poriën tussen de korrels waaruit het reservoir is opgebouwd allemaal met elkaar verbonden zijn en als zodanig een groot netwerk vormen waar formatiewater doorheen kan stromen. Dit wordt matrix permeabiliteit genoemd.

Aardwarmtereservoirs van dit type worden hierna “matrix permeabele reservoirs” genoemd. Op twee na benutten alle huidige aardwarmteprojecten in Nederland matrix permeabele reservoirs.

2. Reservoirs die doorlatend zijn omdat de gesteentelaag doorsneden is met scheuren en breuken. Die scheuren en breuken kunnen met elkaar verbonden zijn en een beetje open staan, waardoor er formatiewater doorheen kan stromen. Dit wordt breukpermeabiliteit genoemd (*fracture or fault permeability*, in het Engels). Het onverbreukte gesteente waarin de scheuren en breuken zich bevinden is in deze reservoirs over het algemeen niet of nauwelijks doorlatend. Twee aardwarmteprojecten in Nederland (beiden nabij Venlo) hebben geproduceerd uit een dergelijk permeabiliteitstype.

Aardbevingen: Begrippen en toelichting

De uit te voeren dreigings- en risicoanalyse heeft betrekking op het mogelijk induceren van groundbewegingen (trillingen), ook wel aardbevingen of ‘seismiciteit’ genoemd, als gevolg van aardwarmtewinning. Hieronder wordt in het kort de terminologie rond aardbevingen geïntroduceerd, en wordt in eenvoudige termen toegelicht hoe deze ontstaan.

Wat is een aardbeving?

Een aardbeving is een trillende of schokkende beweging van de aardkorst. Die beweging ontstaat als gesteentes aan weerszijde van een bestaande breuk in de ondergrond plotseling schoksgewijs langs elkaar bewegen.

Een beweging langs een breuk kan alleen maar plaatsvinden als de spanning op een breuk een kritische drempel overschrijdt (zie voor meer detail over breukbeweging het kader ‘KADER Basistheorie voor breukbeweging’). Indien de spanningen op een breuk de kritische drempel overschrijden dan zijn er twee mogelijke gevolgen. De gesteenten aan weerszijde van de breuk:

- Glijden geleidelijk langs elkaar
- Bewegen schoksgewijs langs elkaar

In het eerste geval zal er geen aardbeving ontstaan. Enkel in het tweede geval ontstaat er een aardbeving van een bepaalde sterkte (ook wel magnitude genoemd, zie ook de paragraaf ‘Sterkte van een aardbeving in de ondergrond’).

De oorzaak van het veranderen of verhogen van de spanning in de ondergrond zodanig dat de kritische drempel wordt overschreden kan een natuurlijke oorsprong hebben, kan het gevolg zijn van menselijke activiteiten, of een combinatie van beiden. Opbouw van natuurlijke spanning in de ondergrond wordt veroorzaakt door het bewegen van de continenten over de aardbol. Als er door natuurlijke spanningsverandering beweging langs breuken en daardoor een aardbeving ontstaat, wordt dit een natuurlijke of tektonische aardbeving genoemd. Menselijke activiteiten die spanningsveranderingen in de ondergrond teweeg kunnen brengen zijn, onder meer, mijnbouwactiviteiten. Mijnbouwactiviteiten kunnen leiden tot druk en/of temperatuursveranderingen in de ondergrond, die op hun beurt de spanningstoestand veranderen en daardoor kunnen leiden tot beweging langs bestaande breuken (ook wel: ‘reactivatie’ van bestaande breuken). Gasproductie, bijvoorbeeld, leidt tot drukverlaging in de ondergrond in en rond het aardgasveld. Bij aardwarmtewinning treedt afkoeling op van de ondergrond (en in mindere mate ook drukverandering). Als er menselijk handelen ten grondslag ligt aan de

spanningsverandering waardoor de kritische spanning op een breuk wordt overschreden en daardoor een aardbeving optreedt, wordt dit een geïnduceerde aardbeving genoemd (*induced earthquake*).

Veel informatie over aardbevingen is te vinden op de website van het KNMI (www.knmi.nl). Daarnaast zijn er veel wetenschappelijke artikelen over geïnduceerde aardbevingen in Nederland (bijvoorbeeld Muntendam et al., 2022 en Buijze et al., 2019).

Voorgespannen gebieden

Zoals bovengenoemd kan een beweging langs een breuk alleen plaatsvinden als de spanning op deze breuk een kritische drempel overschrijdt. In een aantal situaties zijn de spanningen in de ondergrond al dichter bij deze kritische drempel voorafgaand aan de start van een aardwarmteproject dan elders in Nederland. Deze gebieden worden ook wel voorgespannen gebieden genoemd. Dit kan zijn door natuurlijke processen of ten gevolge van menselijke activiteiten in de ondergrond (eerdere mijnbouwprojecten).

Natuurlijke voorspanning wordt veroorzaakt ten gevolge van het bewegen van de continenten over de aarde (ook wel: 'plaattektoniek'), waardoor er in bepaalde gebieden hogere spanningen zijn ontstaan. Dit is in Nederland bijvoorbeeld het geval in het Roerdalslenkgebied (*Roer Valley Graben Area*). De spanningssituatie is er dusdanig, dat hier ook regelmatig natuurlijke aardbevingen plaatsvinden. Buiten het Roerdalslenkgebied zijn er in Nederland nog op een aantal andere plaatsen natuurlijke aardbevingen geobserveerd, wat eveneens zou kunnen duiden op natuurlijke (tektonische) voorspanning.

Daarnaast kan de spanningstoestand in bepaalde gebieden ook dichter bij de kritische drempel voor breukbeweging liggen door menselijke activiteiten (eerdere mijnbouwprojecten in de ondergrond). Dit is bijvoorbeeld het geval in de buurt van gasvelden waaruit winning plaatsvindt of heeft gevonden, of in de buurt van cavernes waaruit zout gewonnen is.

Kans van optreden van een aardbeving

In gebieden waar veel aardbevingen plaatsvinden, kan de kans van optreden van een aardbeving van een bepaalde sterkte worden ingeschat aan de hand van de historische aardbevingsgegevens. Wereldwijd is geobserveerd dat er binnen een afgebakende regio en tijdsperiode zeer veel hele lichte aardbevingen optreden, veel lichte, minder matige en weinig grote. De relatie tussen magnitude en frequentie van voorkomen van aardbevingen kan worden beschreven door middel van een formule (de *Gutenberg-Richter* relatie, Gutenberg and Richter, 1941). De exacte verhouding tussen de sterkte van een beving en aantal van deze bevingen dat voorkomt, verschilt per regio en/of met de tijd en kan alleen worden bepaald in gebieden waar een grote historische set aardbevingsgegevens beschikbaar is. Uitsluitend dan kan de kans van een aardbeving met een bepaalde sterkte door middel van deze relatie met enige zekerheid worden ingeschat. Het moment van optreden van een beving en de sterkte hiervan kan echter niet voorspeld worden. Voor aardwarmteprojecten in Nederland waarbij wordt gewonnen uit matrix-permeabele reservoirs zijn tot op heden niet of nauwelijks aardbevingen geregistreerd (zie ook 'Historische seismiciteit bij '). Het is daarom op dit moment onmogelijk om op basis van historische aardbevingsgegevens de kans van optreden op een aardbeving (en de eventuele sterkte daarvan) in te schatten.

Bij gebrek aan historische aardbevingsgegevens zou ook kunnen worden geprobeerd om de theoretische kans van optreden van een aardbeving te bepalen. Dit blijkt echter in de praktijk nog zeer moeilijk tot onmogelijk. Of een breuk kritisch gespannen raakt en er dus beweging langs het breukvlak zal gaan plaatsvinden is te berekenen aan de hand van de Mohr-Coulomb theorie (zie kader 'Basistheorie voor breukbeweging'). De uitkomst van deze berekening heeft een grote

onzekerheidsbandbreedte, aangezien veel van de invoerwaarden voor de berekening (waaronder de initiële spanningscondities in de ondergrond, de eigenschappen van de breuk, etc.) een grote onzekerheid hebben. Aannemende dat de breuk inderdaad kritisch gespannen is en gaat bewegen, is de vraag of dit geleidelijk ('a-seismisch') of abrupt en schoksgewijs ('seismisch') gebeurt. Er wordt veel onderzoek gedaan aan dit breukgedrag (bijvoorbeeld Marone et al., 1990, Tembe et al., 2010, Carpenter et al., 2016, Hunfeld et al., 2017, Hunfeld et al., 2020), maar is er nog geen wetenschappelijke consensus of een robuuste, algemeen geaccepteerde methode om te bepalen of een breuk in een bepaalde laag in de ondergrond zich seismisch zal gaan gedragen (en dus een aardbeving zal veroorzaken) of niet. Dat betekent dat het momenteel nog niet mogelijk is om de kans van optreden van een aardbeving ten gevolge van een aardwarmteproject te bepalen.

Sterkte van een aardbeving in de ondergrond

De sterkte van de beving wordt, voor zware bevingen, uitgedrukt in een getal op de (logaritmische) momentmagnitudeschaal (ook wel aangeduid als M_w of M). Voor lichte bevingen wordt de lokale magnitude gebruikt (ook wel aangeduid als M_L). M_w wordt gebruikt voor bevingen vanaf een magnitude van ca. 5 (zie bijvoorbeeld USGS, 2023). De sterkte van een aardbeving is in belangrijke mate afhankelijk van de energie die vrijkomt bij het bewegen van de breuk. De hoeveelheid energie die vrij kan komen is afhankelijk van de grootte van het oppervlak van de breuk waarlangs de gesteenten schuiven en de hoeveelheid spanning die loskomt bij de beweging die de aardbeving veroorzaakt (ook wel "spanningsval", of *stress drop*). De spanningsval is het verschil van spanning tussen de situatie van voor de beving, een situatie waarin kritische spanning is opgebouwd op de breuk, en de nieuwe situatie van lagere spanning na de breukbeweging. Hoe groter het verschil tussen deze twee spanningstoestanden, hoe meer energie er vrijkomt en hoe sterker de beving is.

Intensiteit van een aardbeving aan het maaiveld

Een aardbeving vindt plaats op een locatie in de diepe ondergrond (aangeduid met coördinaten; x , y en z (diepte)), die het hypocentrum wordt genoemd. De projectie van deze hypocentrumlocatie op het aardoppervlak (ook wel het 'maaiveld') wordt epicentrum (x , y) genoemd.

Een aardbeving veroorzaakt een drukgolf in de ondergrond die zich vanaf het hypocentrum naar alle kanten verplaatst, waaronder naar het maaiveld. Wanneer de golf het maaiveld bereikt, veroorzaakt dat een beweging die, afhankelijk van de sterkte en diepte van de beving en (in mindere mate) de aard van de zeer ondiepe ondergrond, aan de oppervlakte gemeten en/of gevoeld kan worden. De intensiteit en gevolgen van die beweging kunnen kwalitatief worden geclassificeerd door middel van de schaal van Mercalli of de Europese Macro Seismische (EMS) schaal (Grünthal et al., 1998). Deze intensiteitsschalen zijn gebaseerd op de waarneembare gevolgen van een aardbeving. De beweging van het aardoppervlak kan worden gekwantificeerd in termen van piekgrondsnelheid in mm/sec (*Peak Ground Velocity*, PGV) of grondversnelling in mm/sec² (*Peak Ground Acceleration*, PGA). Deze twee classificatiesystemen kunnen ook aan elkaar worden gekoppeld; dat wil zeggen de grenzen van de verschillende EMS-klassen kunnen worden uitgedrukt in PGV- en/of PGA-waarden (Figuur 3). Hieruit blijkt dat grondsnelheden vanaf ca. 1 mm/s voor enkelen zwak voelbaar zijn (door enkele mensen binnen, in rust), en dat ze vanaf ca. 2 mm/s meer algemeen worden gevoeld (binnen door veel mensen, buiten door een enkelen). Trillingen van 1 mm/s en meer komen dagelijks voor, ook als gevolg van andere oorzaken dan aardbevingen, zoals bijvoorbeeld door langrijdend verkeer of bouwwerkzaamheden.

| EMS schaal | Niet gevoeld | Nauwelijks gevoeld | Zwak | Algemeen gevoeld | Sterk | Licht beschadigend | Beschadigend | Zwaar beschadigend | Vernielend | Zeer vernielend | Verwoestend | Allesverwoestend |
|-----------------------------|--------------|-----------------------|---------|---------------------|--------|-----------------------|--------------|-----------------------|------------|-----------------|-------------|------------------|
| PGV [mm/s] | 0.1-0.2 | 0.3-0.9 | 0.7-2.3 | 2-6 | 5-16 | 13-44 | 35-116 | 90-310 | 250-820 | 660-2190 | 1760-5840 | >4120 |
| PGA [mm/s ²] | 2-1.2 | 6-30 | 15-73 | 40-180 | 90-430 | 210-1050 | 510-2580 | 1260-6300 | 3100-15400 | 7500-35400 | 18300-91700 | >44700 |

Figuur 3 Koppeling van de kwalitatieve EMS schaal aan grondsnelheden (PGV) en grondversnellingen (PGA), gebaseerd op Zang et al., 2014

Welke magnitude de aardbeving heeft die zo'n piekgrondsnelheid veroorzaakt, hangt af van de diepte waarop de beving plaatsvindt. Een beving op geringere diepte zal een hogere piekgrondsnelheid veroorzaken aan het maaiveld dan een diepere beving met exact dezelfde magnitude en (x, y) locatie. Voor het omrekenen van magnitudes naar grondsnelheden worden zogenaamde 'ground motion prediction equations' gebruikt. Daarnaast speelt ook de aard van de ondiepe ondergrond een rol bij de intensiteit van de beweging aan het maaiveld. Een beving in een gebied met een 'slappe' ondiepe ondergrond zal een hogere piekgrondsnelheid veroorzaken dan een beving op exact dezelfde diepte en identieke magnitude in een gebied met een 'stijve' ondiepe ondergrond.

Schade ten gevolge van aardbevingen

De hoeveelheid schade die ontstaat ten gevolge van een aardbeving is, naast piekgrondsnelheid, afhankelijk van een groot aantal factoren. Hierbij valt te denken aan zaken die te maken hebben met de aard van de grondbeweging, zoals duur van de beweging, de beweegricting en het aantal keer dat zo'n grondbeweging plaatsvindt. Daarnaast is de schade ook afhankelijk van het gebouw type, de bouwspecificaties en staat van het gebouw. Hierbij spelen bijvoorbeeld ouderdom van het gebouw, gebruikte bouwmaterialen, hoogbouw of laagbouw, funderingstype, bouwkwaliteit en staat van onderhoud een rol.

Op basis van de kwalitatieve EMS-schaal veroorzaken aardbevingen pas vanaf het domein 'Sterk' mogelijk aan enkele gebouwen lichte, niet-structurele schade, zoals enkele haarscheurtjes of het loskomen van kleine stukjes pleisterwerk (Grünthal et al., 1998). Het gaat hierbij uitsluitend om gebouwen in de allerhoogste kwetsbaarheidscategorieën, waaronder bijvoorbeeld gebouwen van los gestapelde natuurstenen, lemen bouwwerken en simpele bakstenen gebouwen. In het domein 'Licht beschadigend' kunnen er veel gebouwen lichte, niet-structurele schade oplopen. De schade in deze twee domeinen valt allemaal in de EMS-categorie 'Damage Grade 1' (DG1).

In de trillingsrichtlijnen van de Stichting Bouwresearch (SBR) worden drempelwaardes gegeven voor het effect van trillingen op gebouwen (SBRCURnet, 2017). Zolang binnen deze drempelwaardes wordt gebleven is het, volgens deze richtlijnen, onwaarschijnlijk dat schade aan gebouwen wordt veroorzaakt. In de SBR-richtlijnen worden drie gebouwcategorieën onderscheiden op basis van de constructiewijze en de staat van het gebouw. De categorie met de meest kwetsbare gebouwen omvat hier de monumentale panden en gebouwen in een slechte staat van onderhoud. Daarnaast worden er drie types trillingsbronnen onderscheiden, waarvan voor aardwarmteprojecten alleen de categorie 'trillingsbronnen die incidenteel voorkomende kortdurende trillingen veroorzaken' relevant is. Uit de

richtlijnen blijkt dat gebouwen in de kwetsbaarste categorie bij dit type trillingsbron zeer lichte schade kunnen oplopen bij piekgrondsnelheden vanaf zo'n 3 mm/s (bij 3 mm/s is er 1% kans op zeer lichte schade). Dit komt ongeveer overeen met de EMS-schaal, waar volgens de koppeling met PGV-waardes door Zang et al. (2014), gebouwen in de kwetsbaarste klasse schade kunnen oplopen vanaf ca. 5 mm/s.

Historische seismiciteit bij aardwarmtewinning

In Nederland is tot dusverre geen voelbare seismiciteit waargenomen bij aardwarmteprojecten die winnen uit matrix permeabele reservoirs sinds de start van aardwarmteproductie in Nederland in 2008. Vooralsnog is er, voor zover bekend, ook wereldwijd nog geen voelbare seismiciteit waargenomen, of geregistreerd, bij aardwarmteprojecten in matrix permeabele reservoirs (Buijze et al., 2019; De Santis et al., 2022). De hoeveelheid en resolutie van de seismische metingen rond dergelijke aardwarmtesystemen is op de meeste plaatsen nog zeer beperkt, wat betekent dat er weinig bekend is over het eventueel optreden van niet-voelbare bevingen. Recent is tijdens een drie maanden lange meetcampagne met een gevoelig, lokaal meetnetwerk één niet-voelbare beving gemeten bij een aardwarmteproject in Nederland. Deze zou mogelijk het gevolg kunnen zijn van de aardwarmte winning, maar door de grote onzekerheid op de dieptebepaling kan dit niet onomstotelijk worden vastgesteld. Het kan niet worden uitgesloten dat de beving een tectonische (natuurlijke) oorsprong heeft (Muntendam-Bos et al., 2022).

Bij aardwarmteprojecten gerelateerd aan breukpermeabiliteit is wel seismiciteit waargenomen, waaronder ook voelbare aardbevingen (Buijze et al., 2019; De Santis et al., 2022).

--- BEGIN KADER ---

KADER Basistheorie voor breukbeweging

Aan de basis van alle geomechanische modellen die gebruikt worden om een inschatting te maken van mogelijke seismiciteit ligt de Mohr-Coulomb theorie. De Mohr-Coulomb theorie beschrijft onder welke mechanische spanningstoestand een gesteente gaat breken, of, in het geval van een reeds bestaande breuk in het gesteente, er opnieuw beweging langs de breuk plaats zal kunnen vinden. Voorwaarde voor seismiciteit (het optreden van een aardbeving) is namelijk dat er breukbeweging plaatsvindt. Berekening van de theoretische mogelijkheid tot breukbeweging is derhalve de eerste stap bij het inschatten of seismiciteit eventueel zou kunnen optreden. De Mohr-Coulomb theorie is inzichtelijk te maken met een grafiek die de spanningscondities in de ondergrond tezamen met de kritische spannings situatie waarbij de breuk gaat bewegen (Figuur 4a). In de volgende paragrafen wordt uitgelegd wat met spanning en de Mohr-Coulomb theorie bedoeld wordt.

Spanning is een kracht met een richting. Er zijn altijd drie hoofdspanningen (σ_1 , σ_2 , σ_3), die haaks op elkaar staan. In de ondergrond zijn de hoofdspanningen doorgaans in de verticale richting (verticale spanning σ_v , ook wel S_v) en in twee horizontale richtingen die loodrecht op elkaar staan, de minimale horizontale spanning σ_{hmin} (ook wel Sh_{min}) en de maximale horizontale spanning σ_{hmax} (ook wel Sh_{max}). In Nederland is de initiële spannings situatie zodanig dat de verticale spanning σ_v de grootste (σ_1) is, dus $\sigma_v > \sigma_{hmax} > \sigma_{hmin}$. De totale verticale spanning wordt bepaald door het gewicht van de gesteentelagen. De totale horizontale spanningen worden bepaald door de elasticiteit van de gesteenten en/of tektonische spanningsopbouw door plaattektoniek. Er wordt onderscheid gemaakt tussen totale en effectieve spanningen, waarbij effectieve spanningen de totale spanningen minus de poriëndruk zijn, bijvoorbeeld

de effectieve verticale spanning kan worden uitgedrukt als $\sigma_v' = \sigma_v - p$. De druk draagt als het ware ook een deel van de spanningen. Voor breukbeweging rekenen we altijd met de effectieve spanningen.

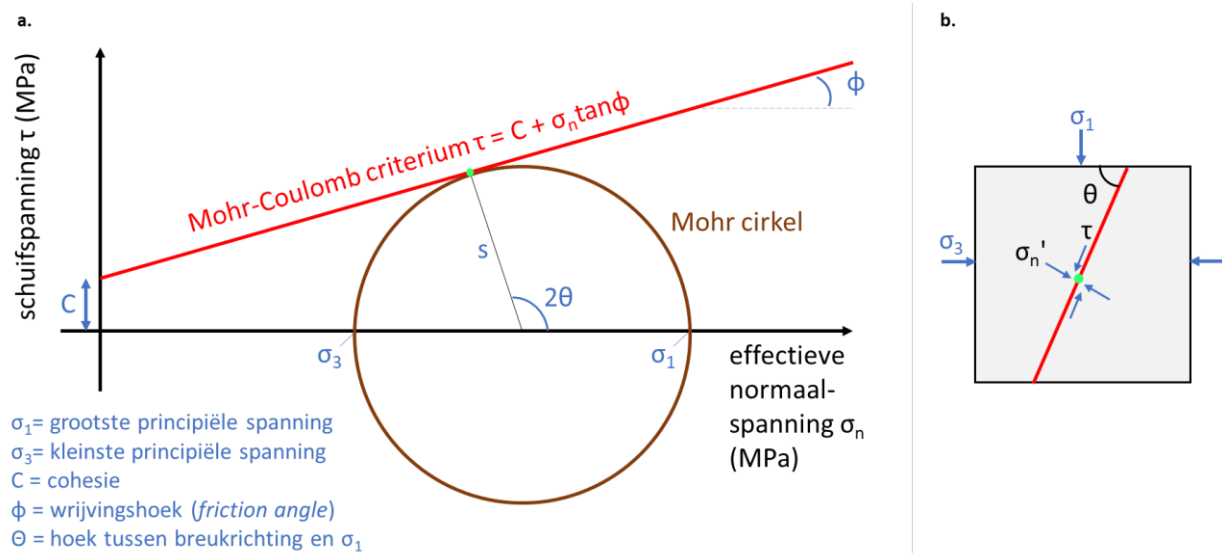
Breuken staan vaak onder een hoek in de ondergrond (Figuur 4b). De hoofdspansingen kunnen worden omgezet naar een effectieve spanning die haaks staat op de breuk (de effectieve normaalspanning σ_n'), en een schuifspanning parallel aan de breuk (τ). Deze twee spanningen bepalen samen met de breukeigenschappen of een breuk kan gaan bewegen, waarbij een hogere schuifspanning breukbeweging kan veroorzaken, terwijl een hogere effectieve normaalspanning breukbeweging juist tegengaat. De kritische spanning τ_f voor een breuk wordt gegeven door het Mohr-Coulomb criterium, ook wel het "*failure criterion*" genoemd. Dit criterium geeft de condities weer waarbij een isotroop materiaal zal breken bij een bepaalde combinatie van principiële spanningen.

$$\tau_f = \mu(\sigma_n - p) + C$$

met de breuk frictie coëfficiënt μ , de cohesie C .

De spanningen en het Mohr-Coulomb criterium (rode lijn in Figuur 4a) kunnen worden weergegeven in een Mohr-Coulomb grafiek. Op de x-as van de Mohr-Coulomb grafiek staat de effectieve normaalspanning σ_n' . Op de y-as van het Mohr-Coulomb diagram staat de schuifspanning τ . Het snijpunt van de rode lijn met de y-as is de breuksterkte of breuk cohesie (C in Figuur 4a), en de hellingshoek wordt bepaald door de breuk frictie coëfficiënt μ . In het Mohr-Coulomb diagram kan een zogenaamde 'Mohr cirkel' worden geconstrueerd die de hoofdspansingen (hier $\sigma_1' = \sigma_v'$ en $\sigma_3' = \sigma_{hmin}'$) die op de x-as zijn geplot met elkaar verbindt (bruine cirkel in Figuur 4a). Een punt op deze Mohr cirkel geeft de normaal- en schuifspanning weer op een breukvlak met een bepaalde oriëntatie (hier s); dit is 2-maal de hoek van de breukrichting met de minimale horizontale spanning (2θ in Figuur 4a). Als de breuk parallel aan of loodrecht op de hoofdspansingen staat ($2\theta = 0^\circ$ of $2\theta = 180^\circ$) is de schuifspanning nul (punt ligt op de x-as) en is de effectieve normaalspanning gelijk aan één van de hoofdspansingen. Hoe groter het verschil tussen de grootste en kleinste effectieve spanningen ($\sigma_1 - \sigma_3$), hoe hoger de schuifspanning op een breuk is.

Een breuk is kritisch gespannen als het punt op de Mohr-cirkel dat de breuk vertegenwoordigt op of boven het failure criterium plot. Als het eronder plot dan is er sprake van een stabiele situatie. In Figuur 4 is een situatie geïllustreerd waarbij een breuk die een hoek θ met de minimale horizontale stress richting maakt, kritisch gespannen raakt (groene punt).

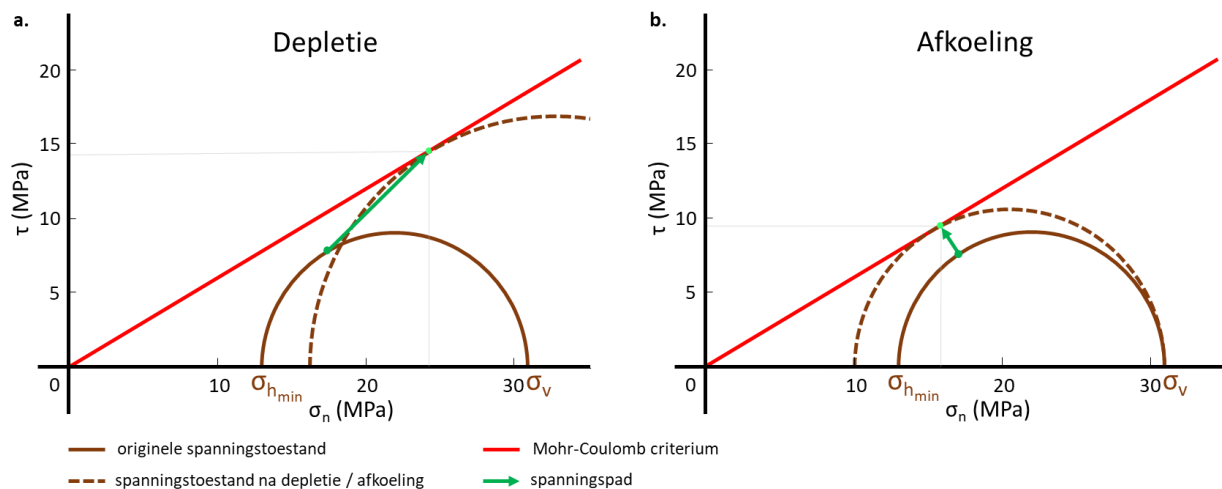


Figuur 4 a. Mohr-Coulomb diagram bij een situatie van kritische spanning, waarbij de Mohr-cirkel (bruin) de failure envelop (oftewel het Mohr-Coulomb criterium, rood) raakt (groene punt). b. Schematische voorstelling van doorsnede door de ondergrond met een onder een hoek staande breuk (rode lijn), de principiële spanningsrichtingen σ_1 en σ_3 en de effectieve normaalspanning en schuifspanningsrichtingen (σ_n' en τ).

Verschil tussen spanningsontwikkeling bij gas- en aardwarmtewinning uit matrix permeabele reservoirs

Door menselijke activiteit veranderen de spanningen in de ondergrond, afhankelijk van het type activiteit op een andere manier. Bij gaswinning wordt er gas onttrokken aan de ondergrond en daalt de druk in het reservoir. Dit leidt tot contractie (krimp) van het reservoir. In de verticale richting uit deze contractie zich als reservoir compactie en bodemdaling aan het oppervlak. Bij relatief platte reservoirs (breedte \gg reservoir hoogte) zal de totale verticale spanning nauwelijks veranderen. In de horizontale richting is het reservoir echter verbonden met de omliggende gesteenten en kan het niet vrij bewegen. De krimp van het reservoir zal dan leiden tot een afname van de totale horizontale spanningen. De verlaging van de reservoir druk leidt voor zowel de verticale als de horizontale spanningen tot een verhoging van de effectieve spanning. Omdat de totale verticale spanning vrijwel gelijk blijft, maar de totale horizontale spanning afneemt, neemt de verticale effectieve spanning meer toe dan de effectieve horizontale spanning. Dit is zichtbaar in het Mohr-Coulomb diagram: beide spanningscomponenten stijgen (verschuiven langs de x-as naar rechts), maar de verticale spanningscomponent stijgt het meest (Figuur 5a). De differentiële spanning ($\sigma_v - \sigma_{hmin}$) neemt dus toe, en dit kan leiden tot breukbeweging. De beweging van een punt op de Mohr-cirkel (de representatie van een breuk) van de originele positie naar de nieuwe wordt het spanningspad (*stress path*) genoemd. Voor gaswinning is het stress-pad naar rechtsboven (Figuur 5a, groene lijn): de spanningen worden groter, zowel de normale als de schuifspanning. De weergave van het spanningspad in deze grafiek is indicatief. Hoe het spanningspad in werkelijkheid precies verloopt is ook afhankelijk van de stijfheid van het gesteente, de reservoir geometrie en de dip van de breuk.

De spanningsverandering bij aardwarmtewinning uit matrix permeabele reservoirs is anders. Bij afkoeling van het gesteente en gelijkblijvende druk in het reservoir (want het formatiewater wordt rondgepompt en er wordt geen volume aan het reservoir onttrokken), zal het afgekoelde gesteente ook krimpen, net als bij drukdaling. Voor een relatief plat afgekoeld gesteentevolume (oftewel reservoir breedte \gg reservoir hoogte) vertaalt zich dit met name in een verlaging van de totale horizontale spanning, terwijl de totale verticale spanning gelijk blijft. Doordat de druk niet verandert, in tegenstelling tot bij depletie door gaswinning, is er geen effect van de druk op de effectieve spanningsveranderingen. Deze zijn dus gelijk aan de totale spanningsveranderingen. De σ_{hmin} verschuift langs de x-as naar links in het Mohr-diagram (Figuur 5b), terwijl σ_v gelijk blijft. Ook hier wordt als gevolg daarvan de Mohr-cirkel groter. Het spanningspad van eenzelfde punt gaat nu echter naar linksboven (Figuur 5b, groene lijn); de effectieve normaalspanning neemt af, en de schuifspanning neemt toe. De weergave van het spanningspad in deze grafiek is indicatief. Hoe het spanningspad in werkelijkheid precies verloopt is ook afhankelijk van de stijfheid van het gesteente, de reservoir geometrie en de dip van de breuk. Het verschil in spanningsontwikkeling als gevolg van depletie enerzijds en afkoeling anderzijds is uitgebreider beschreven door Buijze et al. (2023).



Figuur 5 Mohr-diagram illustratie van de verandering van de effectieve spanningstoestand in een typische situatie in de Nederlandse ondergrond ($\sigma_v > \sigma_{hmin}$) ten gevolge van a) depletie (door gaswinning) en b) afkoeling (door aardwarmtewinning). Beide illustraties gelden voor een situatie waarin is aangenomen dat de laterale reservoir extensie (breedte) vele malen groter is dan de hoogte.

Spanningsval

Als de schuifspanning de breuksterkte overschrijdt, kan verplaatsing plaatsvinden langs de breuk en wordt de opbouwde schuifspanning ontladen. Dit wordt uitgedrukt in spanningsval (*stress drop*, in MPa). Als deze spanningsval snel gebeurt, resulteert dit in het ontstaan van seismische golven – een aardbeving. De spanningsval beïnvloedt de magnitude van de aardbeving.

Als een breuk gaat bewegen dan ontlad de schuifspanning op de breuk zich en zal een punt (representatie van de breuk) dat zich op of boven het Mohr-Coulomb criterium bevond zich in het diagram abrupt naar beneden bewegen tot een punt onder deze lijn. Uitgaande van eenzelfde initiële ondergrondse spanningstoestand zal, conform het hierboven beschreven verschil ontwikkeling van het spanningspad bij aardwarmtewinning en bij gaswinning, de maximaal mogelijke spanningsval bij

aardwarmtewinning uit matrix permeabele reservoirs lager zijn dan bij gaswinning omdat bij afkoeling de spanning minder compressief is geworden (Mohr cirkel schuift naar links). Figuur 5 illustreert dat vanuit eenzelfde initiële situatie, de schuifspanning na drukdepletie door gaswinning meer is verhoogd dan na afkoeling door aardwarmtewinning. Als gevolg daarvan zou, in geval van een breukbeweging, bij afkoeling de (maximale) spanningsval minder hoog kunnen zijn dan bij depletie. Dit zou betekenen dat indien een breuk in eenzelfde gebied (of gebied met vergelijkbare initiële spanningstoestand) seismisch zou gaan bewegen ten gevolge van aardwarmtewinning, deze naar verwachting een lagere magnitude zou hebben dan een beving ten gevolge van gaswinning. Dit is onder de aanname dat de alle overige reservoir- en breukeigenschappen vergelijkbaar zijn.

Daarnaast is een belangrijk verschil tussen gas- en aardwarmtewinning dat bij gaswinning het hele oppervlak van een breuk aanpalend het gasreservoir in één keer de kritisch spanningsdrempel kan overschrijden, terwijl bij aardwarmtewinning uit matrix permeabele reservoirs het kritisch gespannen gedeelte klein begint en zich in de loop van de tijd uitbreidt. Bij gaswinning gaat de drukdaling geleidelijk, maar wordt door het hele gedeelte van de breuk dat het reservoir begrensd 'gevoeld' worden. Wanneer de drukdaling dusdanig is dat hiervoor de kritische spanningsdrempel wordt overschreden, zal dit oppervlak in één keer kunnen gaan bewegen. Dit in tegenstelling tot aardwarmtewinning uit matrix permeabele reservoirs, waarbij temperatuurdaling de belangrijkste reden is dat breuken kritisch gespannen kunnen raken. Bij aardwarmtewinning wordt naar verwachting het afgekoelde gedeelte van het breukoppervlak steeds groter naarmate de productie vordert. De kritische drempel qua spanning op het breukoppervlak wordt daardoor eerst op een klein stukje breukoppervlak bereikt. Pas op het eind van de levensduur van het project wordt de maximale extensie van de koudebel bereikt, en is het gedeelte van het breukvlak dat afgekoeld is (en mogelijk kritisch gespannen zou kunnen raken) het grootst. De verwachting is dat gedurende de periode van afkoeling en kritisch gespannen raken van kleine stukjes van het breukvlak regelmatig kleine stukjes van de breuk zullen gaan bewegen (Buijze et al. 2021, 2023; Wassing et al., 2021). Die bewegingen zouden kunnen resulteren in, naar verwachting, niet voelbare (maar wellicht wel meetbare) seismiciteit. Door gebrek aan voldoende gedetailleerde meetgegevens bij matrix permeabele aardwarmtesystemen is dit laatste momenteel echter nog niet te bewijzen.

--- EINDE KADER ---

Wettelijk- en beleidskader

De SDRA is een vereiste bij het uitvoeren van aardwarmteactiviteiten in de diepe ondergrond volgens de Mijnbouwwet (MBW), het Mijnbouwbesluit (MBB), de Mijnbouwregeling (MBR) (allen versie ingangsdatum 1 juli 2023) en de daaronder liggende handreikingen. Bij het aanvragen van de start- en vervolvergunningen voor aardwarmte dient een SDRA aangeleverd te worden. Bij wijzigingen in de productiestrategie dient de SDRA geactualiseerd te worden.

Referentie naar artikelen in Mijnbouwwet, -besluit en -regeling

In de MBW-artikelen 24 en 33 wordt het seismische dreiging- en risico onderwerp behandeld.

In MBW Artikel 24o (startvergunning) en Artikel 24af (vervolvergunning) staat dat de aanvraag van een vergunning een beschrijving dient te bevatten van: *“...d. de (in 24 af: ‘gemeten en de’) verwachte bodembeweging ten gevolge van de winning; e. indien dit nodig is gelet op de verwachte bodembeweging: 1°. de veiligheidsrisico’s voor omwonenden, het risico op schade aan gebouwen of infrastructurele werken of het risico op verstoring van de functionaliteit daarvan; 2°. de maatregelen die worden genomen om bodembeweging te voorkomen of te beperken; 3°. de maatregelen die worden genomen om schade door bodembeweging te voorkomen of te beperken;”*.

Samengevat staat hier dat voor iedere start- en vervolvergunning de bodembeweging bepaald moet worden en, indien de bodem kan gaan bewegen, het risico bepaald moet worden.

Weigeringsgronden voor het geven van een vergunning, voorschriften of beperkingen te verbinden aan, of wijzigen of intrekken van, een vergunning worden gegeven (voor een startvergunning) in MBW Artikel 24t, 24w, 24ab en (voor een vervolvergunning) in MBW Artikel 24ag, 24aj, 24ao, allen in de bewoordingen gelijkend op *“...c. de in de aanvraag beschreven opsporing en winning onaanvaardbare risico’s met zich brengt voor de veiligheid van omwonenden of onaanvaardbare schade kan veroorzaken aan gebouwen of infrastructurele werken of de functionaliteit daarvan ...”*.

Indien de risico’s van bodembeweging de veiligheid in het geding brengen of onaanvaardbare schade veroorzaken, kan de vergunning dus geweigerd worden.

MBW Artikel 33 lid 3 en 4 stelt dat een houder of een uitvoerder van een startvergunning aardwarmte of een vervolvergunning aardwarmte *“neemt alle maatregelen die redelijkerwijs van hem gevergd kunnen worden om te voorkomen dat als gevolg van de verrichte activiteiten: a. ...; b. schade door bodembeweging wordt veroorzaakt; c. de veiligheid wordt geschaad.”*.

Naast het bepalen van het risico, proberen de vergunninghouder en de uitvoerder dus bodembeweging, schade en risico’s te voorkomen.

In het MBB worden een aantal punten nader uitgewerkt. In MBB Artikel 29p (voor een startvergunning) en MBB Artikel 29s (voor een vervolvergunning) lid 1a. wordt gesteld *“in verband met onaanvaardbare risico’s voor de veiligheid van omwonenden in hoeverre wordt voldaan aan de norm voor het lokaal persoonlijk risico van maximaal 1 op de 100.000 per jaar dat een individu mag lopen in of nabij de verschillende bouwwerken waar dat individu verblijft, als gevolg van bodemtrilling door de opsporing en winning van aardwarmte;”*.

Oftewel, in de wetgeving wordt geen expliciete schadenorm benoemd. Wel wordt benoemd dat de jaarlijkse kans op overlijden kleiner moet zijn dan 1 op 100.000.

In hetzelfde artikel 29p onder lid 1b is de financiële draagkracht van de aanvrager het onderwerp en wordt het kader gegeven voor de aansprakelijkheden en de eventuele daarbij behorende kosten. *“in verband met de financiële mogelijkheden van de aanvrager: 1°. de financiële omstandigheden van de aanvrager; 2°. de wijze waarop de aanvrager voornemens is de kosten voor de opsporing en winning van aardwarmte en de daarbij behorende aansprakelijkheden en de kosten voor het geheel of gedeeltelijk buiten gebruik stellen van een boorgat tijdens of na afloop van de looptijd van de startvergunning te dragen; 3°. afspraken tussen de aanvrager en de uitvoerder aardwarmte over het dragen van de kosten voor de bij de opsporing en winning behorende aansprakelijkheden, indien deze zijn gemaakt.”*

Op basis van bovengenoemd artikel zal bij de vergunningsaanvraag een indicatief potentieel schadebedrag moeten worden bepaald.

In MBB Artikel 29w wordt gesteld dat *“...1. Onze Minister kan aan een startvergunning of vervolgvvergunning in ieder geval voorschriften of beperkingen verbinden die betrekking hebben op: a. de seismische risicoanalyse; b. het meten, registreren en melden van bodembeweging als gevolg van de opsporing of winning van aardwarmte; c. de wijze van handelen in geval van bodembeweging als gevolg van de opsporing of winning van aardwarmte. ...”*.

In de vergunningen kunnen monitoringsverplichtingen opgenomen worden. En hieraan gekoppeld, een seismisch risico beheerssysteem.

In de MBR staan de volgende artikelen of delen daarvan, die relevant zijn voor de SDRA-aardwarmte. Deze gaan met name over wat er aangeleverd moet worden bij de aanvraag van de diverse vergunningsaanvragen:

“Art 1.3b.1

1. ...bevat de aanvraag voor een toewijzing zoekgebied aardwarmte: ...

d. een beschrijving van de eerder voorgekomen natuurlijke en geïnduceerde seismiciteit;

e. een beschrijving van de breuken en de plaats daarvan;”

“Art 1.3b.2

1. ...bevat de aanvraag voor een startvergunning aardwarmte: ...

3. De aanvrager verstrekt bij de aanvraag ten aanzien van de bodembeweging:

a. een beschrijving van de verwachte mate van bodemdaling aan het einde van de winning waaruit de verwachte bodemdaling als gevolg van de voorgenomen opsporing en winning afzonderlijk en de cumulatieve bodemdaling in verband met andere mijnbouwactiviteiten blijkt;

b. een kaart waarop de bodemdalingscontouren als gevolg van de voorgenomen opsporing en winning met betrekking tot het aangevraagde gebied, de door de provinciale staten op grond van artikel 1.2, tweede lid, onderdeel a, van de Wet milieubeheer met het oog op de waterwinning aangewezen gebieden, en de Natura 2000-gebieden, bedoeld in artikel 1.1. van de Wet natuurbescherming, zijn aangegeven;

- c. een onderbouwing van de kans op schade door bodemdaling als gevolg van de voorgenomen opsporing en winning aan gebouwen of infrastructurele werken of de functionaliteit daarvan en aan natuur en milieu en een beschrijving van de omvang en aard daarvan;
- d. een seismische dreigings- en risicoanalyse van de bodemtrilling als gevolg van de voorgenomen opsporing en winning waarbij de natuurlijke bodemtrilling en de interferentie met andere mijnbouwactiviteiten worden meegenomen, en waaruit blijkt of aan de norm, bedoeld in artikel 29p, eerste lid, onderdeel a, van het besluit, is voldaan;
- e. een onderbouwing van de kans op schade door bodemtrilling als gevolg van de voorgenomen opsporing en winning aan gebouwen of infrastructurele werken of de functionaliteit daarvan en aan natuur en milieu en een beschrijving van de omvang en aard daarvan;
- f. een beschrijving van de wijze van monitoring van bodemtrilling;
- g. het seismisch risicobeheersplan waarin de wijze van handelen bij het optreden van bodemtrilling wordt beschreven, welke drempelwaarden worden gehanteerd voor het nemen van maatregelen en welke maatregelen in dat geval worden genomen.”

Artikel 1.3b.4

1. ...bevat de aanvraag voor een vervolvergunning aardwarmte:

.....;

b. de gegevens, bedoeld in artikel 1.3b.2, tweede en derde lid, voor zover die de winning van aardwarmte betreffen en met dien verstande dat uit de gegevens, bedoeld in artikel 1.3b.2, derde lid, onderdeel d, blijkt of aan de norm, bedoeld in artikel 29s, eerste lid, onderdeel a, van het besluit, is voldaan;

c. een overzicht waaruit blijkt wat de wijzigingen van de gegevens, bedoeld in de onderdelen a en b, ten opzichte van de eerder ingediende aanvraag startvergunning voor het aangevraagde gebied zijn.

Bovenstaande artikel geeft weer dat bij de aanvraag van een vervolvergunning de seismische dreigings- en risicoanalyse geactualiseerd moet worden met gebruik van de gegevens geacquireerd in de periode tussen start van de boring in de startvergunning en het moment van aanvraag vervolvergunning.

In de toelichting bij de MBR staat hierover verder:

“Met betrekking tot bodembeweging, en specifiek bodemtrilling, inventariseert de aanvrager de voor de aanvraag relevante natuurlijke en geïnduceerde seismiciteit en overlegt een seismische dreigings- en risicoanalyse waaruit blijkt in welke risicoklasse het project valt. Daarin onderbouwt de aanvrager of het project een verwaarloosbaar dreigingsniveau ten aanzien van seismiciteit heeft en zo niet, met een nadere risicoanalyse of het risiconiveau voldoet aan de norm voor het lokaal persoonlijk risico van 10-5. Tevens geeft de aanvrager een beschrijving van de manier waarop bodemtrilling wordt gemonitord. Daarnaast moet de aanvraag een plan voor het beheersen van het seismisch risico bevatten. Hierin is beschreven hoe binnen het winningsgebied de seismiciteit wordt gemonitord en welke maatregelen getroffen kunnen worden wanneer bodemtrilling optreedt. In de praktijk wordt dit het seismisch respons protocol (SRP) genoemd. Onderdeel van het seismisch respons protocol is het Traffic Light System (TLS) waarin vastgelegd wordt bij welke drempelwaarden bepaalde maatregelen worden genomen. ...”

Kamerbrief t.a.v. verantwoord omgaan met risico's en onzekerheden bij aardwarmtewinning
Op 20 oktober 2022 is door de minister de kamerbrief over 'Beleid voor verantwoord omgaan met fysieke risico's en onzekerheden bij geothermie' verzonden aan de Tweede Kamer (EZK, 2022). Deze brief geeft nadere duiding aan de invulling van de wettelijke vereisten.

De Kamerbrief stelt onder anderen:

- *"... met alle risico's verantwoord en proportioneel moet worden omgegaan, waarbij voor eenzelfde risico geen strengere eisen worden gesteld aan duurzame energie dan aan fossiele energie";*
- *"... dat onzekere risico's tegemoet worden getreden met voorzorgsmaatregelen". En dat "Als een situatie voldoet aan het vereiste veiligheidsniveau, mogen eventuele eisen tot verdere risicoreductie geen onredelijke wrijving veroorzaken met andere publieke belangen rond de energietransitie." De Kamerbrief stelt ook dat "... de kans op schadeveroorzakende seismische activiteit klein is bij de in ons land gebruikelijke aanpak van geothermie".*

De veiligheidsnorm wordt nader geadresseerd in de bijlage bij de Kamerbrief:

"Een veiligheidsnorm wordt doorgaans uitgedrukt in een overlijdenskans, waaraan de toelaatbaarheid van het veiligheidsrisico kan worden afgemeten. Het hooglerarenpanel adviseert om een individueel risico van meer dan 1 op de 100.000 (ook wel aangeduid als 10^{-5}) per jaar als gevolg van seismiciteit door geothermie of een andere mijnbouwactiviteit te beschouwen als een onaanvaardbaar veiligheidsrisico."

Met betrekking tot de vertaling van deze veiligheidsnorm naar het seismiciteitsdomein zegt de bijlage bij de Kamerbrief:

"Bevingen van magnitude 3,5 kunnen zeker schade veroorzaken, maar serieuze veiligheidsrisico's die mogelijk de norm van 10^{-5} overschrijden ontstaan pas bij veel zwaardere schade door seismiciteit ruim boven deze magnitude."

De veiligheidsnorm zelf kan dus niet vertaald worden in een maximale magnitude. Er kan wel aangenomen worden dat de veiligheidsnorm niet overschreden wordt bij bevingen met een magnitude van 3,5 op 3-4 km diepte. Dit blijkt ook uit een andere passage in de bijlage:

*"Als een operator kan laten zien dat de bestaande en redelijkerwijs te verzamelen kennis erop wijst dat eventuele **seismiciteit beneden de magnitude 3,5** zal blijven, is daarmee voldoende aannemelijk dat in elk geval **het veiligheidsrisico ruimschoots aan de norm voldoet.**"*

Met betrekking tot de methodiek om een inschatting te maken met betrekking tot het veiligheidsrisico, stelt de bijlage bij de Kamerbrief:

*"Rekenen met te weinig gegevens geeft alleen schijnnaauwkeurigheid, en zodoende heeft een rekenkundige bepaling van het veiligheidsrisico van geothermieprojecten voorlopig nog geen zin. Er is dus een andere methodiek nodig om de veiligheid objectief en verifieerbaar te kunnen inschatten. Het hooglerarenpanel adviseert om de onzekerheid transparant te maken door een **theoretisch zwaarste aardbeving te benoemen. Hier wordt geen overschrijdingskans aan verbonden, aangezien er te weinig bekend is over de kans van optreden van zo'n zeldzame beving.**"*

Over de praktische invulling van het aantonen door de operator (of initiatiefnemer) dat het project zal voldoen aan de veiligheidsnorm zegt de bijlage verder:

*“Om een vergunning te krijgen moet een initiatiefnemer onder meer **voldoende aannemelijk maken** dat zijn geothermieproject volgens een **realistische schatting** zal voldoen aan de veiligheidsnorm (overlijdenskans van 1 op de 100.000 per jaar)” en “Analyses van de mate waarin een project een veiligheidsrisico heeft worden gebaseerd op **realistische schattingen**, zonder opeenstapeling van conservatieve aannames, en met een duidelijke relatie tot de veiligheidsnorm.”.*

De hierboven dik gedrukte stukken zijn als volgt geïnterpreteerd bij het maken van de SDRA:

- Voldoende aannemelijk maken: met de huidig beschikbare technische kennis, waar mogelijk omgezet in pragmatische modellen en/of berekeningen en met gebruikmaking van de momenteel beschikbare parameterdata.
- Realistische schatting: een inschatting met een bandbreedte waaruit de meest realistische waarde, oftewel de verwachtingswaarde (ook wel de gemiddelde of 'P_{mean}'-waarde) gekozen wordt (voor verdere toelichting op deze interpretatie zie ook de sectie 'Koppeling seismociteitsinschatting met het beleidsdomein').

Verdere interpretaties van de wettelijke- en beleidstukken en implicaties voor de SDRA zijn gegeven in het hoofdstuk 'Implicatie van de kaders voor de SDRA Aardwarmte en verantwoording van de nieuwe methodiek'.

De bijlage bij de Kamerbrief geeft ook nog een nadere duiding met betrekking tot eventuele schade veroorzaakt ten gevolge van aardwarmteprojecten:

“Bij conventionele geothermie buiten de nabijheid van voorgespannen breuken is de kans op schade door seismociteit klein volgens deskundige inschattingen, maar dat neemt niet weg dat er onzekerheden zijn. Er is daarom een breed scala aan voorzorgsmaatregelen en ook is alertheid nodig bij het toepassen van nieuwe inzichten.”.

“Het risico wordt overigens niet veroorzaakt door seismociteit op zichzelf, maar door het bovengrondse effect daarvan. Lichte gebouwschade (categorie DS1) is volgens TNO mogelijk wanneer een aardbeving op een diepte van een geothermiedoublet overeen zou komen met een magnitude van ongeveer 2,5. TNO gaat ervan uit dat bij magnitudes vanaf 3,5 op een diepte van 3-4 kilometer schade kan ontstaan die sterker is dan de schadecategorie DS1. De feitelijke effecten zullen mede afhangen van locatiespecifieke factoren, zoals opslingerings- of dempingsgedrag van de ondiepe ondergrond en de constructieve sterkte van gebouwen.”.

Het introduceren van een expliciete schadenorm wordt conform een eerder advies van het hooglerarenpanel ontraden:

“Het panel ziet geen mogelijkheden om een objectieve en werkbare norm te bepalen voor de kans dat schade optreedt aan een object als gevolg van geothermie, en adviseert om geen schadenorm te introduceren. Ik neem dat advies over.”.

De bijlage gaat in op de in de MBW genoemde 'onaanvaardbare schade', die vermeden dient te worden:

“De Mijnbouwwet stelt dat geothermie niet mag leiden tot onaanvaardbare schade. De Nederlandse beleidspraktijk voor activiteiten die schade kunnen veroorzaken kent geen kwantitatieve norm die een bepaalde kans op schade vooraf kwalificeert als (on)aanvaardbaar.”.

In de bijlage wordt voorts als volgt een duiding gegeven van het begrip ‘onaanvaardbare schade’:

“Ten eerste is schade onaanvaardbaar als die de veiligheidsnorm zou overschrijden. Ten tweede kan de kans op eventuele schade aan objecten die ontstaat ondanks dat de operator heeft voldaan aan alle wet- en regelgeving - inclusief voldoende voorzorg om de kans op geïnduceerde seismiciteit te minimaliseren en schade te voorkomen - als aanvaardbaar worden beschouwd mits het zeker is dat deze schade wordt vergoed.”.

Hieruit blijkt dat zolang er binnen de veiligheidsnorm wordt gebleven, een risico op schade aanvaardbaar is. In termen van seismiciteit betekent dat, zolang er aannemelijk kan worden gemaakt dat er beneden de magnitude 3,5 wordt gebleven, waarmee volgens de brief ruimschoots binnen de veiligheidsnorm als ook binnen schadecategorie DS1 (lichte schade) wordt gebleven, de risico's aanvaardbaar zijn. Dit alles mits het zeker is dat deze schade vergoed kan worden.

Vergunningskader

Zoals gegeven in de voorgaande sectie is het eenduidig en expliciet beschreven in de MBW, MBB en MBR dat een seismische dreigings- en risicoanalyse moet worden uitgevoerd en gerapporteerd bij een aanvraag startvergunning of vervolvergunning.

Voor de aanvraag ‘toewijzing zoekgebied’ wordt geen melding gemaakt voor het uitvoeren en overleggen van een SDRA. Daar dient alleen de seismiciteitsdreiging meegenomen te worden. Derhalve hoeft er geen SDRA te worden uitgevoerd ter ondersteuning van een aanvraag toewijzing zoekgebied. In artikel 24e sub 1c. wordt gesteld dat een aanvraag om een toewijzing zoekgebied een beschrijving bevat van “een plan voor de wijze waarop de aanvrager voornemens is de aardwarmte op te sporen en te winnen”. Het ligt in de lijn der verwachting dat in het voornoemde plan ten minste rekening wordt gehouden met het uitvoeren van een SDRA in de exploratiefase ondersteunend aan de beoogde aanvraag startvergunning. Door het aangevraagde areaal “zoekgebied” te kruisen met gebieden die gevoelig zijn voor seismiciteit kan de uitwerkingsrichting van de SDRA die in het verschiet ligt al inzichtelijk gemaakt worden en kan daarmee in het plan rekening worden gehouden.

Implicatie van de kaders voor de SDRA Aardwarmte en verantwoording van de nieuwe methodiek

De nieuw ontworpen SDRA Aardwarmte, is een 'tool' die invulling moet geven aan de eisen zoals op dit gebied gesteld in de MBW en daaraan gerelateerde documenten. De belangrijkste eisen zijn het voorkomen van veiligheidsrisico's en onaanvaardbare schade ten gevolge van bodembewegingen door aardwarmtewinning, alsmede het nemen van maatregelen om de kans op schade te beperken. Daarnaast moet de SDRA, in de woorden van het hooglerarenpanel, een op korte termijn bruikbare, 'robuuste beslismethodiek' omvatten. Dit is geïnterpreteerd als dat het een objectief, integer en pragmatisch instrument dient te zijn.

Het doel van de SDRA is een adequate risicoclassificatie van een geothermisch project te geven. Hiervoor moet een inschatting worden gemaakt van de seismische dreiging, de ondergrond, en, bij mogelijke dreiging, de eventuele bovengrondse impact hiervan in termen van schade en veiligheid.

Inschatten seismiciteit bij aardwarmtewinning

Momenteel is de verwachting dat er in Nederland geen voelbare aardbevingen zullen optreden ten gevolge van aardwarmtewinning in matrix permeabele reservoirs, zolang men buiten de voorgespannen gebieden blijft (de gebieden waar de breuken in de ondergrond (nabij) kritisch gespannen zouden kunnen zijn voorafgaand aan de start van een aardwarmteproject). Als breuken in matrix permeabele reservoirs binnen de invloedssfeer van aardwarmtesystemen door de productie onder kritische spanning komen te staan is de verwachting dat ze óf geleidelijk (a-seismisch) zullen bewegen, óf met kleine schokjes per keer zullen bewegen, die niet voelbaar zijn. Dit laatste op basis van de verwachting dat bij aardwarmtewinning het breukvlak geleidelijk wordt afgekoeld, waardoor kleine stukjes van de breuk kritisch worden en dan gaan bewegen, in plaats van dat er grote gedeeltes van het breukvlak tegelijkertijd kritisch gespannen raken en daarmee een voelbare aardbeving kunnen veroorzaken. Dit zou in overeenstemming zijn met het feit dat er tot nu toe wereldwijd geen geregistreerde, voelbare aardbevingen bij aardwarmtewinning uit matrix permeabele reservoirs zijn waargenomen.

Echter, op dit moment kunnen deze verwachtingen nog niet wetenschappelijk volledig onderbouwd worden, en ontbreken ook de meetgegevens rond aardwarmteprojecten om de (stukjes) theorie mee te kalibreren. Daarom is een seismische dreigings- en risicoanalyse bij aardwarmteprojecten noodzakelijk, in lijn met het voorzorgsprincipe zoals dat in de wet wordt gehanteerd.

Zoals uit het technische kader is gebleken, is het vooralsnog ook nog niet mogelijk te bepalen wat de kans van optreden van een door aardwarmtewinning geïnduceerde aardbeving is en indien hij optreedt, wanneer dit zal zijn. Daarnaast is het ook niet eenduidig te bepalen wat de kracht van een eventuele beving zal zijn en dus ook niet wat de bijbehorende piekgrondsnelheid kan zijn. Derhalve is tijdens het SDRA-ontwerpproces geconcludeerd dat het niet mogelijk is het exacte seismische risico of het expliciete schaderisico van een project te bepalen en het dan ook onmogelijk is daarop een toets uit te voeren. Dit wordt onderschreven door de Kamerbrief over het risicobeleid.

Wat op dit moment wel mogelijk wordt geacht, is het screenen van een project op een aantal dreigingsfactoren in combinatie met het geven van een indicatie, voor projecten waarbij de dreiging niet als verwaarloosbaar wordt ingeschat, van de kracht en intensiteit van een aardbeving uitgaande van een 'grootst (theoretisch) geloofwaardige aardbeving' scenario ('*largest credible earthquake*' scenario) met een heel lage waarschijnlijkheid van optreden.

In de screeningsfase kan worden gekeken of er potentiële dreigingsfactoren zijn voor het induceren van seismiteit, waaronder de primaire benutting van breukpermeabiliteit, of mogelijke overlap van het project met voorgespannen gebieden (gebieden waar de ondergrond mogelijk (nabij) kritisch gespannen zou kunnen zijn voorafgaand aan de start van het aardwarmteproject). Als dit niet het geval is, en er ook geen breuk aanwezig is in het invloedsgebied van het aardwarmteproject, is er in principe geen seismische dreiging (en dus ook geen risico). Is er wel een breuk aanwezig binnen het invloedsgebied, dan kan een inschatting worden gemaakt of deze breuk potentie heeft om te gaan bewegen. Als uit berekeningen blijkt dat het vrijwel uitgesloten is dat de breuk kan gaan bewegen bij project-specifieke operationele condities, dan kan de dreiging als verwaarloosbaar worden beschouwd. Mocht het wel mogelijk blijken de breuk ten gevolge van de aardwarmtewinning te reactiveren, dan is het niet gezegd dat deze beweging seismisch zal zijn. Omdat de kennis, data en modellen op dit moment niet toereikend zijn om een inschatting te maken van de seismogeniteit van een breuk (kans dat deze a-seismisch of seismisch zal gaan bewegen), in ieder geval niet middels een algemeen geaccepteerde standaard en in de praktijk voor aardwarmteprojecten haalbare methode, wordt daarom noodzakelijkerwijs de sterkte en intensiteit van een aardbeving in een *'largest credible earthquake'* scenario gebruikt voor de risico-inschatting. De waarschijnlijkheid van optreden van zo'n aardbeving is zeer klein.

Dit *'largest credible earthquake'* scenario betreft een beving die pas optreedt op een breuk op het moment dat de spanningsverandering op de breuk ten gevolge van het aardwarmteproject maximaal is, uitgaande van het opgelegde debiet en injectietemperatuur. Dit is als een breuk in het geothermische invloedsgebied qua oppervlak en temperatuur maximaal is afgekoeld. De hoogte van de magnitude van deze beving, $M_{\text{largest credible earthquake}}$ (M_{LCE}), is afhankelijk van onder meer het afgekoelde breukoppervlak en de grootte van de spanningsval ten gevolge van de breukbeweging.

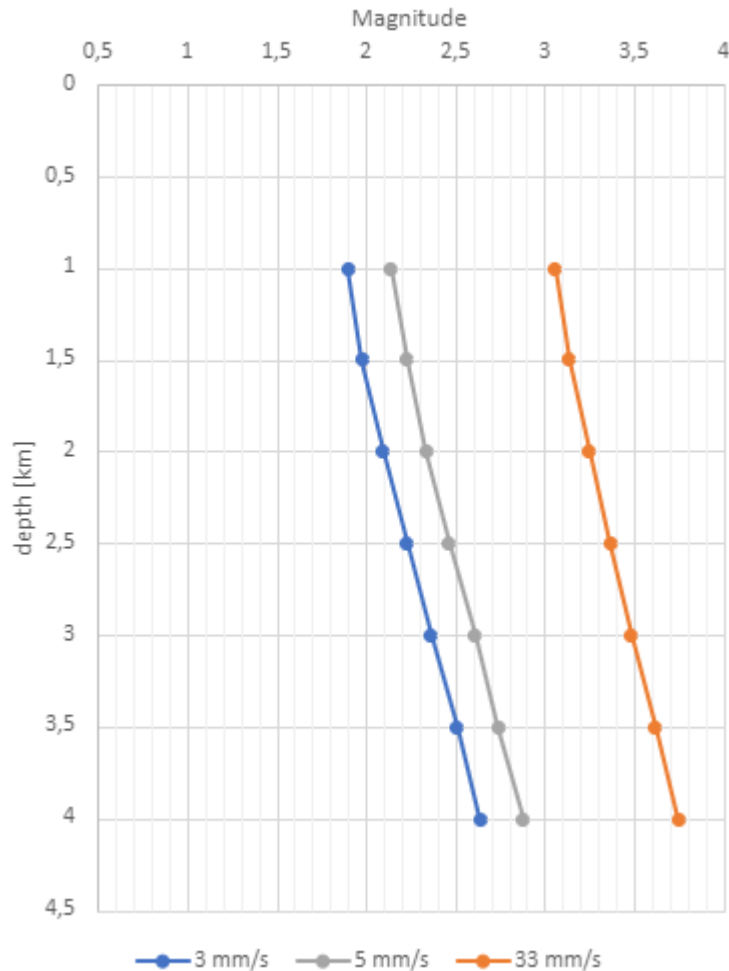
Gegeven de onzekerheden in de data en het nog ontbreken van kennis en modellen die de kans van optreden en de magnitude van geïnduceerde aardbevingen ten gevolge van aardwarmtewinning kunnen voorspellen, is er voor de berekening van M_{LCE} voor een pragmatische aanpak gekozen waar een aantal aannames aan ten grondslag liggen. De meeste aannames zijn zodanig gekozen dat het een conservatieve keuze betreft en dus het optreden van een aardbeving waarschijnlijker wordt ingeschat dan werkelijk het geval zou zijn.

Koppeling seismiciteitsinschatting met het beleidsdomein

Veiligheidsrisico

De *'largest credible earthquake'* scenario uitkomst wordt getoetst tegen de wettelijke norm ten aanzien van het lokaal persoonlijk risico (LPR, gedefinieerd als *'lokaal persoonlijk risico van 1 op de 100.000 dat een individu mag lopen'*), ofwel het veiligheidsrisico. Volgens de Kamerbrief (EZK, 2022), wordt ruimschoots onder het veiligheidsrisico gebleven bij een aardbeving met een maximale magnitude van 3,5. Deze vertaling van de veiligheidsnorm is als uitgangspunt genomen voor de nieuw ontworpen SDRA. De consequenties van een aardbeving aan het maaiveld (en dus voor het risico) zijn afhankelijk van de daar bereikte piekgrondsnelheid of *"Peak Ground Velocity"* (PGV). Het ligt dus in de lijn der verwachting dat een inschatting van de PGV aan de basis ligt van de dreigings- en risico-inschatting. Voor gebruik in de SDRA is de in de Kamerbrief als norm gestelde magnitude van 3,5 daarom omgezet naar een piekgrondsnelheid (PGV) waarde. Dit is gedaan middels een voor Nederland geldige *ground motion prediction equation* (GMPE, Ruigrok en Dost, 2020). De in de Kamerbrief genoemde magnitude van 3,5 is gebaseerd op onderzoek van TNO en dat betrekking had op aardbevingen op een diepte van 3-4 kilometer. Bij de omzetting naar PGV is uitgegaan van een $M_{3,5}$ op 3 kilometer diepte (het meest

conservatief). Dit resulteert in een PGV-waarde van 33 mm/s. Deze PGV-waarde wordt voor de SDRA aangehouden als de maximaal toelaatbare consequentie van de 'largest credible earthquake' berekend voor het aardwarmteproject. Voor de SDRA betekent dit dat voor dieptes minder dan 3 km de maximaal toelaatbare magnitude lager dan 3,5 zal liggen, omdat aardbevingen op geringere dieptes al bij een lagere magnitude deze groundbeweging zullen veroorzaken (Figuur 6).



Figuur 6 Iso PGV-lijnen op het epicentrum van een aardbeving (o.b.v. Ruigrok en Dost, 2020). Op geringere dieptes zal een beving met een kleinere magnitude eenzelfde PGV-waarde tot gevolg hebben als een beving met een hogere magnitude op grotere diepte (bijvoorbeeld: een beving van magnitude 3,5 op 3 km diepte en een beving van magnitude 3,1 op 1 km diepte geven beide een PGV van 33 mm/s).

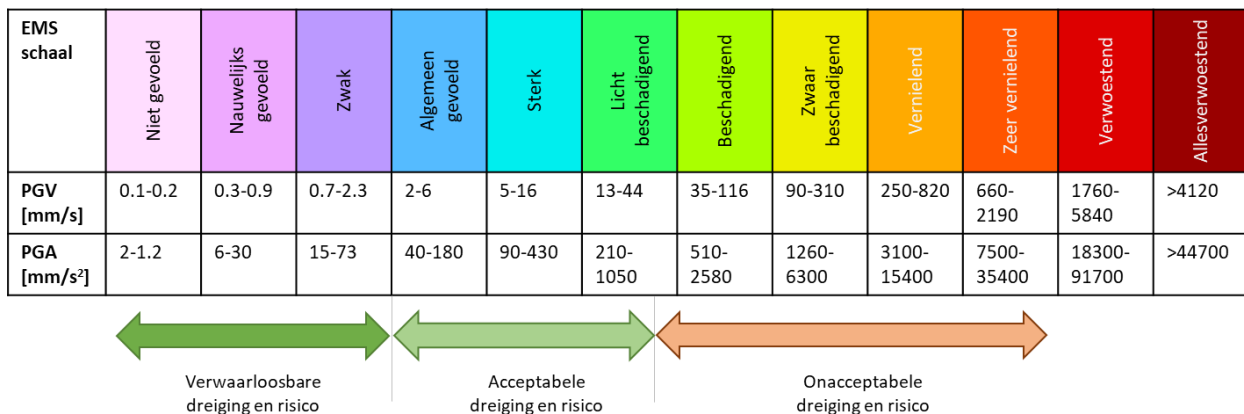
In de praktijk zal binnen de SDRA een inschatting gemaakt moeten worden van de 'largest credible earthquake' consequentie van het aardwarmteproject (M_{LCE} , zie vorige sectie). Deze zal moeten worden vertaald middels de GMPE naar een 'largest credible earthquake' PGV-waarde (PGV_{LCE}). Op beide berekeningen moet de onzekerheden ten aanzien van de invoerwaarden worden meegenomen, wat resulteert in een groot aantal mogelijke gelijkwaardige uitkomsten. Uit de Kamerbrief blijkt dat de inschatting of een project onder de M3,5 blijft (zie hierboven voor meer details t.a.v. deze norm) gemaakt kan worden op basis van 'realistische parameters, zonder stapeling van conservatieve aannames'. Dit is geïnterpreteerd als de verwachtingswaarde uitkomst (de ' P_{mean} ') van de volledige set uitkomsten. Deze geeft een realistische en voor de SDRA bruikbare inschatting van een op zichzelf al

conservatief 'largest credible earthquake' (LCE) scenario. Voornaamste conservatieve aannames in dit LCE-scenario zijn dat

1. Er een aardbeving gaat optreden, dus dat de slip beweging langs de breuk 'seismisch' zal zijn, terwijl dit niet noodzakelijkerwijs het geval hoeft te zijn en bij matrix permeabele geothermieproject ook nog zelden is waargenomen (mogelijk slechts éénmaal een niet-voelbare beving geregistreerd)
2. Er wordt gerekend met een spanningsval ('stress drop') waarde aan het eind van de levensduur van het aardwarmteproject, dus de maximaal mogelijke, terwijl het meer waarschijnlijk wordt geacht dat de spanningsval op de breuk in kleine stapjes zal gaan en dus eerder zal leiden tot meerdere hele kleine (niet voelbare) bevingen

Schaderisico

Uit het wettelijk- en beleidskader blijkt dat, zolang er binnen de veiligheidsnorm wordt gebleven, een risico op schade aanvaardbaar is mits het zeker is dat deze schade vergoed kan worden. Dit laatste moet geverifieerd worden bij het toetsen van de vergunningsaanvraag. Derhalve is een indicatie van het maximaal potentiële schadebedrag nodig als onderdeel van de SDRA. Uit de koppeling van de EMS schaal en de PGV-waardes, is bekend dat vanaf een waarde van ca. 5 mm/s lichte, niet structurele schade kan ontstaan. Uit de SBR-richtlijnen blijkt een 1% kans op schade aan de meest kwetsbare gebouwen vanaf 3 mm/s. Deze laatste, en laagste van de twee waardes, wordt in deze SDRA genomen als het begin van het potentiële schadedomein.



Figuur 7 Risico domeinen volgend uit pragmatische toepassing van de wettelijke bepalingen (koppeling tussen EMS schaal en PGV/PGA waardes volgens Zang et al., 2014)

In Figuur 7 zijn de risicodomeinen zoals deze zijn geïnterpreteerd op basis van het wettelijke- en beleidskader inzichtelijk gemaakt in relatie tot de intensiteit (EMS), de PGV en de kracht van een aardbeving (magnitude op schaal van Richter). De grenzen van de EMS-categorieën in termen van PGV zijn besproken in het technisch kader (zie "Intensiteit van een aardbeving aan het maaiveld").

Samenvattend zijn er op basis van het wettelijke- en beleidskader drie dreigingsdomeinen geïdentificeerd:

1. Verwaarloosbare dreiging: Het eerste domein is waar de door de aardbeving gegenereerde groundbeweging geen tot hoogstens verwaarloosbare dreiging oplevert, en waar derhalve ook het risico verwaarloosbaar is.
2. Acceptabele dreiging en risico: Daar waar de groundbeweging onder de in de Kamerbrief gestelde drempel van magnitude 3,5 (vertaald naar een maximaal toelaatbare PGV-waarde van 33 mm/s, zie sectie 'Veiligheidsrisico') blijft. In dit domein behoort een licht (niet-constructief) schaderisico tot de mogelijkheden.
3. Onacceptabele dreiging en risico: Vanaf de in de Kamerbrief gestelde magnitude 3,5 (vertaald naar een maximaal toelaatbare PGV-waarde van 33 mm/s) en hoger.

Zoals ook in de Kamerbrief is aangegeven, is het moeilijk exact te kwantificeren waar het veiligheidsrisicodomein begint, maar dit valt in ieder geval 'ruimschoots' boven de ondergrens van het hier aangeduide onacceptabele dreigingsdomein.

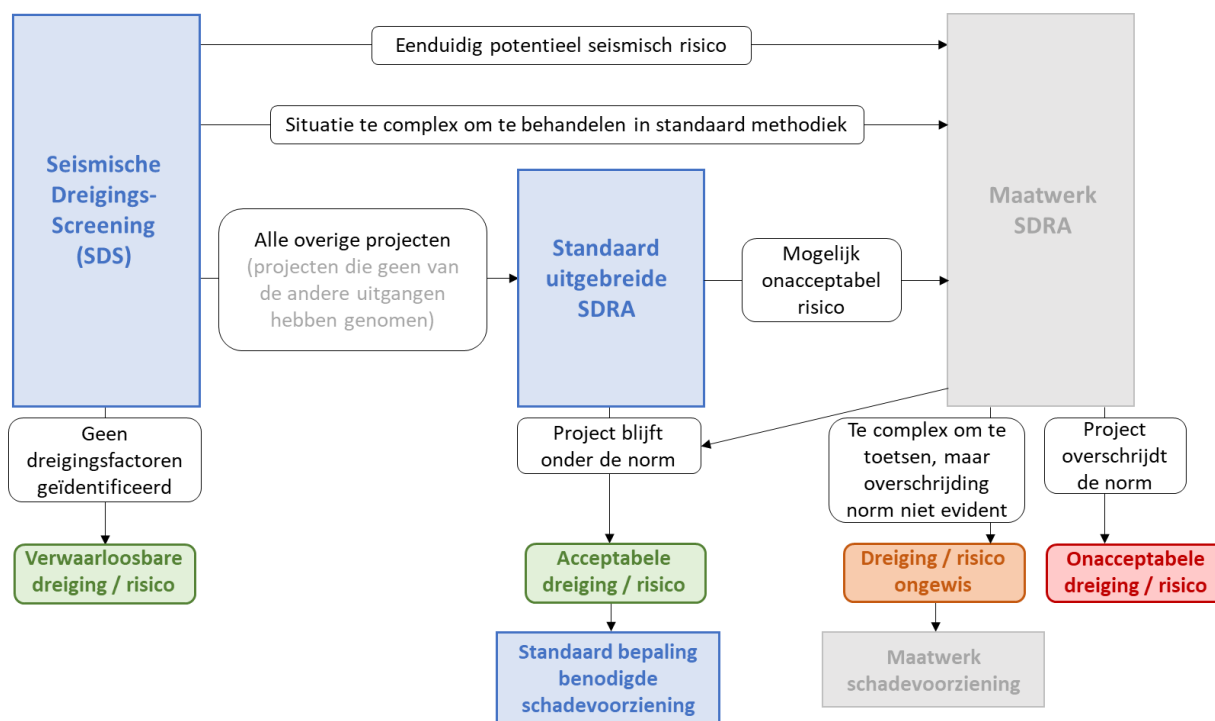
De PGV-indicatie van de genoemde 3,5 M beving op 3 km diep is in de orde van 33 mm/s, berekend met behulp van conversiemethodiek van Ruigrok en Dost (2020; Figuur 6 **Error! Reference source not found.**). Dit is ook ongeveer de bovengrens van het domein 'licht beschadigend' volgens de koppeling tussen EMS-schaal en PGV-waardes door Zang et al. (2022 Figuur 7). Zoals besproken in de sectie 'Veiligheidsrisico' wordt deze grens van 33 mm/s in de SHRA aangehouden als de norm waartegen getoetst moet worden.

SDRA Aardwarmte op hoofdlijnen

In dit hoofdstuk wordt een korte samenvatting gegeven van de nieuw voorgestelde SDRA. Een uitgebreidere, meer technische beschrijving en verdere onderbouwing van de diverse onderdelen hiervan wordt gegeven in het tweede deel van dit rapport, dat is gesteld in het Engels (DEEL II).

De SDRA is ingedeeld in drie stappen: een seismische dreigingsscreening (SDS), een standaard uitgebreide SDRA en een Maatwerk SDRA. Figuur 8 geeft een schematische weergave van de SDRA op hoofdlijnen. Voor de blauwe elementen zijn standaardmethodieken ontworpen die gedocumenteerd zijn in dit rapport. Grijs 'maatwerk' elementen worden aangestipt in dit rapport, maar zijn niet uitgewerkt tot een standaardmethodiek. Groene, oranje en rode elementen zijn de mogelijke uitkomsten na het doorlopen van de SDRA, te weten:

- Verwaarloosbare dreiging / risico: Projecten waarvoor geen dreigingsfactoren zijn geïdentificeerd. Voor deze projecten zijn geen verdere SDRA-stappen nodig. Omdat het risico nihil is, wordt er geen schade verwacht en is een berekening van potentiële schade niet mogelijk.
- Acceptabele dreiging / risico: Projecten waarvoor kan worden aangetoond met de standaard uitgebreide SDRA of met de Maatwerk SDRA dat zij onder de veiligheidsnorm. Voor deze projecten moet een standaard bepaling worden gedaan van de benodigde schadevoorziening.
- Dreiging- / risico ongewis: Projecten die complex zijn om te toetsen, maar waarbij overschrijding van de veiligheidsnorm niet evident is. Het project als zodanig kan geen doorgang vinden, maar een pilotproject zou eventueel onder specifieke, per geval te bepalen, condities tot de mogelijkheden behoren.
- Onacceptabel risico: Projecten waarvan wordt berekend dat ze de veiligheidsnorm kunnen overschrijden. Deze projecten kunnen (in de voorgestelde vorm) geen doorgang vinden.



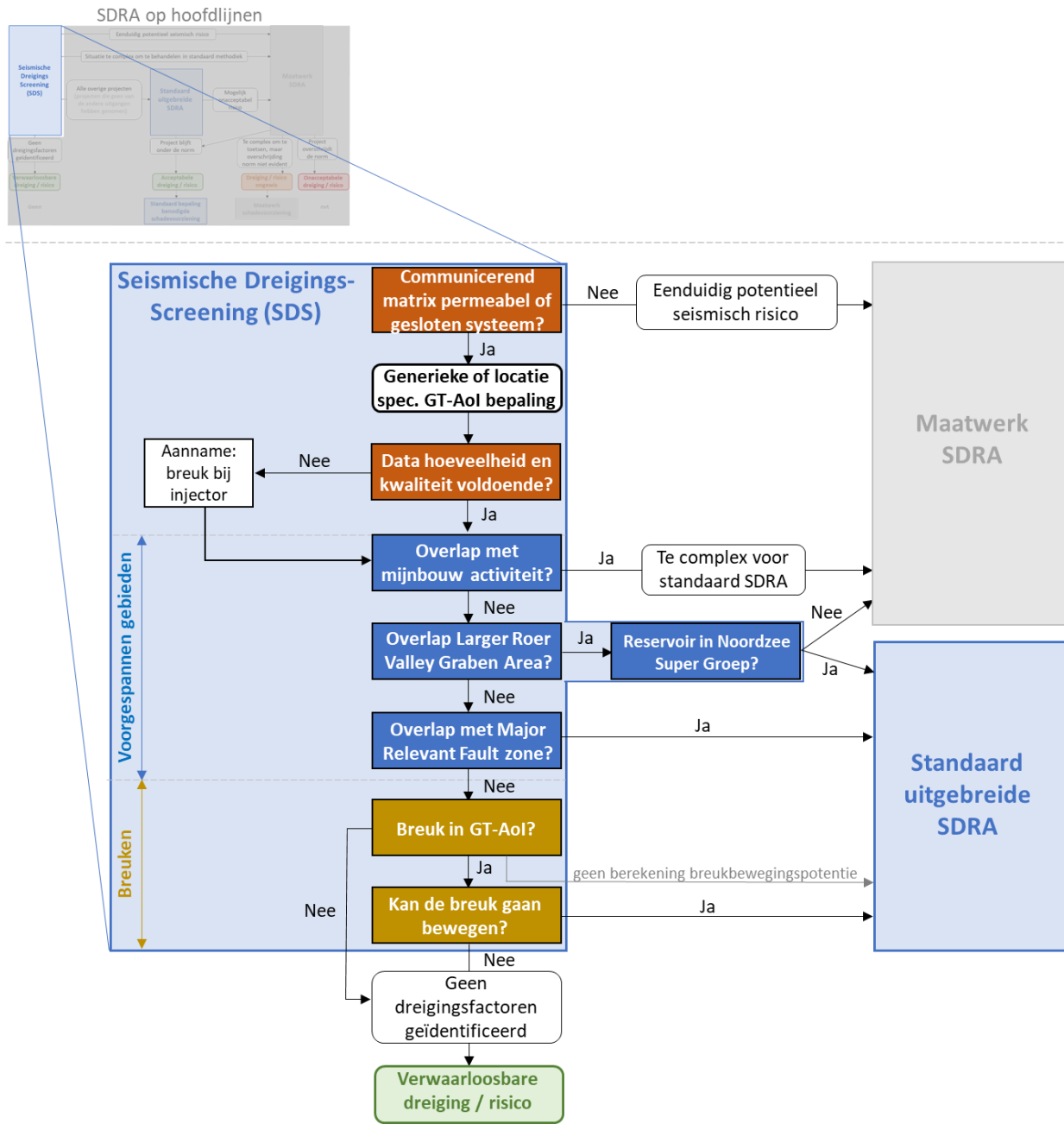
Figuur 8 Schematische weergave van de SDRA-procedure op hoofdlijnen. Blauw = standaardprocedure, grijs = maatwerk' procedure. Groen, oranje en rood = mogelijke uitkomsten na het doorlopen van de SDRA.

Seismische dreigningsscreening (SDS)

Met de seismische dreigningsscreening (SDS) kunnen projecten worden uitgefilterd die enerzijds een verwaarloosbare dreigning hebben (en dus geen verdere stappen in de SDRA hoeven te doorlopen) of anderzijds een evident potentieel risico met zich meebrengen dan wel te complex zijn voor verdere evaluatie met de standaard uitgebreide SDRA (en daarom naar de Maatwerk SDRA moeten worden verwezen). Alle projecten die niet één van de bovengenoemde routes volgen zullen doorgaan naar de standaard uitgebreide SDRA.

De standaard uitgebreide SDRA is bedoeld voor aardwarmteprojecten waarbij wordt gewonnen uit matrix permeabele reservoirs. Dit is het meest voorkomende type aardwarmtereservoir in Nederland. De methodiek is eveneens geschikt voor gesloten systemen waarbij geen uitwisseling plaatsvindt met het formatiewater ('closed loop systems'). De methodiek is niet geschikt voor aardwarmteprojecten waarbij gebruik wordt gemaakt van karst, fractures en/of breuken. Bovendien worden projecten met dit type permeabiliteit geassocieerd met eenduidig potentiële seismische dreigning. De eerste stap in de SDS is daarom het onderscheiden van het **permeabiliteitstype van het reservoir** (Figuur 9). Projecten waarbij sprake is van een reservoir met karst, fractures en/of breukpermeabiliteit worden direct in deze eerste stap naar de Maatwerk SDRA verwezen. Technische details en verdere onderbouwing ten aanzien van dit element zijn te vinden in het hoofdstuk 'Permeability system'. De standaard uitgebreide SDRA is voorts bedoeld voor projecten die gebaseerd zijn op een concept van drukcommunicatie tussen de productie- en injectieput, waarbij het uitgangspunt is dat het reservoir tijdens productie (gemiddeld) in drukbalans is. Is het concept hier niet op gebaseerd, ook al wordt gewonnen uit een matrix permeabel

reservoir, dan bestaat het risico op het creëren van significante drukverschillen, en wordt het project vanuit de SDS ook direct in deze eerste stap naar de Maatwerk SDRA verwezen.



Figuur 9 Schematisch overzicht van de SDRA-procedure, met nadere invulling van de seismische dreigingscreening (SDS) stappen (links) en de eventuele SDRA- vervolgstappen rechts. GT-Aol = invloedsgebied van het aardwarmteproject. Inzet: SDRA op hoofdlijnen zoals in Figuur 8.

Voor projecten die door kunnen in de SDS, wordt vervolgens het **invloedsgebied van het aardwarmtesysteem** bepaald (GT-Aol, Figuur 9). Dat wil zeggen, het deel van de ondergrond dat afkoelt ($\Delta T > 0^\circ$) als gevolg van injectie van het door de warmtewinning afgekoelde water, alsmede het gebied

waarin de druk beïnvloed wordt rondom de productieput. Voor deze *'area of influence'* van het aardwarmteproject (hieronder GT-Aol) kan met een generieke methode eenvoudig en snel een maximale mogelijke omvang worden bepaald. Desgewenst kan met een uitgebreidere methode, waarvoor meer invoerwaardes nodig zijn, ook een project-specifieke(re) GT-Aol worden bepaald. Het voordeel van deze laatste bepaling is dat hierin ook productieparameters, zoals productietijd, kunnen worden meegenomen. Hiermee kan de GT-Aol ook voor zelfgekozen tijdsinterval worden bepaald, bijvoorbeeld overeenkomend met de aangevraagde vergunningsduur. De resulterende GT-Aol zal in zo'n geval waarschijnlijk beperkter zijn dan de GT-Aol bepaald met de generieke methode, omdat die laatste uitgaat van de theoretisch maximale levensduur van het doublet. Dit SDS-element is in meer detail beschreven in het hoofdstuk 'Area of Influence of a geothermal system'.

Na de bepaling van de GT-Aol wordt eerst de **seismische datakwantiteit en -kwaliteit** binnen de GT-Aol bepaald om vast te stellen of de beschikbare data genoeg zicht geeft op de aanwezigheid en oriëntatie van breuken in het reservoir (Figuur 9; zie voor meer details het hoofdstuk 'Seismic data coverage and quality'). Is de uitkomst voldoende, dan kan het project zonder verdere condities de SDRA doorlopen. Is de uitkomst onvoldoende, dan mag het project de SDRA verder doorlopen, maar moet in de rest van het proces de aanwezigheid van een breuk (vrijwel) op de locatie van de injectieput worden aangenomen, met de meest gunstige oriëntatie voor reactivatie (d.w.z. waarbij de kans op breukbeweging het grootst is).

Hierna wordt gecontroleerd of er mogelijk sprake zou kunnen zijn van een voorgespannen gebied; een gebied waarin **de breuken (nabij) kritisch gespannen zouden kunnen zijn** voorafgaand aan de start van het aardwarmteproject (Figuur 9, donkerblauwe tegels). Daarvoor moet worden gekeken of de GT-Aol raakt aan, of overlapt met, het invloedsgebied van:

- **Producerende of uitgeduceerde gasvelden of zoutcavernes** (zie voor meer details 'Areas where faults may be close to critically stressed due to subsurface mining activities')
- Het **Roerdalslenkgebied** (zie voor meer details 'Larger Roer Valley Graben Area')
- **Breuken met historische seismiciteit** buiten het Roerdalslenkgebied (zie voor meer details 'Major relevant fault zones')

Als er overlap wordt geconstateerd met één van de eerste twee invloedsgebieden, wordt het project doorverwezen naar de Maatwerk SDRA. In deze gevallen geeft de mogelijke (nabij) kritische spanning van de breuken reden tot uitgebreidere dreigings- en eventueel risicoanalyse, maar wordt de situatie als te complex gezien om in de standaard uitgebreide SDRA te kunnen afhandelen. Een uitzondering wordt gemaakt voor projecten in het Roerdalslenkgebied die beogen te winnen uit de Noordzee Super Groep, deze worden niet doorverwezen naar de Maatwerk SDRA, maar naar de standaard uitgebreide SDRA (zie Figuur 9, meer details in 'Different SHRA-routes for projects within and below the North Sea Supergroup').

Projecten die overlappen met breuken geassocieerd aan historische natuurlijke seismiciteit buiten het Roerdalslenkgebied, worden doorverwezen naar de standaard uitgebreide SDRA, waar zij enkele additionele condities krijgen opgelegd (zie voor meer details 'Major relevant fault zones').

Voor projecten die niet overlappen met een voorgespannen gebied (een gebied waarin de breuken potentieel (nabij) kritisch gespannen zijn voorafgaand aan de start van het aardwarmteproject), volgen tenslotte twee breuk-gerelateerde controles (Figuur 9, bruine tegels). Als eerste moet er worden nagegaan of er een **breuk in het reservoir aanwezig is binnen de GT-Aol**. Is dit niet het geval, dan wordt

het project geclassificeerd als ‘verwaarloosbare dreiging’, en is verdere analyse in het kader van de SDRA niet nodig. Is er wel een breuk in de GT-Aol aanwezig, dan volgt, in principe, voor iedere breuk binnen de GT-Aol een beoordeling **of de breuk potentieel gereactiveerd kan worden**. Voor deze beoordeling is een *Fault Slip Tendency* of *Shear Capacity Utilisation* (SCU) berekening nodig. Deze berekening is gebaseerd op een analytisch ondergrondmodel en lokale geologische en geomechanische invoerwaarden, inclusief hun onzekerheidsmarges. Daarnaast worden de beoogde operationele parameters zoals opgelegde injectiedruk en injectietemperatuur gebruikt bij de berekening. Voor deze berekening is een standaard module ontwikkeld, waarin vele realisaties worden doorgerekend. Wanneer 95% van de realisaties aangeeft dat de breuk niet gereactiveerd kan worden, wordt de dreiging van het project geclassificeerd als verwaarloosbaar en hoeven geen verdere stappen in de SDRA worden genomen. Wanneer minder dan 95% van de realisaties aangeeft dat de breuk niet gereactiveerd kan worden, wordt het project doorverwezen naar de uitgebreide SDRA.

Optioneel kan ervoor worden gekozen deze laatste stap (beoordeling of de breuk potentieel gereactiveerd kan worden) niet uit te voeren, als de operator dit niet wenselijk acht. In dat geval wordt het project altijd doorverwezen naar de standaard uitgebreide SDRA, omdat er dan vanuit moet worden gegaan dat de kans aanwezig is dat de breuk gereactiveerd zal gaan worden (er moet dan een worst-case scenario aanname gedaan worden).

Standaard uitgebreide SDRA

Voor de projecten die niet een eenduidig verwaarloosbaar seismisch dreigingsniveau hebben, is extra analyse nodig. Voor deze projecten moet naast een uitgebreidere dreigingsanalyse ook een risicoanalyse worden uitgevoerd. Dat laatste om te evalueren wat het gevolg aan het maaiveld zou zijn in het onwaarschijnlijke geval dat de aardbeving die in dreigingsevaluatie is geïdentificeerd werkelijkheid zou worden. Omdat de kans op voorkomen van een aardbeving en de intensiteit daarvan nog niet kunnen worden berekend, maar toch een eventuele consequentie moet worden ingeschat, is voor deze vervolgstap een berekeningsmethodiek opgesteld die een indicatie geeft voor een ‘*largest credible earthquake*’ scenario qua optreden van een mogelijk aardbeving en bijbehorende intensiteit. De kans dat dit scenario ooit werkelijkheid wordt is zoals eerder beschreven zeer laag.

De opgestelde standaard uitgebreide SDRA bestaat uit minimaal twee stappen (lichtbruine tegels in Figuur 10). Voor projecten in de Noordzee Super Groep die overlappen met het Roerdalslenkgebied of voor projecten die overlappen met een major relevant fault zone komt daar een extra stap bij (oranje-bruine tegel in Figuur 10): een analyse van mogelijk connectiviteit tussen het aardwarmteproject en de breukzone(s). Voor alle projecten moet, voor alle in GT-Aol aanwezige breuken die doorverwezen worden naar de standaard uitgebreide SDRA, een berekening worden gemaakt van de ‘*largest credible earthquake*’ magnitude (M_{LCE}) van de aardbeving. Dit wordt gedaan door middel van één van de berekeningen die ook gebruikt wordt voor de inschatting van potentiële bevingen ten gevolge van aardgaswinning uit de zogenaamde ‘kleine velden’ in Nederland. De inschatting hiervan wordt gemaakt op basis van een reeks aan invoergegevens, inclusief hun onzekerheidsmarge. Dit resulteert in een groot aantal mogelijke uitkomsten (voor meer details over deze methode, zie Magnitude’). Deze M_{LCE} -uitkomsten worden vervolgens omgezet naar maximale grondsnelheid aan het maaiveld door middel van een door het KNMI afgeleide formule (Ruigrok en Dost, 2020). Ook bij deze omrekening worden onzekerheden meegenomen (voor meer details zie ‘Ground motion (conversion to Peak Ground

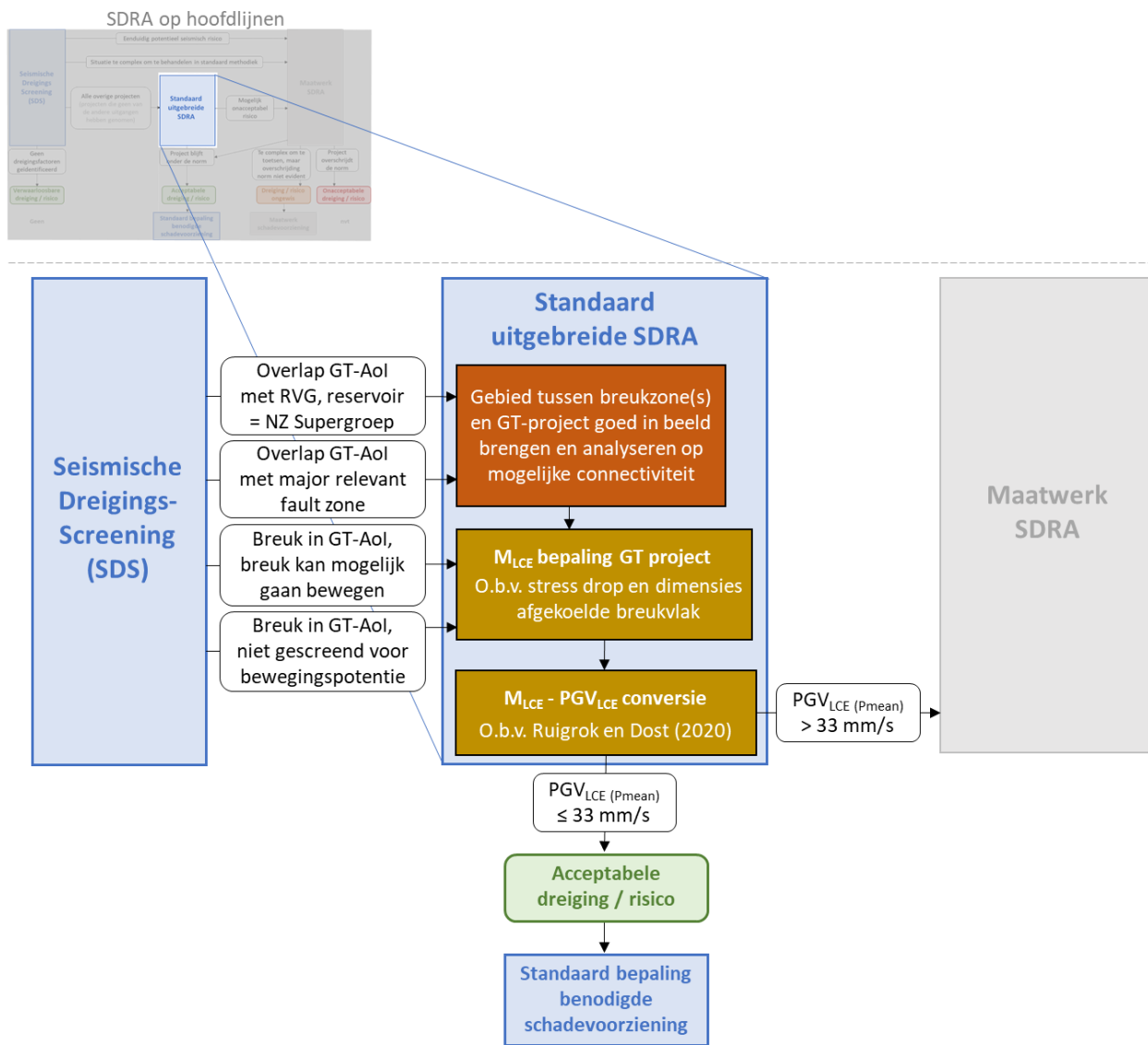
Velocity'). Van de resulterende uitkomsten wordt de verwachtingswaarde (gemiddelde, ook wel P_{mean}) genomen.

Op basis van deze verwachtingswaarde wordt het project geclassificeerd in één van de volgende twee categorieën:

- Een acceptabel risico: voor projecten met een P_{mean} *largest credible earthquake* PGV-waarde ($PGV_{\text{LCE}}(P_{\text{mean}})$) kleiner dan of gelijk aan 33 mm/s. Voor deze projecten moet vervolgens een potentieel schadebedrag worden berekend (zie 'Bepaling potentiële schadevoorziening').
- Een mogelijk onacceptabel risico: voor projecten die met een de standaard uitgebreide SDRA uitkomen op een *largest credible earthquake* piekgrondsnelheid ($PGV_{\text{LCE}}(P_{\text{mean}})$) groter dan 33 mm/s. Deze projecten worden doorverwezen naar de Maatwerk SDRA (zie 'Maatwerk SDRA').

In het geval van meerdere breuken in de GT-Aol waarvoor deze berekening moet worden gemaakt is de breuk met de hoogste $PGV_{\text{LCE}}(P_{\text{mean}})$ uitkomst leidend voor het classificeren van het project.

De invulling van de standaard uitgebreide SDRA-methodiek binnen de totale SDRA is schematisch weergegeven in Figuur 10. De stappen binnen de standaard uitgebreide SDRA (inclusief de bijbehorende tooling, beschreven in sectie 'Standard extensive SHRA-procedure' in Deel II van dit document) kunnen ook worden vervangen door een invulling naar eigen inzicht, zolang er maar aan de norm getoetst wordt.



Figuur 10 Schematisch overzicht van de SDRA-procedure, met nadere invulling van de standaard uitgebreide SDRA stappen (midden) en de eventuele vervolgstappen onder en rechts. Witte elementen met zwarte letters links geven de dreigingsfactoren weer op grond waarvan een project in deze procedure terecht kan komen. GT-Aol = invloedsgebied van het aardwarmteproject, RVG = Roerdalslenkgebied, NZ = Noordzee, M_{LCE} = largest credible earthquake magnitude, PGV = piekgrondsnelheid. Inzet: SDRA op hoofdlijnen zoals in Figuur 8.

Bepaling potentiële schadevoorziening

Voor projecten in de categorie ‘acceptabel risico’ is een bepaling nodig van de potentieel benodigde schadevoorziening. Hiervoor moet worden bepaald hoe groot het gebied is waarbinnen een piekgrondsnelheid (PGV) van 3 mm/s of hoger zou kunnen ontstaan in het ‘largest credible earthquake’ scenario. De omvang van de schade als gevolg van een aardbeving in dit gebied is voornamelijk afhankelijk van de bebouwingsdichtheid, het type en de staat van de gebouwen. Daarom moet het aantal gebouwen binnen de 3 mm/s contour worden bepaald met behulp van een vaste gegevensset (de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG), www.kadaster.nl). Op basis van het aantal gebouwen (van een bepaald type / ouderdomsklasse) binnen deze contour, kan middels zogenaamde

kwetsbaarheidscurves (of *'fragility curves'*) worden bepaald hoeveel van deze gebouwen schade zouden kunnen oplopen bij de voor het project berekende *'largest credible earthquake'* scenario. Op basis van een gemiddeld potentieel schadebedrag per gebouw kan vervolgens worden geraamd welke potentiële schadevoorziening voor het project benodigd is. Meer details hierover worden gegeven in het hoofdstuk *'Procedure to assess required amount of damage claim provision ('schadevoorziening')*.

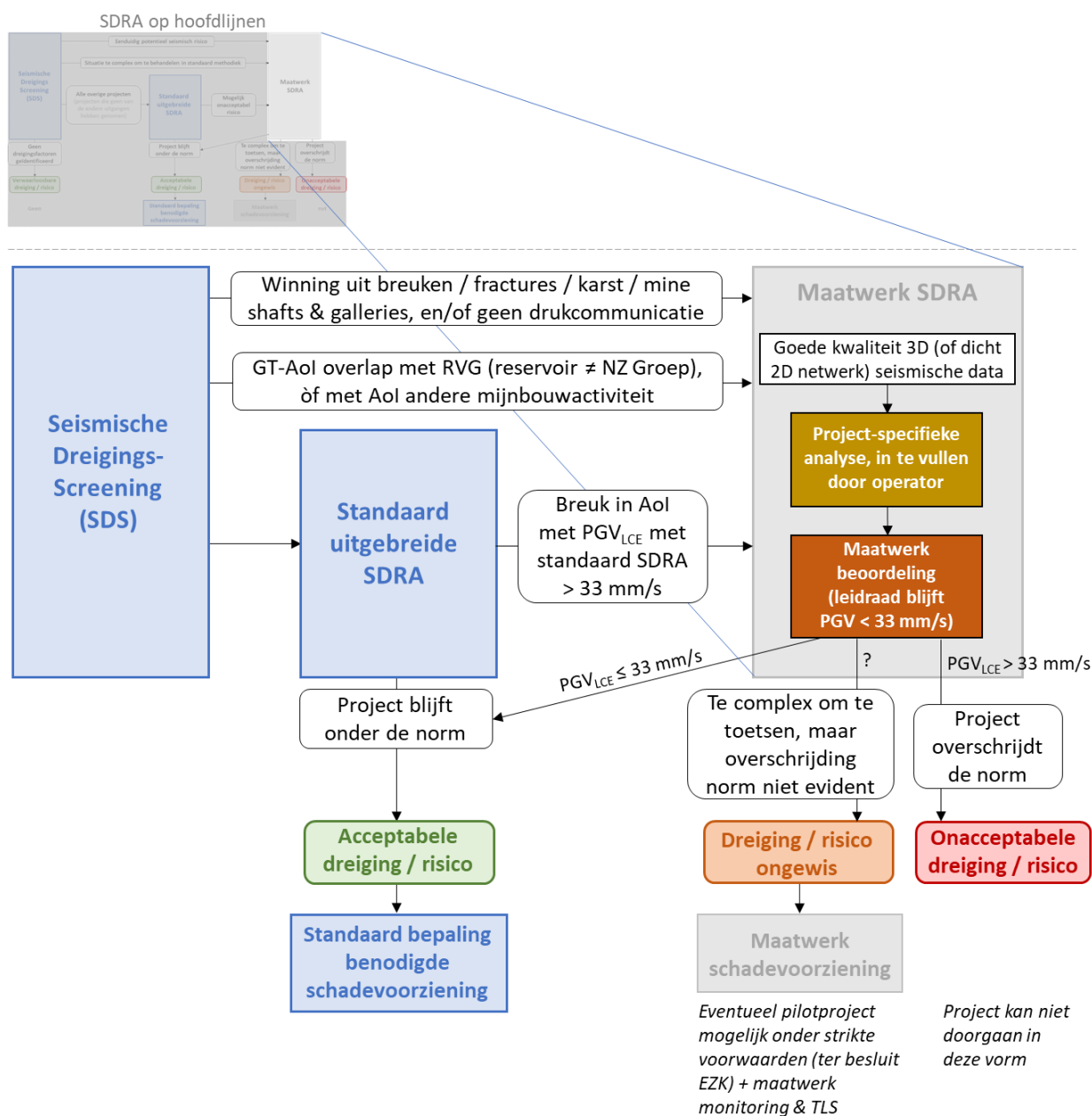
Maatwerk SDRA

Maatwerk SDRA moet worden gedaan voor alle projecten met eenduidig potentieel verhoogde seismische dreiging en/of projecten die niet geschikt zijn voor de standaard uitgebreide SDRA en voor projecten waarvan uit de standaard uitgebreide SDRA blijkt dat ze mogelijk de norm voor het veiligheidsrisico zouden kunnen overschrijden. Voor Maatwerk SDRA is geen standaardprocedure ontworpen. Voor deze projecten zal, afhankelijk van de reden waarom het project in deze Maatwerk SDRA is beland, door de operator zelf een adequate methode moeten worden bepaald die toegespitst is op de specifieke situatie. Ook de beoordeling van de analyse zal maatwerk zijn.

De Maatwerk SDRA-procedure is schematisch weergegeven in Figuur 11. Het wordt waarschijnlijk geacht dat voor alle projecten die naar de Maatwerk SDRA verwezen worden 3D seismische data (of eventueel zeer dichte 2D seismische data) nodig is om een adequate SDRA te kunnen doen. De Maatwerk SDRA zal in de meeste gevallen ook een gedetailleerd ondergrond model op basis van een uitgebreide dataset vereisen, om het lokale dreigingsniveau goed in beeld te brengen. Verder zal er op basis van de specifieke kenmerken van het project een analyse op maat gekozen moeten worden.

Op basis van de uitkomsten van de Maatwerk SDRA wordt een project ingedeeld in een van de volgende klassen:

- Acceptabel risico: voor deze projecten moet een standaard bepaling voor de benodigde schadevoorziening worden gedaan
- Onacceptabel risico: deze projecten kunnen (in de voorgestelde vorm) geen doorgang vinden
- Dreiging- en /of risico bepaling ongewis: Het project als zodanig kan geen doorgang vinden, een pilotproject zou eventueel onder specifieke, per geval te bepalen, condities tot de mogelijkheden behoren. Voor pilotprojecten moet een maatwerk bepaling voor de benodigde schadevoorziening worden gedaan.



Figuur 11 Schematisch overzicht van de SDRA-procedure, met nadere invulling van de Maatwerk SDRA (rechts) en de mogelijke uitgangen van deze analyse (onder). Witte elementen met zwarte letters links van de Maatwerk SDRA tegel geven de dreigingsfactoren weer op grond waarvan een project in deze procedure terecht kan komen. GT-Aol = invloedsg gebied van het aardwarmteproject, RVG = Roerdalslenkgebied, NZ = Noordzee, PGV = piekgrondsnelheid. Inzet: SDRA op hoofdlijnen zoals in Figuur 8.

Aansluiting van de SDRA bij andere onderdelen van de seismiciteitsgovernance

De SDRA kan niet los worden gezien van de eisen ten aanzien van monitoring en het opstellen van een stoplicht-systeem ('*traffic light system*', TLS) en aansluitend seismisch risico beheerssysteem (SRB). In dit rapport wordt uitsluitend de SDRA-methodiek beschreven, maar het is de verwachting dat voor ieder van de uitgangen van de SDRA waarbij het project doorgang kan vinden, een passende vorm van monitoring en een adequaat SRB zal komen. Hieraan wordt op het moment van schrijven van dit rapport nog gewerkt door andere partijen. Monitoring en SRB zijn essentieel bij het streven om de eventueel geïdentificeerde (acceptabele) dreiging ten gevolge van aardwarmteprojecten te beheersen, zodat het eventuele risico op voorkomen van deze consequenties – die sowieso al laag wordt geacht – nog verder te beperken.

De SDRA kan eveneens niet los worden gezien van een procedure ten aanzien van eventuele schadeafhandeling en garanties voor financiering van de betaling van zulke eventuele schades. Alhoewel het risico zeer laag wordt geacht dat er daadwerkelijk schade zal ontstaan, mogen projecten toch door als dit niet onomstotelijk kan worden uitgesloten, als eventuele schade maar beperkt blijft en betaalbaar is. Als onderdeel van de SDRA wordt alleen een inschatting gegeven van de hoogte van een potentiële schadevoorziening. Voor de eventuele afhandeling en betaling van de schade in het onwaarschijnlijke geval dat deze toch mocht optreden, zijn afspraken, protocollen en een (gegarandeerde) schadevoorziening nodig. Ook hieraan wordt op het moment van schrijven van dit rapport nog gewerkt door andere partijen.

Toekomstperspectief

De uitkomst van de SDRA-methodiek moet worden gezien als een eerste orde benadering van de seismische dreiging en het potentieel bijbehorende risico. Wetenschappelijke inzichten en modellen zijn momenteel nog niet toereikend om precieze dreigings- en risicoberekeningen te maken. Ook ontbreekt het nog aan voldoende lokale geomechanische en kalibratiedata om berekeningen die wel mogelijk zijn te preciseren en verifiëren. De huidige methode is bedoeld, en wordt voldoende geacht, voor de komende jaren. De veronderstelling is dat deze (uiterlijk) op termijn van een jaar of vijf tot tien zal kunnen worden verfijnd en verbeterd op basis van voortschrijdende inzichten. Voorwaarde hiervoor is dat de komende jaren structureel en significant geïnvesteerd zal worden in het vergaren van data, zowel bij het boren van aardwarmteputten als tijdens de operaties, en in verder onderzoek op het gebied van seismiciteit bij Nederlandse types aardwarmtesystemen. Hierbij moet onder anderen worden gedacht aan onderzoeken met betrekking tot seismisch vs. a-seismisch gedrag van breuken en het vergaren van (monitoring) kalibratiedata bij representatieve matrix-permeabele aardwarmteprojecten. Daarnaast is de verzameling van onder andere geomechanische en spanningsdata bij het boren van putten van groot belang. Dit laat onverlet dat in de komende jaren goed bekeken moet worden of de in dit rapport beschreven SDRA-methodiek voldoet in het kader van de vergunningverlening en dat deze zo nodig tussentijds aangepast zal kunnen worden.

DEEL II

Details of the Seismic Hazard and Risk Assessment procedure

In the following sections each of the SHRA steps is addressed individually. First the Seismic Hazard Screening (SHS, in Dutch the *Seismische Dreigingsscreening*, SDS) steps, followed by the steps within the standard extensive SHRA (*standard uitgebreide SDRA*) and a brief description of the Custom SHRA (*Maatwerk SDRA*). Schematic overviews of the full SHRA, of the SHS, the standard extensive SHRA and the Custom SHRA can be found, respectively, in Figuur 8, Figuur 9, Figuur 10 and Figuur 11 (in section 'SDRA Aardwarmte op hoofdlijnen' in Part I of this document). The SHRA is designed to fulfill the requirements for geothermal license applications under the new Mining Law (applicable from 1 July 2023) and adheres to the associated norms. These have been set out in the section 'Wettelijk- en beleidskader' and their implication for the SHRA methodology is discussed in the section 'Implicatie van de kaders voor de SDRA Aardwarmte en verantwoording van de nieuwe methodiek' (both sections in Part I of this document).

Permeability system and pressure communication between wells

The first SHS element is the permeability system that the project relies on. In this step, projects with an evident potential for inducing seismicity based on the permeability system are filtered out. Also, projects with a permeability system not suitable for the standard extensive SHRA-method are filtered out. These projects require a custom (tailor-made) approach and are referred to the Custom SHRA.

Geothermal systems and permeability types

Geothermal systems rely on rocks that allow fluid flow. The ease with which a fluid (in this case water) moves through a rock is referred to as 'permeability'. There are two main types of natural, geological permeability:

- Primary permeability, formed during formation of the rock:
 - o Matrix permeability in sedimentary reservoirs
- Secondary permeability, formed after the rock was formed, e.g. as a result of:
 - o Fracturing and/or faulting
 - o Chemical processes such as dissolution (karstification)

Fracture permeability can also be created, or enhanced, artificially by human activity. Geothermal systems relying on the latter permeability are referred to as Enhanced Geothermal Systems (EGS).

Geothermal systems not relying on the rock itself to transmit fluids, but on artificial, man-made cavities in the rocks are:

- a. Closed loop systems
- b. Mine shafts and galleries

Primary and secondary permeability systems

In matrix permeability systems, the flow of the geothermal fluid (water) occurs through pores between the rock framework; in clastic sediments this framework is formed by the grains. In faults, fracture and

karst permeability systems the geothermal fluid flow occurs in discrete fractures, faults or karst networks. Karst systems are often closely related to fractures and/or faults and are therefore grouped with the fracture / fault permeability systems in the SHRA.

Inventory studies on seismicity related to worldwide geothermal operations revealed that there is no reported, felt seismicity linked to geothermal operations in matrix permeable systems (Buijze et al., 2019; De Santis et al., 2022). In the Netherlands, geothermal doublets in such permeability systems have been operating for 15 years, in other countries already for more than 30 years. Recently, measurements at a higher resolution were done during a three-month period at an active geothermal project in the Netherlands, during which one minor, not-felt earthquake was detected (Muntendam-Bos et al. 2022). This is in contrast to geothermal systems relying on fracture / fault permeability, where seismicity has occurred in a number of projects (Buijze et al. 2019 De Santis et al., 2022), amongst which earthquakes with magnitudes in the felt and damage-causing spectrum. Based on this, fracture / fault permeability systems are considered to have evident seismicity potential, and thus evident potential hazard (and related risk). This warrants immediate referral of these projects to a more extensive seismic hazard and risk assessment (SHRA). As it is currently not possible yet to develop a standard method for such systems, and they will have to perform a project-specific, 'Custom SHRA' (*Maatwerk SDRA*, in Dutch, see section 'Custom SHRA'). The latter holds for both natural and enhanced fracture / fault permeability systems.

Pressure communication between injector and producer wells

The standard extensive SHRA-method is suitable for projects based on a concept of pressure communication between the production and injection wells, where it is assumed that water can flow from the injection well to the production well via the matrix permeable reservoir. In other words, on a concept that there is connectivity between the geothermal project wells. The aim of such a concept is to keep the reservoir (on average) in pressure balance during production, and for the reservoir pressure to return to its virgin pressure soon after termination of production. If the concept is not based on this, there is a risk of creating significant pressure differences, whereby the area around the injection well may be pressurized, and/or the area around the producer may be depleted. The standard extensive SHRA-method does not take such pressure differences into account, and therefore projects that are not based on the concept of pressure communication cannot be evaluated with this method. Moreover, the pressure differences may give rise to additional stress on faults in the vicinity of the geothermal project (on top of the thermal stress due to the cooling), thereby potentially elevating the seismic hazard with respect to projects based on a concept of pressure communication. For these reasons, the project will be referred to the Custom SHRA for further evaluation.

In the seismic hazard screening, evaluation of this aspect shall be based on the design concept of pressure communication in the pre-drill phase. Geological uncertainty regarding the reservoir quality, and the potential influence on the connectivity thereof, is not required to be evaluated. When the wells are drilled, communication can be proven through an interference test, or in the early production phase prior to the application for a 'follow-up permit' (*'vervolgvergunning'*). The presence of a fault between the injection and production well shall be deemed a reason for potential lack of pressure communication, also pre-drill. Faults with offsets in the order of the reservoir thickness or more, and/or faults that act as seals or baffles on production time scale are likely to cause reservoir discontinuity.

Therefore, in case of a fault between the injection and production well, the project will be referred to the Custom SHRA.

Closed loop systems

In a closed loop system, a working fluid is directed through a closed set of flow paths and circulates without interacting with the formation fluid. These geothermal systems include single (mono)borehole heat exchangers, and systems with connected multi well and laterals architecture (Yuan et al., 2021). In these systems, in principle, during production no fluid is extracted from, or injected into, the rock formation. This type of geothermal system does not affect the subsurface pressure, and therefore only the temperature effect on the subsurface has to be considered when assessing the seismicity hazard. Closed loop systems are widely used for heat exchange in shallow geothermal systems, but are a new development in the deep geothermal sector (i.e., the domain to which the current SHRA applies). As the subsurface perturbation is only related to cooling of the rock formation, closed loop systems are currently regarded as having similar or lower potential for inducing seismicity, compared to matrix related permeability and the standard extensive SHRA-method is suitable for the evaluation of these systems.

Mine shafts and galleries

Mine shafts and galleries down to depths of 1 km exist in the Netherlands. Permeability is very high to almost infinite in the galleries and shafts in contrast to the surrounding rock. As a result of this, flow would be almost exclusively through the galleries and shafts. Currently, pressures imposed in these types of systems are very low and the temperature difference as a result of this type of systems is also relatively low. It is therefore anticipated that the induced seismicity potential of projects of this kind is generally low. However, since the standard extensive SHRA-method is not suitable for this type of permeability system, projects with this permeability system type will be directly referred to the Custom SHRA. The degree of complexity of the modelling required for mine shaft and gallery system may vary and is to be determined on a case-by-case basis.

'Permeability system' workflow

Figure 1 illustrates the workflow to be followed for the evaluation of this screening step. If the fluid flow occurs through a matrix permeable reservoir or a closed loop system, and the project concept is based on connectivity between the injector and producer wells, the project continues to the next screening step within the SHS. If the project concept is not based on connectivity between injector and producer, or fluid flow occurs through other types of permeability (including fracture, fault and/or karst permeability, or mine shafts and galleries), the project is directly referred to performing a Custom SHRA.

Seismic Hazard Screening

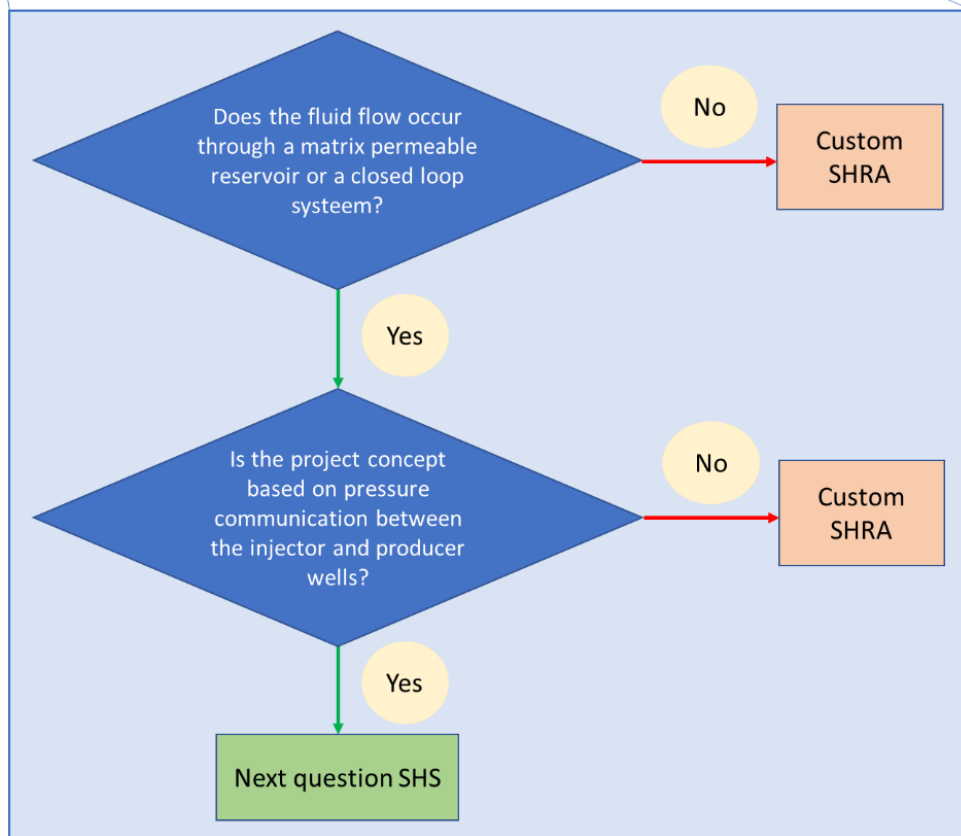
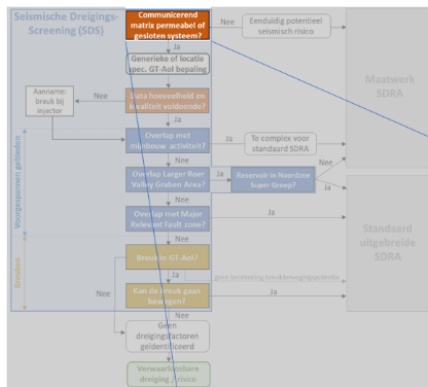


Figure 1 Decision tree for key element 'permeability system' and subsequent step to take in the SHRA procedure. Inset shows the position of this element in the full workflow (for larger version, see Figuur 9).

Area of Influence of a geothermal system

The second step in the SHS is to determine the subsurface Area of Influence of a geothermal system (GT-Aol). The GT-Aol is defined as the area in the subsurface (reservoir) of the imposed cold-water plume around the injector well plus the area around the production well in which the pressures may be affected. The cold-water plume is the area where the original subsurface water temperature is lowered due to the geothermal operation ($\Delta T > 0$ °C). This area may be assessed in two ways; either with a general approach in which only the subsurface location of the injector and producer are required as input, or with a reservoir modelling approach in which project specific reservoir and operational parameters are required as input.

The general approach results in the maximum GT-Aol until the end of lifetime of the geothermal doublet – which is likely to be longer than the duration of the ‘follow-up permit’ (*‘vervolgvergunning’*) - and without taking project-specific parameters into account. Calculation of this GT-Aol is very fast, but has as a downside that the calculated GT-Aol may be larger than the area that actually will be affected by the cooled injection water. This may be the case, for instance, when the doublet is planned to be operational for a limited period of time, and not until thermal breakthrough. As a result, the seismicity hazard and risk may be overestimated for such projects when the generic method is used for GT-Aol calculation.

The reservoir modelling approach allows the input of project specific and operational parameters, which would give a more accurate GT-Aol calculation, but has a downside that it requires many more input parameters (and hence data to derive these parameters). It is up to the operator which of the two GT-Aol’s they prefer to use when performing (and eventually submitting) the SHRA upon license application.

Both the general and the reservoir modelling approach are only applicable to geothermal projects that produce from matrix permeability. Closed-loop system projects are referred to the custom GT-Aol definition (*‘Custom GT-Aol definition’*). Projects relying on other permeability systems, and on concepts without communication between injector and producer, should have been filtered out in the previous screening step (see *‘Permeability system’*).

General approach

The general approach is a simple, geometrical routine based on just one variable, the subsurface well spacing, which captures the GT-Aol adequately under the assumption that the project stops at thermal breakthrough. It is predominantly centred around the injector well, but also includes the effects at the producer well location, resulting in a GT-Aol that fits the cold-water volume at the time of thermal breakthrough (i.e., when the thermal front reaches the production well) within the boundaries of the allowed injection pressures.

The radius of the cold-water plume around the injection well is to be calculated as 0.7 times the distance between the injector-producer well spacing at base reservoir (or total well depth (TD), if this falls within the reservoir) level (PanTerra Geoconsultants B.V. / IF Technology B.V., 2021A). The maximum extent of the influence around the production well is to be taken as 300 m radius around the well location at base reservoir (or TD, if this fall within the reservoir) level. The full GT-Aol is the area within the envelope around these two circles. The general principle is depicted in Figure 2. In case the geothermal system

comprises more than one injector or producer the geometrical method can be applied to as depicted in Figure 3.

The method has been benchmarked against model simulations and on actual geothermal projects. Details and rationale of the method can be found in PanTerra Geoconsultants B.V. / IF Technology B.V., 2021A.

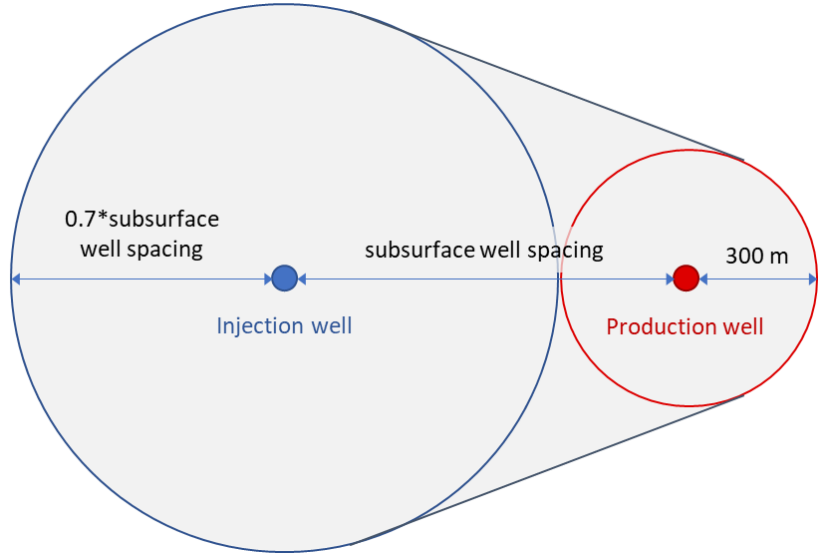


Figure 2 Sketch of the 'general approach': a simple geometrical definition of the Area of Influence of a geothermal doublet system specifically for the SHRA-methodology. Depending on the well spacing the two circles may not overlap, just touch (this figure) or overlap each other.

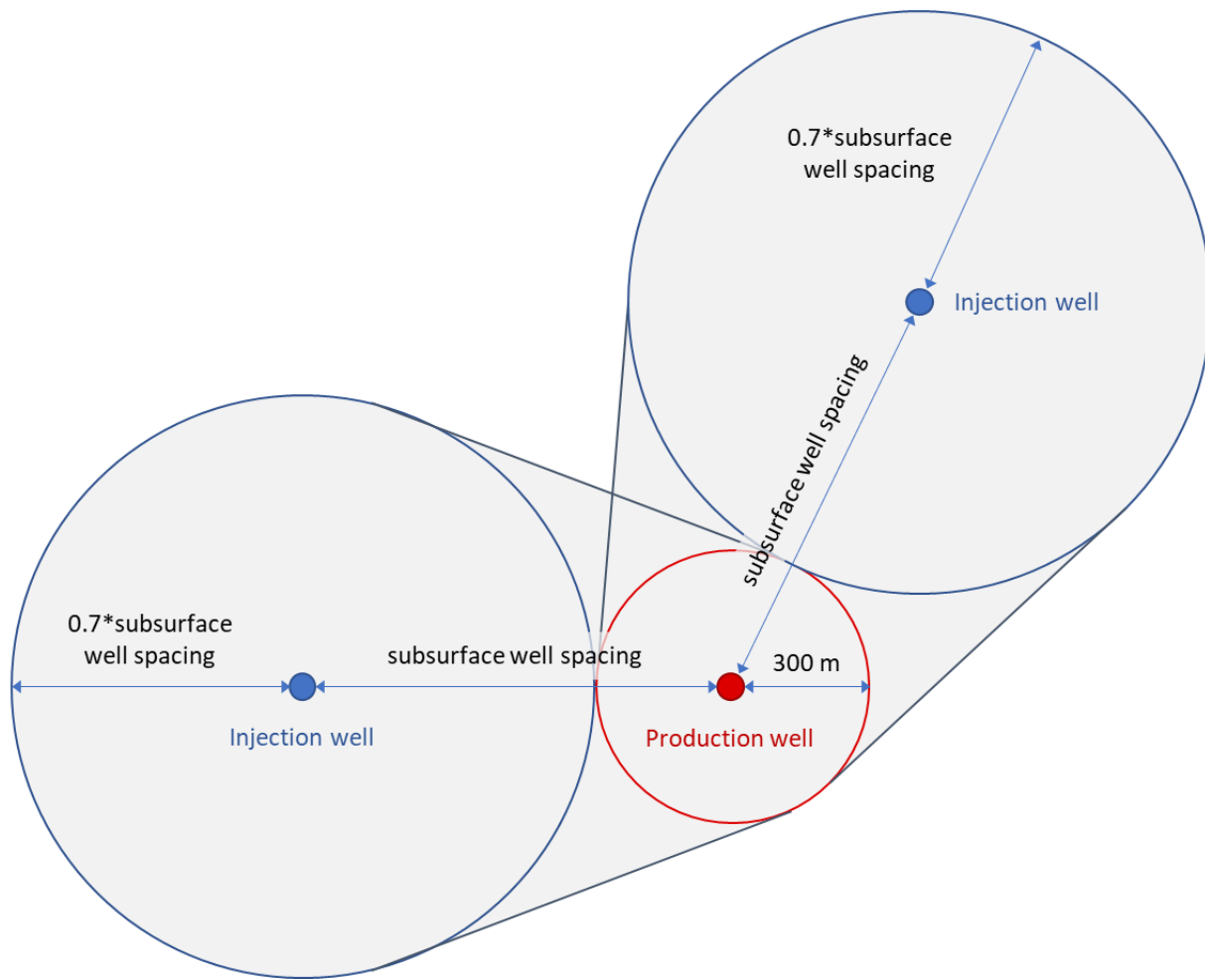


Figure 3 Schematic view of a triplet system consisting of two injectors and one producer, with their individual Aol's. The total GT-Aol is the total area covered by the different shapes where the circles are connected by tangent lines (i.e., the light grey shaded area)

The routine described above is valid for vertical to deviated (up to 45°) well trajectories through the reservoir section. In case of (sub-)horizontal wells (deviation in the reservoir section > 45°), two circles per well have to be generated, one at the top and one at the base reservoir penetration (or at TD, if the well ends within the reservoir). The envelope around all thus created injector- and producer Aol circles represents the GT-Aol (grey shaded area in Figure 4).

The generic GT-Aol can be created using the GIS routine provided on the SHRA webpage (www.nlog.nl).

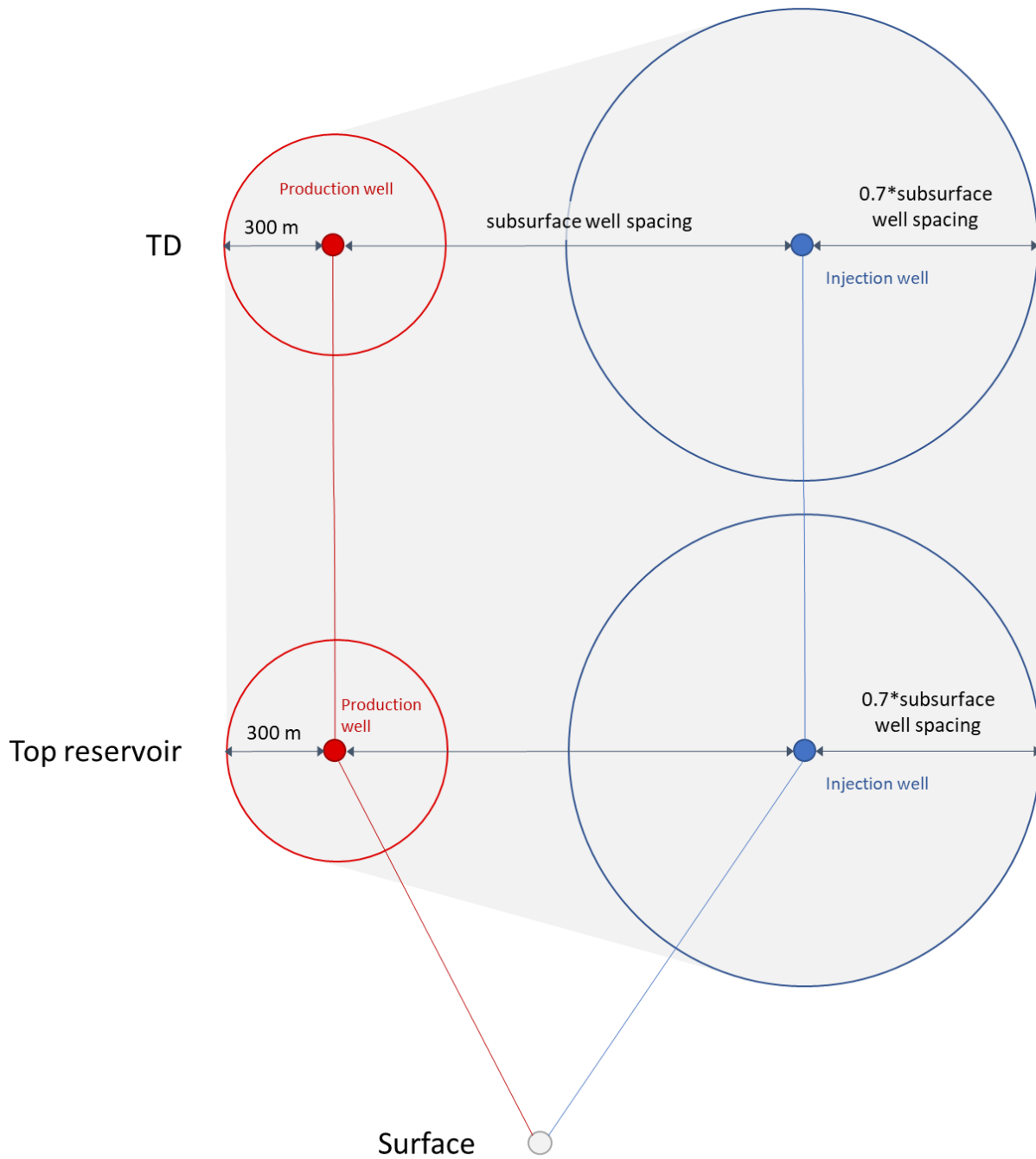


Figure 4 Schematic view of an injector-producer pair with horizontal wells, whereby the Aol circles are to be drawn at the top and base intersections (or TD location) of the reservoir. The full GT-Aol is the total area covered by the different shapes where the circles are connected by tangent lines (i.e., the light grey shaded area)

Reservoir modelling approach

The project / location specific GT-Aol is to be determined using a reservoir model in conjunction with the (anticipated) operational strategy. As an adequate reservoir model DoubletCalc2D (provided

through www.nlog.nl) can be used. From the resulting temperature grid at project end time, the area where the temperature change is $> 0 \text{ }^{\circ}\text{C } \Delta T$ is to be taken as the GT-AoI.

Other reservoir modelling approaches are also allowed, provided that the model is based on depth, gross thickness, net-to-gross, porosity and permeability grids and preferably includes mapped fault trajectories. The operational parameters should include the injection temperature, full load flow, yearly full load hours and total amount of anticipated operational years for which the licence to operate (according to the 'follow-up permit' (*vervolgvergunning*) application, or the anticipated period of geothermal operation in case of a 'starting permit' (*startvergunning*)) is requested.

Custom GT-AoI definition

For closed-loop systems currently no standard method has been designed yet. As such, the determination of the GT-AoI for a closed-loop system project is up to the operator. The extent of the AoI should encompass the full extent of the subsurface temperature perturbation ($dT > 0$ degrees) due to the geothermal operation.

Seismic data coverage and quality

The third step in the SHS is to determine the coverage and quality of the seismic data in the area of influence. The coverage and quality of the seismic data defines the resolution of the fault imaging and interpretation. For the purpose of the SHRA, an adequate image of the presence of faults is required. Without enough resolution, faults in the GT-AoI may be overlooked, and hence the seismic hazard cannot be assessed correctly.

Seismic data coverage

In order to pass the seismic data coverage requirements, the following must be present within the GT-AoI:

- At least three 2D lines or 3D seismic, of which:
- At least one seismic line through the injector and producer wells, or (sub)parallel to this direction *and*
- At least two seismic lines crossing the above-mentioned line at an angle of at least 45°

In case of 3D seismic data, the 3D must cover the GT-AoI to such an extent, that an equivalent of the view of the three 2D lines described above can be obtained. A combination of 3D data and 2D seismic lines achieving the minimum coverage requirements is also allowed.

Rationale

It is important for the assessment of the seismic hazard of geothermal projects whether a fault is present in the GT-AoI, and what the orientation of such a fault (or faults) is. The vicinity of a fault to the injector (and to a lesser extent the producer) well determines the area of the fault that is cooled during the geothermal operations. The larger the cooled area, the larger the extent of the potentially critically stressed fault area, and consequently, the higher the potential largest credible earthquake magnitude in case of a seismic event. The orientation of the fault in relation to the direction of the initial (natural) stresses also determines the chance that the fault becomes critically stressed. For these reasons, it is important that for proper seismicity hazard assessment, at least one seismic line through the injector and producer wells, or (almost) parallel to this direction is present within the GT-AoI. In addition, for proper assessment of the direction of such a potential fault, or faults at an angle with the producer-injector line, at least two lines cross-cutting the injector-producer (parallel) line must be present. The lines must be cross-cutting at significant angles (at least 45°).

Seismic data quality

In order to pass the seismic data quality requirements, it must be of good enough quality and resolution to accurately interpret the (near) top reservoir. It is assumed that when this is possible, also the fault imaging will be accurate enough for the purposes of the SHS. It has been investigated whether a set of quantitative criteria could be formulated for this purpose, but this has proven to be difficult, as existing seismic surveys have many different vintages, acquisition techniques and parameters, (re)processing techniques and specifications. Therefore, the seismic data quality assessment shall be qualitative.

In order to pass the seismic data quality requirements, the seismic data quality must:

- Allow interpretation of horizons/reflections of (near) top reservoir within target structural block
- Be of good to excellent quality, or at least of moderate quality in case of 3D data

For reference, examples of seismic data quality qualifications are given in Figure 5.

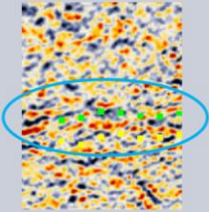
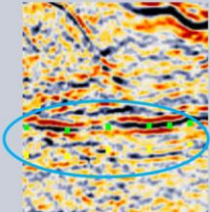
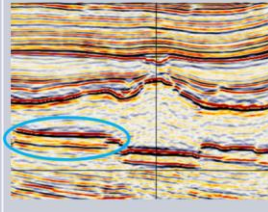
| | Poor | Moderate | Good to excellent |
|--------------|---|--|---|
| Data example |  |  |  |
| Description | <ul style="list-style-type: none"> • Almost impossible to identify horizons and potential faults • Low signal/noise ratio | <ul style="list-style-type: none"> • Possible but difficult to identify horizons and larger potential faults • Medium signal/noise ratio | <ul style="list-style-type: none"> • Horizon identification is easy and faults up to seismic resolution can be identified • High signal/noise ratio |

Figure 5 Qualifications for seismic data quality. Left) Poor quality seismic data, where it is difficult to pick reservoir horizons and/or faults. Middle) Seismic data of moderate quality, in which horizons and faults are difficult to pick. Right) Good to excellent quality seismic where horizons and fault can easily be characterised. Note that the targeted reservoir is encircled. The example shown here is of “excellent” quality, “good” is not illustrated (from PanTerra Geoconsultants B.V. / IF Technology B.V. (Boersma, Q.), 2021D).

Outcome of the seismic data coverage and quality workflow

The seismic data coverage and quality assessment workflow is schematically depicted in Figure 6. The two possible outcomes of this workflow and their consequences are:

- If both the data coverage (first two criteria in the diagram) and the data quality (third criterion in the diagram) are found to be sufficient, the project may proceed to the next SHS step without further condition(s).
- If one or more of the criteria are not met, the project may also continue to the next SHS step, but for all next steps in the SHRA will have to assume the presence of a fault on (or infinitely close to) the injector well location. For any calculations related to the fault in further SHRA steps, this fault shall be assumed to have the optimal orientation to be reactivated (i.e., the ‘worst-case’ in terms of seismic hazard).
- This means that a strike parallel to the orientation of the maximum horizontal stress direction (σ_{hmax}), and a dip angle of 60° shall be assumed.

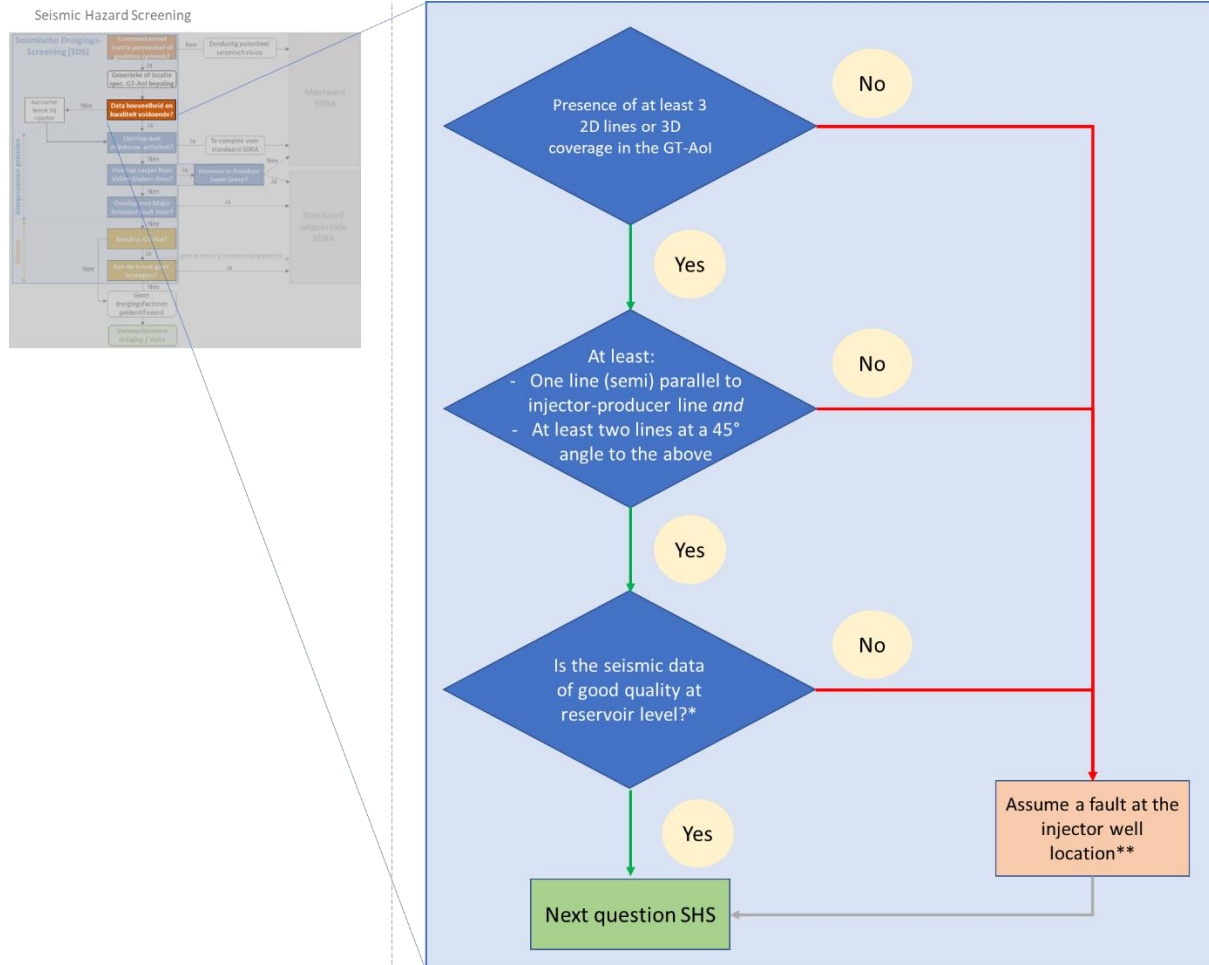


Figure 6 Schematic workflow for the 'Data coverage and quality' assessment step. Inset shows the position of this element in the full workflow (for larger version, see Figure 9). *Are the 2D lines of at least good quality, or the 3D coverage of at least moderate quality? (for examples, see Figure 5). ** Assume that this fault has a dip of 60° and a strike which is parallel to the orientation of σ_{hmax} .

Areas with aberrant stress conditions where faults may be close to critically stressed

The SHS continues with an assessment of areas where the faults may be close to critical stress conditions due to local or regional deviations from the general stress field. Areas or regions may have aberrant stress conditions due to human activities such as mining or due to natural, tectonic causes. This may lead to the faults becoming (near) critically stressed, thereby elevating the seismic hazard of potential geothermal operations in their vicinity. Assessment of areas with potentially aberrant stress conditions due to mining activities includes evaluation of the effects of gas production and salt mining. Assessment of aberrant stress conditions due to natural causes is split into the tectonically active Roer Valley Graben Area and major relevant fault zones in the remainder of the Netherlands.

Areas where faults may be close to critically stressed due to subsurface mining activities

In order to assess where the seismic hazard may be elevated due to mining activities prior to the start of the geothermal project, the GT-Aol must be compared with the Aol's of existing mining activities, such as (active and abandoned) gas fields, aquifer or cavern gas/fluid storages and salt caverns.

If the GT-Aol overlaps with the Aol of the mining activity, the seismic hazard is potentially elevated and warrants a more extended SHRA procedure. As the potential interaction between stress changes caused by gas field depletion or salt extraction on the one hand and geothermal operations on the other hand is too complex for assessment with the standard extensive SHRA-method, GT-projects of which the Aol overlaps with the Aol of another mining activity are referred to the Custom SHRA. More details of the assessment of overlap with the Aol of these mining activities are given below.

Gas fields

The Aol of gas fields is calculated based on the ratio between pressure depletion and initial reservoir pressure (dP/P). As a threshold above which induced seismicity occurs, the criterion of $dP/P < 0.35$ is taken, the value at which the first seismicity has been observed for Dutch small gas fields (SodM, 2016; van Wees et al., 2017). The pressure threshold is translated into a volume ratio (of 2.86), which is used as a scaling factor in the gas field Aol-extent calculation (i.e., the gas field Aol is 2.86 times larger than the gas field itself). The methodology and input data sets have been reported and illustrated in more detail in Q-Con (2021).

For the Groningen field, the connected aquifer outside the Groningen gas field is mapped (NAM, 2021). It was concluded that this map gives the best possible extent of the pressure depleted aquifer around the field. It was decided to combine this map with the Aol as created by the method described above to result in a final GT-Aol combining the two sources.

All onshore gas fields, and oil fields that produce or have produced gas, and their Aol based on the procedure described above, are shown in Figure 7. The shape with the gas field Aol's that should be used to check for overlap with the GT-Aol of the project can be found on www.nlog.nl.



Figure 7 Map showing: 1) Gas fields and gas producing oil fields onshore The Netherlands, 2) Gas field Aol's (coloured by stratigraphic level).

Vertical extent of the gas field

The gas fields shown in Figure 7 each occur at (one or more) specific stratigraphic levels. The depth range in which the subsurface stresses may have been influenced due to gas production, is vertically

(and stratigraphically) limited. To account for this, the assessment of the overlap between a GT-Aol and a gas field Aol also includes a vertical (depth) comparison component.

The vertical (or stratigraphic) extent of the producing (or abandoned) gas field Aol is defined lithostratigraphically. The geothermal and gas fields reservoir should be in a different stratigraphic (sub)group and there needs to be at least one stratigraphic (sub)group separating the geothermal and gas field reservoirs within the gas field Aol. This criterion pertains to the local stratigraphic sequence found at the project location, which may include lithostratigraphic discontinuities compared to the ideal sequence. In addition, the minimum vertical (stratigraphic) distance between the gas and geothermal reservoirs should be at least 200 m. If either of the two criteria is not met, a Custom SHRA will have to be performed.

For projects that pass both criteria above, it shall be checked if the GT-Aol encompasses a gas field bounding fault (see Figure 8). If it does, the project is also referred to the Custom SHRA.

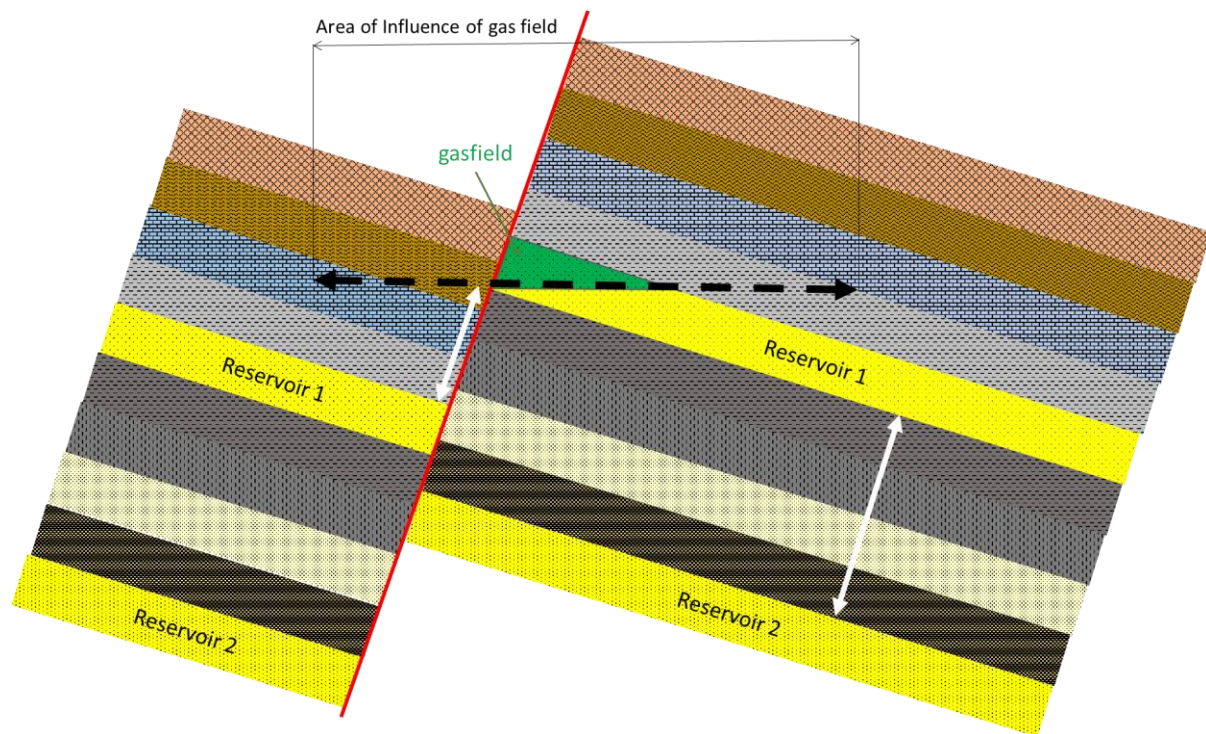


Figure 8 Cross-sectional sketch of a gas field (green) and its Area of Influence (Aol, black dashed line with arrow heads). The gas field Aol is defined by a buffer around the mapped field outline. White arrows indicate the required minimum spacing between two different reservoir levels.

Workflow and SHRA-route

The assessment of overlap between the GT-Aol and the Aol of producing or abandoned gas fields is schematically illustrated in Figure 9. If the GT-Aol overlaps with the Aol of a producing or abandoned gas field, and also in the depth domain is too close, the seismic hazard is potentially elevated. As the potential interaction of gas field depletion-induced stresses and thermal stresses due to the geothermal

operations is too complex for assessment with the standard extensive SHRA-method, such projects are referred to the Custom SHRA.

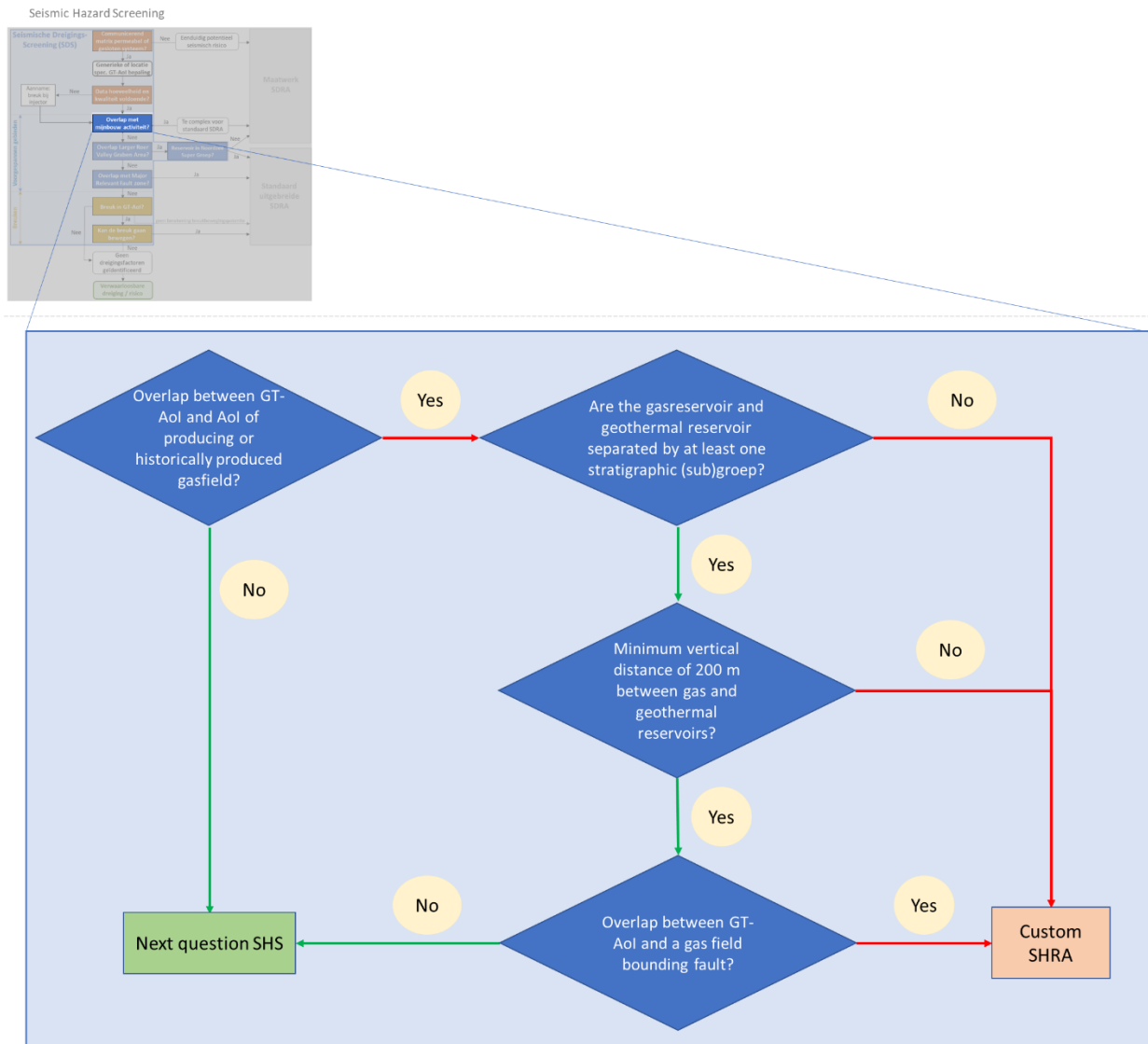


Figure 9 Schematic workflow for the assessment of overlap between the GT-Aol and the Aol of producing (or produced) gas fields. Inset shows the position of this element in the full workflow (for larger version, see Figure 9)

Salt caverns

Salt extraction, the creation of a cavern, production of salt and the subsequent slow convergence of the cavern will result in a significant change in the stress distribution. The salt cavern Aol is defined based on the volume of already produced salt plus the salt that is still going to be produced according to the production plan (*winningsplan*) of the respective salt cavern(s). Based on that volume, the stress changes as a result of this salt production are calculated, from the centre point of the cavern outwards. The GT-Aol is defined as the area where the stress change is 1 MPa or more. The salt cavern Aol is

calculated using an elastic Okada approach. The methodology is further explained in Van Wees (2023), who recreated and slightly modified the initial approach of Q-Con (2021).

All salt caverns in The Netherlands and their calculated AoI's are shown in Figure 10. The polygons of the salt cavern AoI's can be found on www.nlog.nl.

Stress changes due to salt extraction do not only occur laterally, but also in the vertical domain. For the purpose of the SHS, it is assumed that the AoI extends vertically upwards to surface and downwards to unspecified depths (Figure 11).

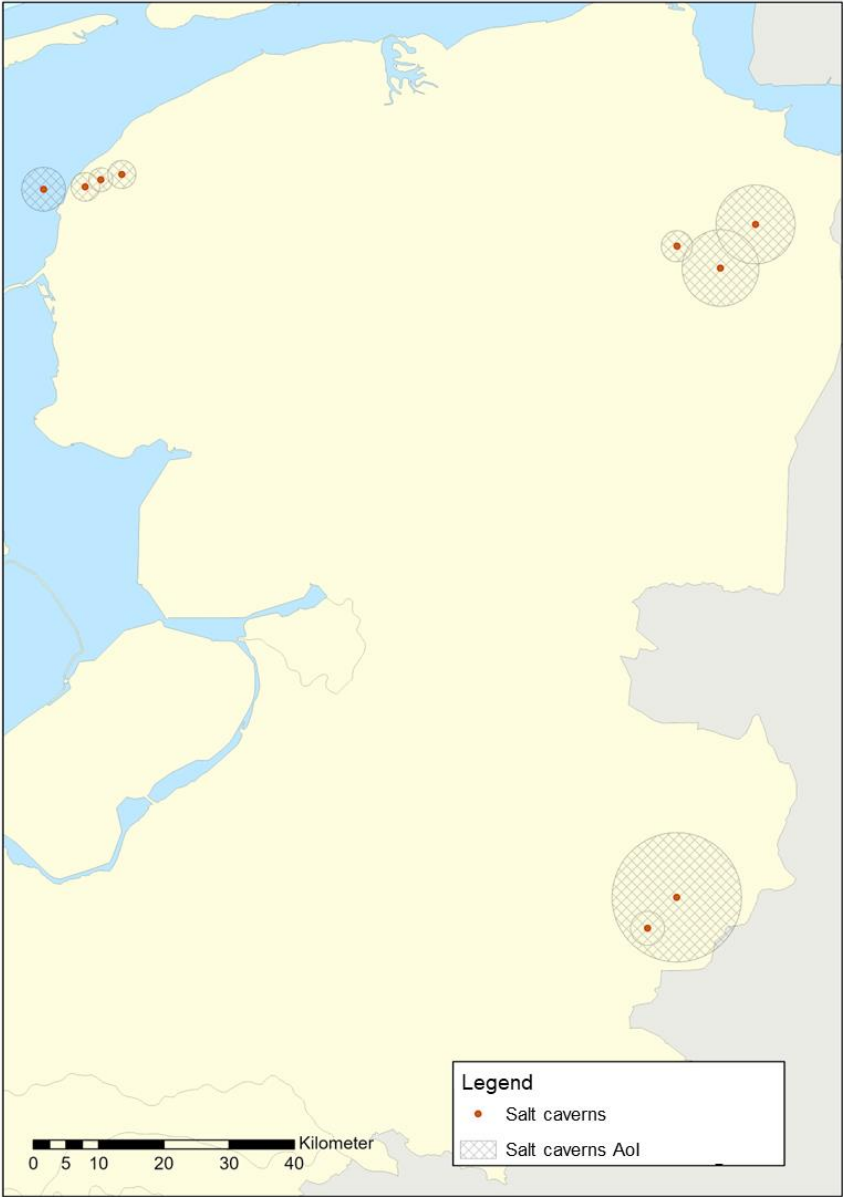


Figure 10 Map of the salt caverns in the Netherlands and their calculated AoI. When there is a cluster or field of caverns they are dealt with as a single cavern for the purpose of AoI calculation.

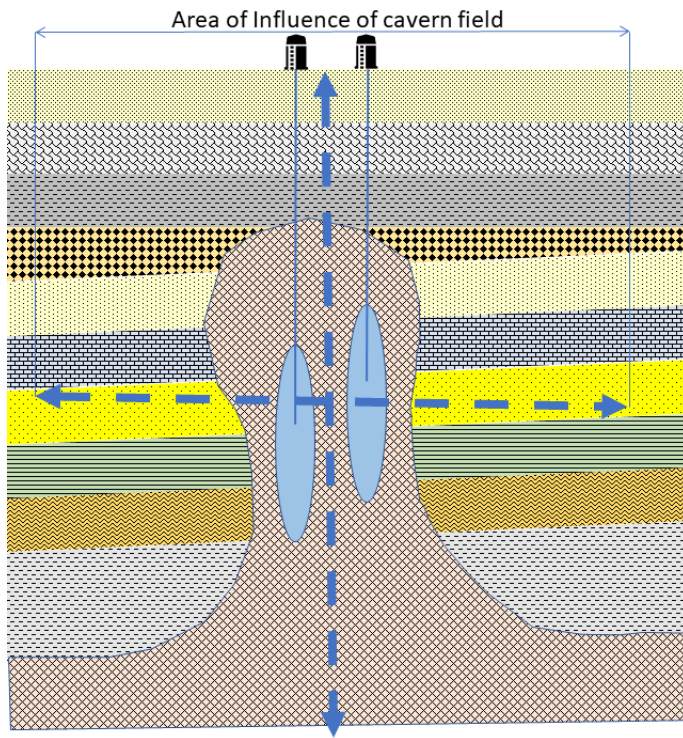


Figure 11 Cross-sectional sketch of a cavern field and its Area of Influence (indicated by blue dashed lines with arrow heads).

This will result in a cylindrical zone which will have to be compared with the Aoi of the geothermal project. If there is overlap, the seismic hazard is potentially elevated. As the potential interaction of salt mining-induced stresses and thermal stresses due to the geothermal operations is too complex for assessment with the standard SHRA-method, such projects are referred to the Custom SHRA (Figure 12).

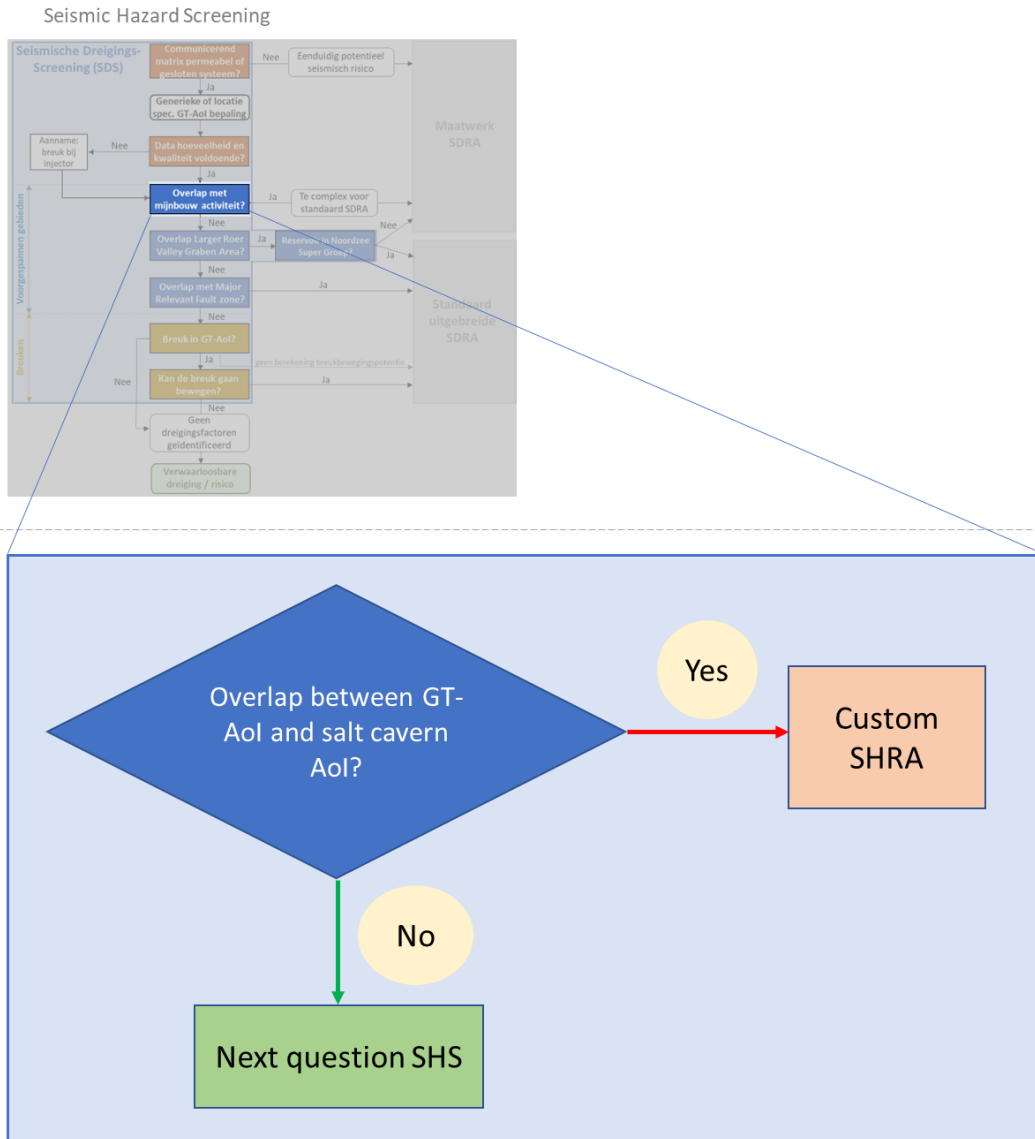


Figure 12 Schematic workflow for the assessment of overlap between the GT-Aol and the Aol of salt caverns. Inset shows the position of this element in the full workflow (for larger version, see Figuur 9).

Aquifer, abandoned gas field and cavern gas/fluid storages

Currently, there are no aquifer gas or fluid storages operational in the deep (> 500 m) Dutch subsurface. Therefore, this is not catered for in the current SHRA procedure. Should this become relevant in the future, the SHRA procedure will have to be adjusted to include such activities.

Gas or fluid storages in abandoned gas fields are included automatically in the gas field Aol's. Assuming that the maximum gas pressure is not allowed to exceed the virgin pressure of the gas field, the calculated gas field Aol's are also representative for the gas or fluid storages in these fields.

Likewise, gas or fluid storages in abandoned salt caverns are included automatically in the salt cavern Aol's. Assuming that the maximum pressure is not allowed to exceed the lithostatic (i.e., pre-cavern) pressure, the calculated salt cavern Aol's are also representative for the gas or fluid storages in these fields.

Larger Roer Valley Graben Area

The seismically active Larger Roer Valley Graben Area (LRVGA) in SE Netherlands is an area where the occurrence of natural seismicity is undisputed. Faults in this area are, in some cases, approaching a critical stress situation. The chance of inducing or triggering earthquakes is deemed significantly higher inside compared to outside this area. Therefore, by default the seismic hazard for geothermal projects planned in this region is deemed 'not negligible' and thus needs to be addressed with a more extensive SHRA.

A polygon has been defined for the delineation of the seismically active LRVGA area (Figure 13) primarily based on the:

- Outline of $PGA > 50 \text{ cm/s}^2$ based on the Dutch PGA map of KNMI (de Vos, 2010) that represents a seismic hazard threshold consistent with the Dutch Guideline for earthquake resilient construction of buildings (NEN, 2020)
- Occurrence of natural earthquakes listed in the online database of KNMI (2021)
- Historic earthquake catalogue of Houtgast (1991)
- Seismic-scale fault centre lines (DGMv5, from www.nlog.nl)
- Major fault system centre lines (HIKE database, Van Gessel et al., 2021)
- Recently shot and reprocessed 2D seismic data (SCAN, from www.nlog.nl)
- Structural-geological definition of the Roer-Valley Graben (primarily based on Kombrink et al., 2012)
- Bouguer anomaly map (from www.nlog.nl)

The methodology applied to develop the polygon and the input datasets are described in more detail in PanTerra Geoconsultants B.V. / IF Technology B.V. (2021B). The shapefile comprising the polygon outlining this area can be found on www.nlog.nl.

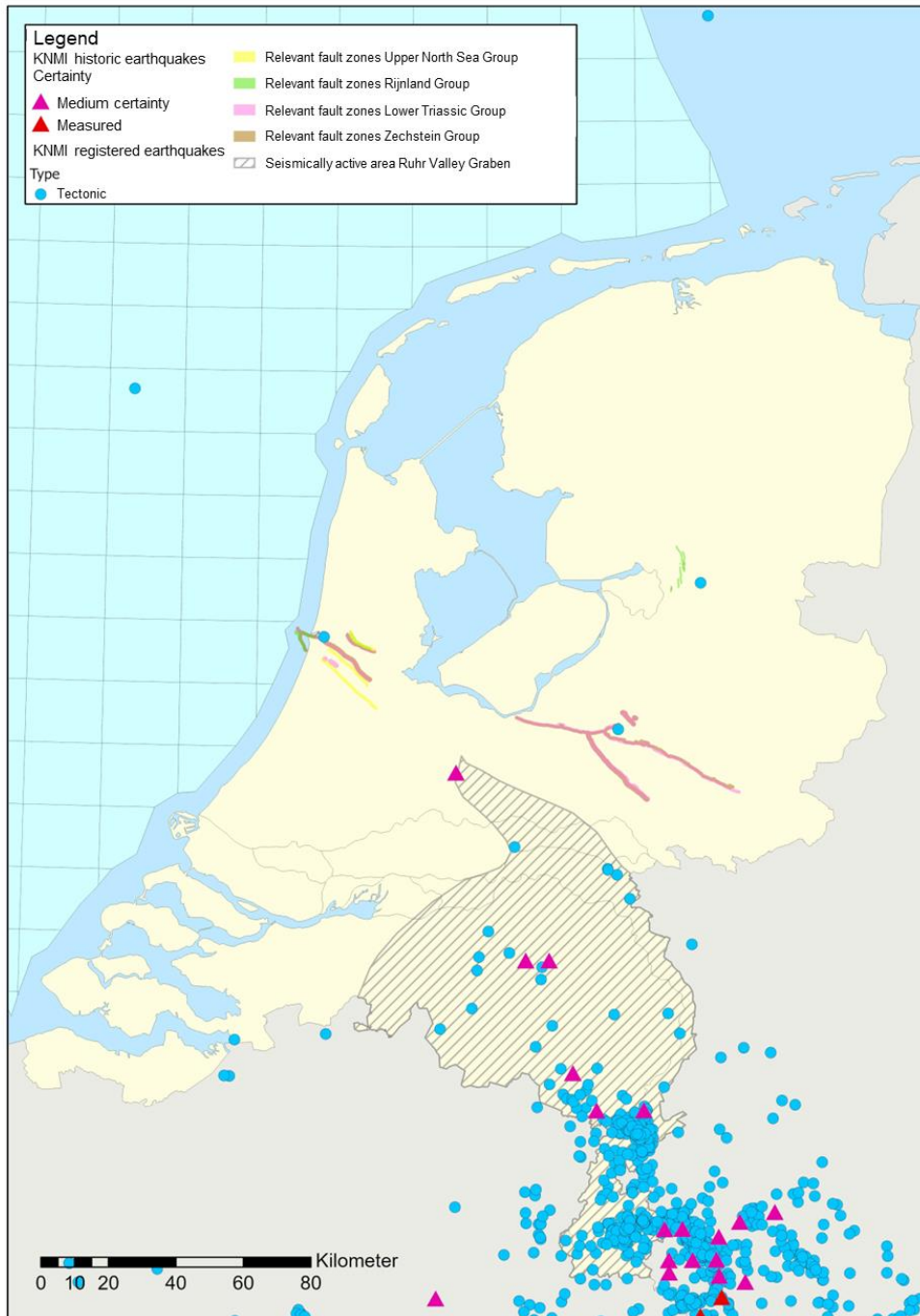


Figure 13

Map showing all tectonic earthquakes; blue dots are earthquake epicentral locations from the KNMI database, triangles are those from the historic earthquake database of Houtgast (1991; plotted are only those that were classified by KNMI (2021b) as (reasonably) reliable). Hatched polygon in SE Netherlands indicates the seismically active Larger Roer Valley Graben Area. Coloured lines in the central part of The Netherlands represent the "major relevant fault (zone)" trajectories including their uncertainty bandwidth.

Different SHRA-routes for projects within and below the North Sea Supergroup

If the GT-AoI is overlapping the seismically active LRVGA as depicted in Figure 13, a more extensive SHRA is required. The potential interaction between the stresses caused by the geothermal operation and the naturally stressed faults in the LRVGA is too complex for assessment with the standard extensive SHRA-method. In addition, the potential magnitude of the earthquakes that may occur in this area (due to naturally caused stress criticality) may, based on historic natural earthquake occurrence, be over the limit (threshold) of what is deemed acceptable for a geothermal operation. Therefore, such projects are generally referred to the Custom SHRA. An exception is made for geothermal projects that target the North Sea Supergroup as a reservoir. For such projects, it is deemed less likely that they may be able to trigger a significant earthquake on a naturally (near) critically stressed fault. The North Sea Supergroup is less consolidated and less competent than the underlying stratigraphic intervals. Also, it contains a lot of clay intervals that mechanically behave differently from the more competent sandstone or limestone intervals. Due to the lower degree of consolidation and the high amount of clay in the North Sea Supergroup, it is expected that the initial stresses in this stratigraphic interval will be further away from critical, as creep will relax (part of) the stresses. Also, due to the shallower depth, stresses would be smaller, so any movement, if seismic, would likely only give rise to low magnitude earthquakes. In order to trigger a large, deep-seated fault in the competent rocks below the North Sea Supergroup, cooled injection water would need to enter such a fault and make its way down along the fault plane. As in the LRVGA the lower part of the North Sea Supergroup generally consists of a non-reservoir or clay interval which lies between the North Sea Group reservoirs and the more competent Chalk and older stratigraphic intervals, movement on the fault along such a shale layer will most likely have sealed the fault in that section, thus preventing water flow downwards into the fault. Due to this mitigating effect, it is deemed acceptable for projects operating in the North Sea Supergroup to be assessed with the standard extensive SHRA-method.

The SHS step where the fault reactivation potential of faults is assessed does not need to be executed, as it shall be assumed that faults in this area are by definition prone to reactivation due to aberrant natural stress conditions. North Sea Supergroup projects in the LRVGA are directly referred to the standard extensive SHRA, where the potential maximum consequences of an earthquake at the reservoir level shall be calculated.

The workflow to be followed is schematically depicted in Figure 14.

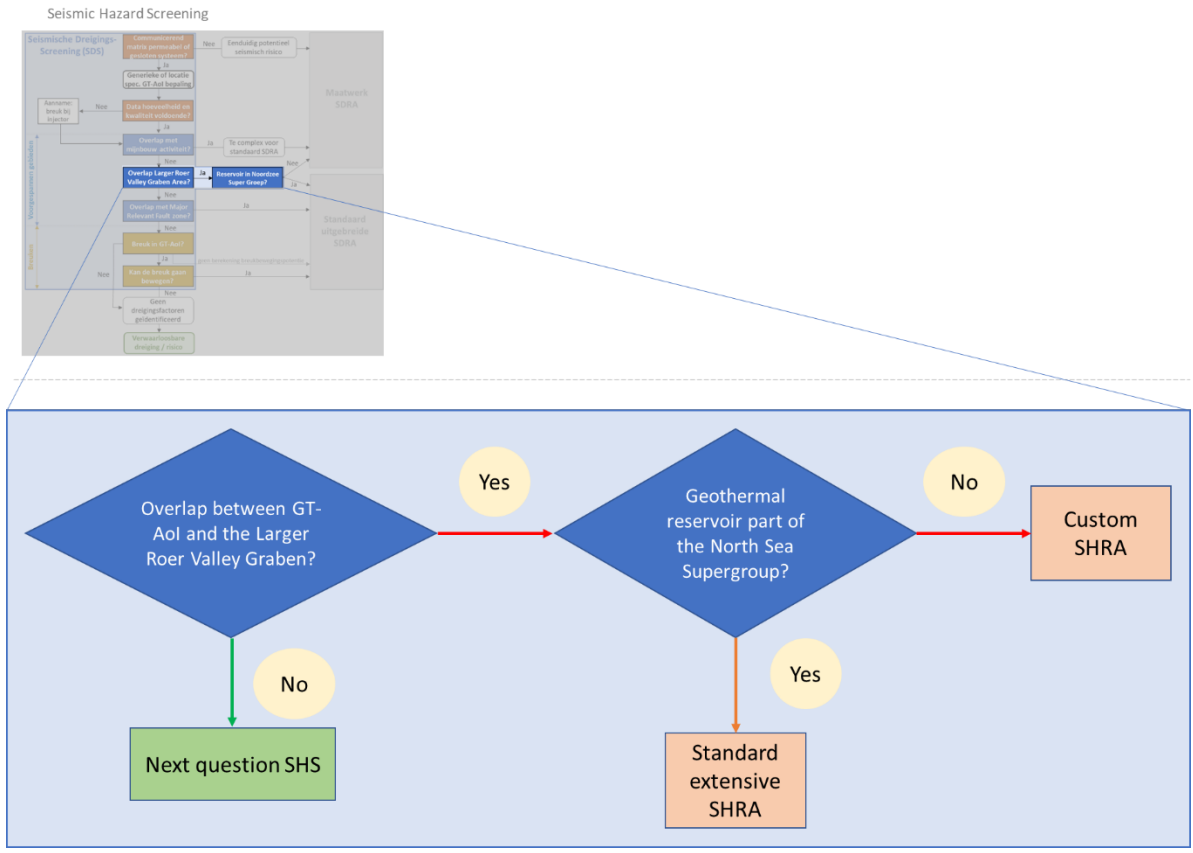


Figure 14 Schematic workflow for the assessment of overlap between the GT-Aol and the Larger Roer Valley Graben Area. Inset shows the position of this element in the full workflow (for larger version, see Figure 9).

Major relevant fault zones

Outside the LRVGA, some natural seismic events have been detected, some of which could be localized (close) to major fault zones (Figure 13). This suggests that these faults may (to some extent) be tectonically critically stressed. Therefore, these fault zones may be considered as seismicity sensitive areas.

Seismic events classified as ‘tectonic’ in the KNMI database and the screened historic database of Houtgast (1991, screened list by KNMI, 2021b) that have occurred outside the LRVGA are depicted in Figure 13. The map also shows the ‘major relevant fault zones’ within a radius of 9 km from these seismic events, derived from the HIKE database (Van Gessel et al., 2021). The 9 km radius has been chosen to reflect the positioning uncertainty on the seismic events. In a recent analysis of the positioning uncertainty of seismic events inside de LRVGA, KNMI (2021a) concluded that this was in the range of 3-9 km for historic earthquakes. Although events outside the LRVGA were not analysed, we take the upper limit of this range as indicative for the uncertainty on their locations. This is deemed relevant, as the positioning uncertainty on both natural events inside and outside the LRVGA is mostly dependent on the nationwide number and distribution of KNMI seismic monitoring stations.

The exact location of the faults making up the major relevant fault zones is to some extent uncertain. An uncertainty bandwidth between 250 and 750 m has been determined based on the type and density of the seismic data from which it is interpreted (e.g., 3D-seismic, high density 2D-covered areas or low density 2D-seismic; see PanTerra Geoconsultants B.V. / IF Technology B.V., 2021C). The outline around the uncertainty range of the major relevant fault zones associated to tectonic earthquakes shall be used to check for overlap with the GT-Aol. As most faults are dipping, four reference maps are made available: Base North Sea Group, Base Cretaceous, Base Triassic and Base Zechstein. The resulting “Major relevant fault zones” are shown in Figure 13. For each lithostratigraphic interval that is a geothermal target zone a dedicated reference map is available (see Table 1). The shape files containing these polygons are given on www.nlog.nl.

Table 1: Listing of fault zone reference maps to be used for a stratigraphic target zone

| Geothermal target | Reference fault map |
|--|---------------------|
| Cenozoic (N) | b. North Sea |
| Upper Jurassic – Lower Cretaceous (SLD & KNNS) | b. Rijnland |
| Triassic RBM & RN | b. Triassic |
| Rotliegend Slochteren (ROSL) | b. Zechstein |

SHRA-route for projects close to major relevant fault zones

Figure 15 gives the general workflow that should be followed to check whether the GT-Aol overlaps with a major relevant fault zone. If an overlap occurs, by default the seismic hazard for geothermal projects planned in this region is deemed ‘not negligible’ and thus needs to be addressed with a more extensive SHRA. The standard extensive SHRA-method is deemed suitable for these projects, as all tectonic earthquakes outside the Larger Roer Valley Graben Area registered so far were of magnitudes below the threshold deemed acceptable for geothermal projects (Table 2). Special condition within the SHRA for these projects is that the area between the geothermal well and the major relevant fault zone is imaged

well on seismic data, and the existence any potential d between the geothermal project and the fault zone is investigated and reported.

Table 2: Overview of onshore tectonic earthquakes outside the Larger Roer Valley Graben Area

| Event Location | Event Date | Magnitude | Latitude | Longitude | Depth (km) |
|-----------------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Rilland | 15-6-1988 | 2.1 | 51.38 | 4.26 | 3.1 |
| Ijmuiden | 30-1-1997 | 2 | 52.46 | 4.62 | 3.5 |
| Hoog Soeren | 3-2-1997 | 2.2 | 52.21 | 5.9 | 3.5 |
| Wuustwezel (België) | 1-8-2001 | 1.8 | 51.4 | 4.65 | 5.4 |
| Beveren (België) | 14-2-2008 | 1.9 | 51.29 | 4.24 | 1.9 |
| Beveren (België) | 14-2-2008 | 2.3 | 51.29 | 4.22 | 3.4 |
| Punthorst | 3-9-2020 | 1.93 | 52.6 | 6.27 | 10 |

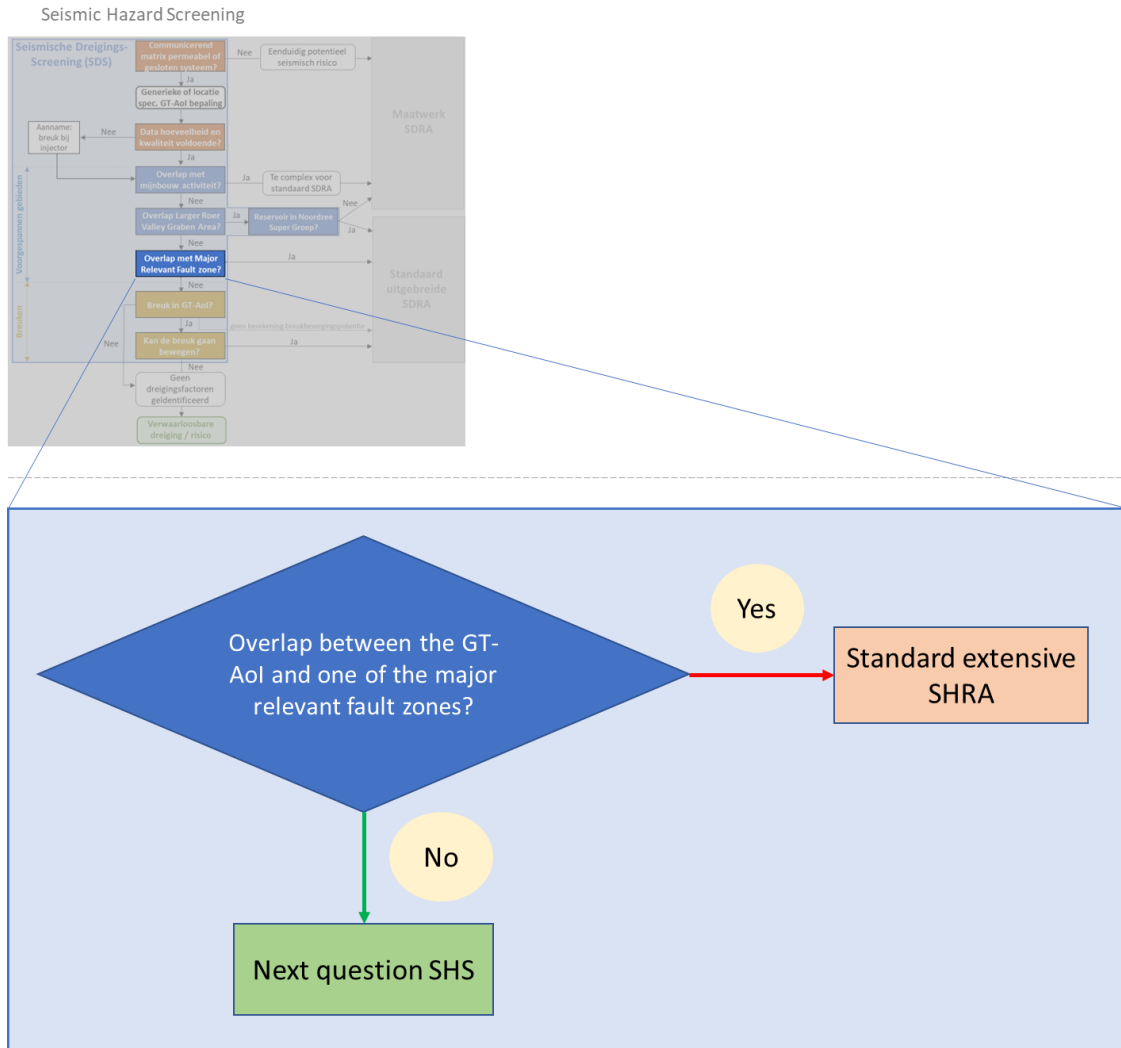


Figure 15 Schematic workflow for the assessment of overlap between the GT-Aol and major relevant fault zones. Inset shows the position of this element in the full workflow (for larger version, see Figuur 9).

Presence of faults and their reactivation potential

For projects that do not have an overlap with areas with aberrant stress conditions, the next step in the SHS-screening is to assess whether one or more faults are present within the GT-Aol. If no faults are present in the GT-Aol, the project is considered to have negligible seismic hazard, and no further SHRA steps are required (Figure 16). As the hazard is negligible, so is the risk, so no assessment of the potential damage is required (or possible).

In case of one or more faults in the GT-Aol, the reactivation potential of such faults should be assessed. This assessment is more elaborate than the previous screening steps, as it requires a substantial amount of geological and operational input data and a relatively complex calculation. These two screening steps are described in more detail below.

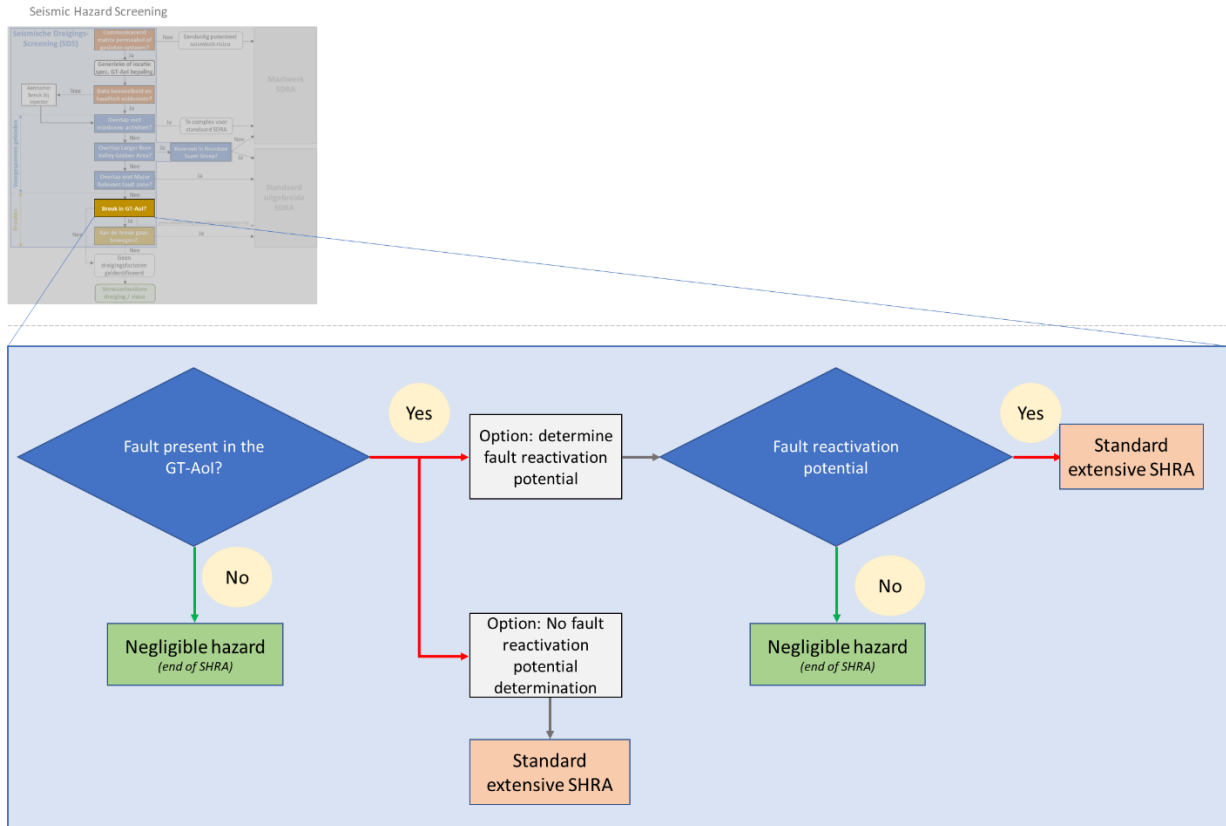


Figure 16 Schematic workflow for the assessment presence and reactivation potential of faults. Inset shows the position of this element in the full workflow (for larger version, see Figure 9). Figure 9.

Presence of faults in the GT-Aol

For projects with insufficient seismic coverage and quality, it shall be assumed (see section ‘Outcome of the seismic data coverage and quality workflow’) that at least one fault is present in the GT-Aol. For projects with sufficient seismic coverage and quality (see ‘Seismic data coverage and quality’), it shall be assessed whether one or more faults are present in the GT-Aol. If this is the case, for each of the faults, an assessment of the fault reactivation potential is to be made (see next section). Alternatively, the operator may elect to skip the fault reactivation assessment, but then it shall be assumed that the faults *have* reactivation potential (i.e., worst-case assumption). In the latter case, the project is referred to the standard extensive SHRA for further analysis of the potential consequences in case the fault(s) reactivate. The workflow is illustrated in Figure 17.

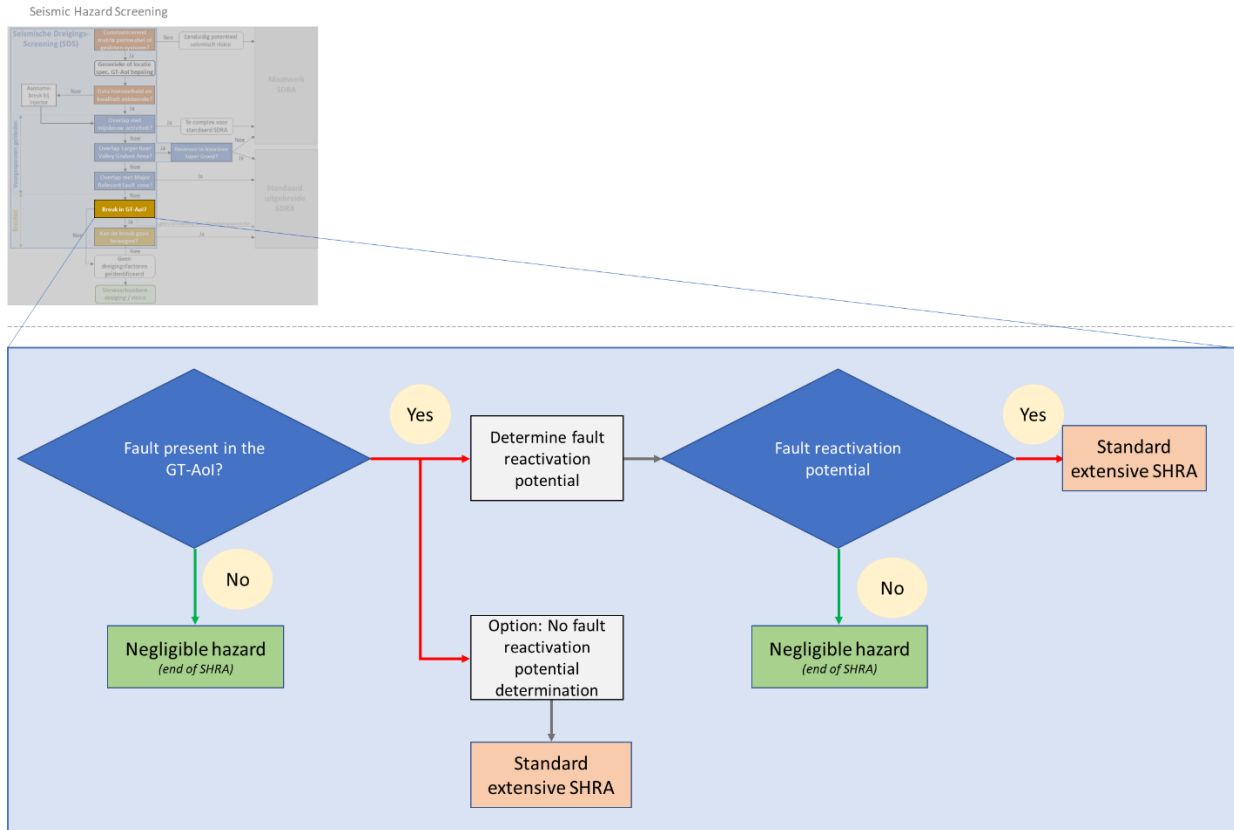


Figure 17 Schematic workflow for the assessment presence and reactivation potential of faults. Inset shows the position of this element in the full workflow (for larger version, see Figuur 9/Figuur 9).

Fault reactivation potential assessment

Geothermal operations result in pressure and temperature perturbations in the subsurface. These changes lead to perturbation of the pre-operation, virgin stresses in both the reservoir and on faults within the GT-Aol (previous section). If the stress changes on a fault lead to exceedance of the shear strength of that fault, fault slip can occur (i.e., the fault is reactivated). To assess whether fault reactivation is likely to occur within the GT-Aol, a first-order computation of the pressure and temperature changes, and the related stress changes, can be performed using the Seal and Reservoir Integrity Mechanical Analysis tool (SRIMA).

SRIMA (Seal and Reservoir Integrity Mechanical Analysis)

For ‘standard’ geothermal projects in matrix permeable reservoirs outside (potentially) critically stressed areas, it is neither deemed realistic, nor required, to perform complex 3D modeling exercises to compute the fault reactivation potential. SRIMA provides a simplified approach by which the first-order effects of pressure and temperature changes and their effect on the stresses are captured. SRIMA is a semi-analytical tool which allows for relatively fast calculation of pressure and temperature changes around a well injecting cold fluids into a porous reservoir. To allow for a semi-analytical calculation that also can be run in stochastic mode, a number of assumptions are made. In Table 3 the main components of SRIMA are listed; for a detailed description we refer to Fokker et al. (2023) and for a practical user manual of the tool to ‘Appendix A2 – User manual Location Specific SHRA tooling (SRIMA)’.

The calculations of SRIMA have been benchmarked against reservoir simulator Eclipse for the pressure and temperature, and DIANA Finite Element for the poro-elastic and thermos-elastic stress changes (Buijze et al., 2021, Fokker et al., 2023). First-order features of the stress changes are captured (mostly <10% difference). For a normal faulting regime, the fault stress changes are slightly overestimated within the reservoir (conservative from a fault reactivation perspective). Just outside the cooled volume, fault stress changes are slightly underestimated (not conservative); however, the stresses decay rapidly with distance from the cooled volume and the impact of this underestimation is therefore quite local. Because the volume in which stress is underestimated is small, the effect on the fault area that is affected by the underestimation, and hence the effect on magnitude will be limited. Stiffness contrasts between seal and reservoir should not be too large (preferably < 2x). Furthermore, in SRIMA the effect of the production well on the PT-distribution is not accounted for. The presence of the production well leads to an asymmetric development of the cooled reservoir volume (cold front) towards the production well. In the other directions the extent of the cold front is well captured by assuming just the injection well.

Table 3 Main components of SRIMA (Seal and Reservoir Integrity Mechanical Analysis)

| | |
|-----------------------------|--|
| Radially symmetric geometry | The model geometry consists of a radially symmetric horizontal seal – reservoir – base sequence where fluid is injected into the center (Figure 18). The reservoir has a high permeability, whereas the permeability of the seal and base is orders of magnitude lower. |
| Fault geometry | A (virtual) fault is assumed within the model space with dip θ and strike φ . The distance to the injector is defined as the distance of the fault in the center of the reservoir to the well. Fault slip and stress redistribution along the fault is not modeled. The fault has no offset. |
| Injection | Injection is assumed to occur evenly over the well-reservoir interval, with a prescribed injection rate which is constant over time. |
| Pressure changes | Within the reservoir, steady-state flow is assumed, which results in an approximately logarithmic pressure profile with distance from the well. Pressure changes assumed are uniform over the vertical position within the reservoir, which can be justified for relatively thin reservoirs with thicknesses smaller than 300 m. This is suitable for the thickness of typical Dutch geothermal reservoirs. A benchmark with reservoir simulator Eclipse showed good agreement between the pressure changes (Fokker et al., 2023). |
| Temperature changes | Heat flow in the reservoir is assumed to occur through radial-horizontal advection only, whereas heat flow in the low-permeability seal and base is assumed to occur through vertical diffusion (Mossop, 2001). As for the pressure, within the reservoir the temperature change is constant in the vertical direction. In the seal and base the temperature change gradually reduces with distance from the well. |
| Linear elasticity | A linear elastic medium is assumed. Young’s modulus in the seal and base can adopt a different value compared to that in the reservoir. |
| Initial stress | Initial stresses in the formations are set based on gradients in vertical stress, horizontal stresses and pressure. Anisotropy in the horizontal stresses can be incorporated, as well as different minimum horizontal stress gradients for the seal/base and the reservoir. These stresses are transformed to shear and normal |

| | |
|------------------------------|---|
| | stresses on the fault. The strike of the fault with respect to the strike of the maximum horizontal stress is accounted for in the initial stress calculation. |
| Poro-elastic stress change | Pressure changes are one-way coupled to stress changes (i.e., elastic deformation does not affect flow). The poro-elastic stress change is obtained by approximating the pressure change at each point in the model with an 'equivalent pressurized cylinder' (see details Fokker et al., 2023). For this equivalent pressurized cylinder, analytical solutions (Myklestad, 1942) are available to compute the poro-elastic stress change. Stress changes have been benchmarked against Finite Element simulations and show good agreement. |
| Thermo-elastic stress change | Temperature changes are one-way coupled to the stress changes. The temperature field is discretized into 10 steps of equal pressure change, for each of which an equivalent cylinder with uniform temperature change was assumed. Analytical expressions can be used to compute the thermo-elastic stress change within and outside this cylinder (Myklestad, 1942, Perkins and Gonzalez, 1985). |
| Final stress | Poro- and thermo-elastic stress changes are superposed onto the initial stress field. |

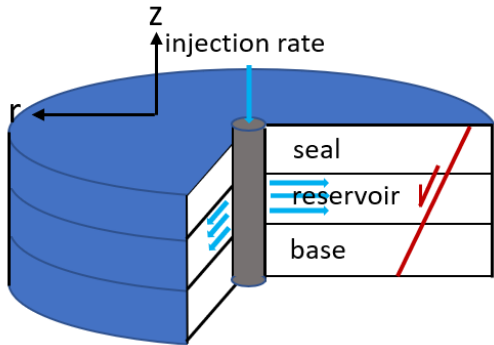


Figure 18 SRIMA model geometry. A (virtual) fault is assumed within the model space.

Pressure, temperature and stress changes

An example of the pressure and temperature fields computed in SRIMA is shown in Figure 19. With time the pressure and temperature fronts propagate into the reservoir formation. Pressure changes decay rapidly with distance from the injection well (note the logarithmic scale of the x-axis). Temperature changes propagate further into the reservoir. Diffusion of pressure and temperature into the seal and base can be observed in particular at the longest timesteps modeled.

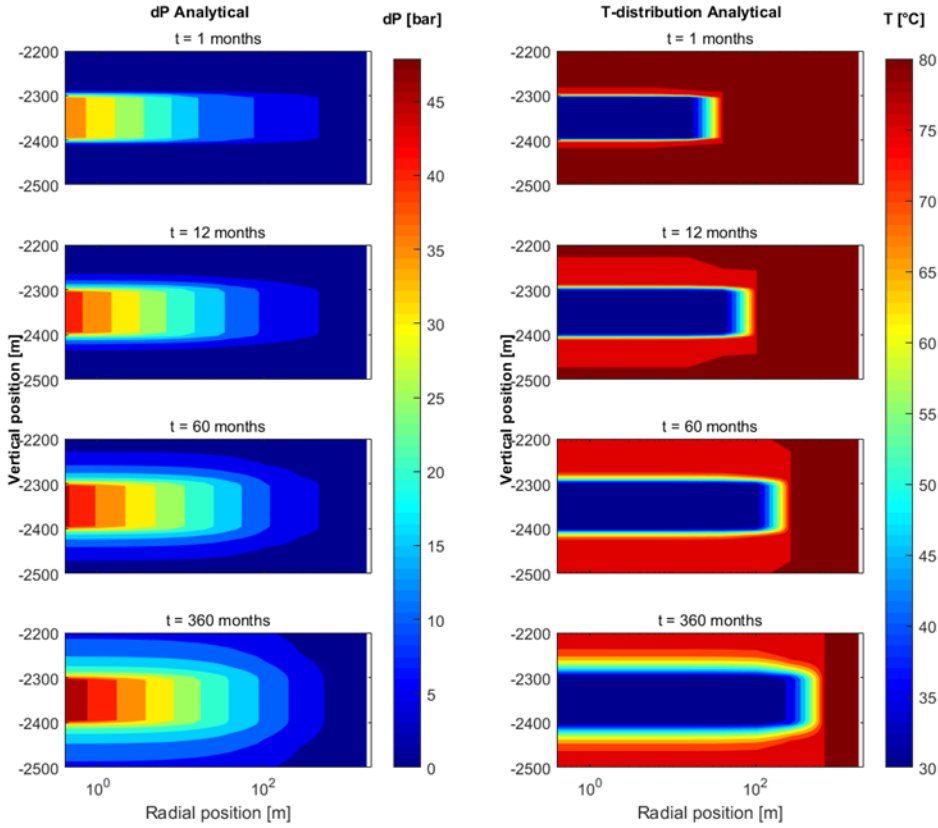


Figure 19 Example of pressure change and temperature field computed in SRIMA, at various times. Reservoir: 2300 – 2400 m depth.

Fault reactivation

To assess fault reactivation, the shear and normal stresses (initial + stress changes) on the virtual fault in the model space are considered. The Mohr Coulomb failure criterion is assumed for the fault strength

$$\tau_f = \mu(\sigma_n - P) + C = \mu\sigma_n' + C \quad 1$$

Where τ_f is the shear stress at which shear failure occurs, μ is the static friction coefficient, σ_n' is the effective normal stress, P is the pressure at the fault and C the cohesion. The proximity to failure can be expressed as the Shear Capacity Utilization (SCU)

$$SCU = \frac{\tau}{\tau_f} = \frac{\tau}{\mu(\sigma_n - P) + C} \quad 2$$

An SCU of 0 indicates the lack of any fault shear stress (stable), and an SCU of 1 indicates the Mohr-Coulomb criterion has been reached and fault slip can occur. Note that fault slip and stress redistribution is not modeled in SRIMA. Therefore, the state of stress can be such that the SCU on the virtual fault is larger than 1.

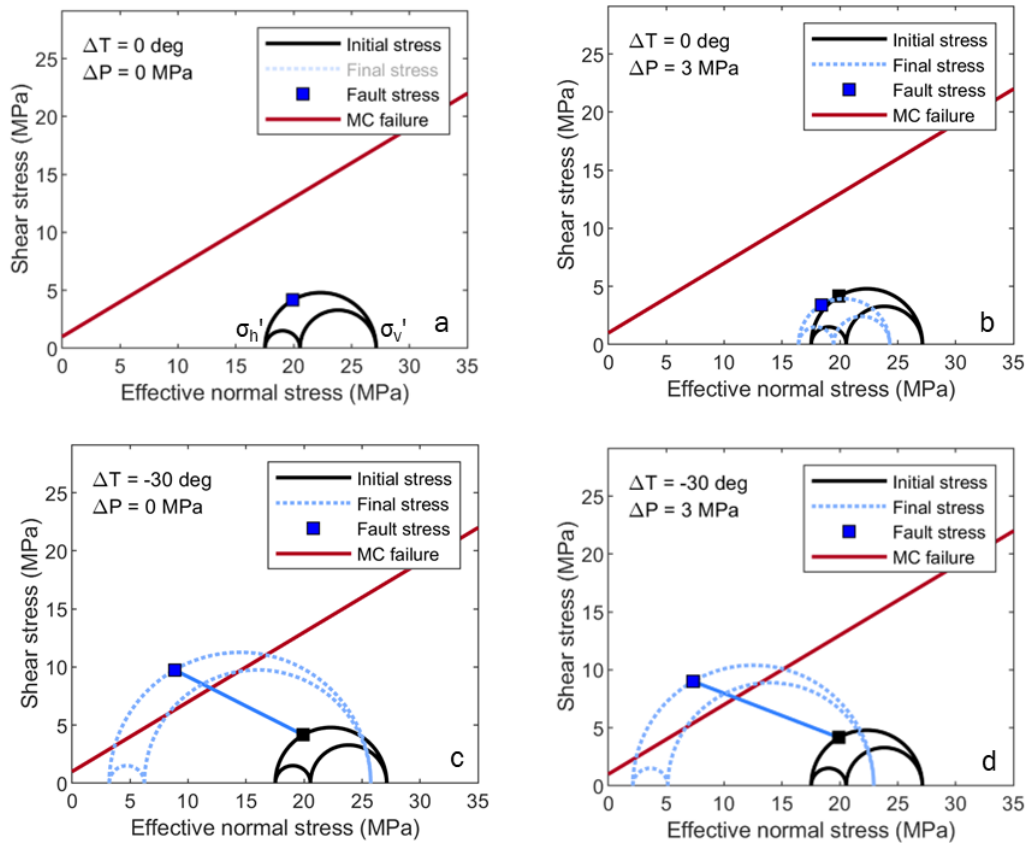


Figure 20 Example figure of stress changes on a single point on a fault within an oblate spheroid shaped reservoir with an aspect ratio of 1/20, for a normal faulting regime. Fault friction coefficient is 0.6, cohesion 1 MPa. A) initial stress, b) poro-elastic stress change due to 3 MPa pressure increase, c) thermo-elastic stress change due to 30 degrees cooling, d) combined poro-elastic and thermo-elastic effect. MC failure is the Mohr-Coulomb failure criterion line (e.g. Coulomb, 1776; Mohr, 1900; Jaeger and Cook, 1979; Labuz and Zang, 2012)..

An example of the stress change on a single point on a 60° dipping fault is shown in a Mohr diagram in Figure 20. An increase in pressure reduces the differential stress ($\sigma_v - \sigma_h$), which is reflected by the reduced Mohr circle radius, and reduces both the effective normal stress and the shear stress on the fault (Figure 20b). A decrease in pressure leads to a reduction of the mean stress ($(\sigma_v' + \sigma_h')/2$) (Mohr circles shift to the left) and an increase of differential stress (Mohr circle grows). The corresponding fault stress changes with a decrease in effective normal stress and an increase in shear stress. The combined poro-thermo-elastic stress change is shown in Figure 20d. The final shear stress exceeds the fault strength (MC failure line), indicating shear failure (fault reactivation) to occur. For example, the corresponding SCU of the final fault stress in Figure 20c would be 1.5.

The injection pressures required for injection into porous reservoirs are generally limited. Also, for the Dutch geothermal projects, injection pressures are formally restricted to make sure that seal failure is avoided. Currently, this is arranged in the SodM injection protocol (2013, 2019), in the future this is expected to be replaced with the SRIMA tensile failure tool (Mijnlieff and Maaijwee, 2023). In addition, the injection pressures decay rapidly with distance from the injection well in matrix permeable

reservoirs. Temperature changes are significant, with temperature decreases of several 10's of °C. The thermo-elastic stress changes therefore dominate the total stress change away from the wellbore.

In SRIMA the expanding cold front grows over time and may pass the fault in the model space. In that case, each point on the fault will experience a different evolution of stress. The interaction of the cold front with the fault, and its effect on the fault stresses, is shown in Figure 21. In this scenario, the cold front reaches the fault after 36 months. However, it can be observed that the cooled volume already influences the fault stresses (top two rows), as the stresses around the cooled volume are also perturbed. From 36 months, the fault area that is cooled grows gradually, as does the fault area experiencing stress changes. The bottom of the cooled area is wider; this is due to the fact that the fault in the illustrated scenario is dipping towards the injection well. As explained in the previous section, the cooling leads to a reduction in normal stress and an increase in shear stress. The net effect is an increase in SCU. The largest stress change is observed near the bottom of the reservoir where the cold front first reached the fault, in the middle of the cooled volume (along-strike length 0).

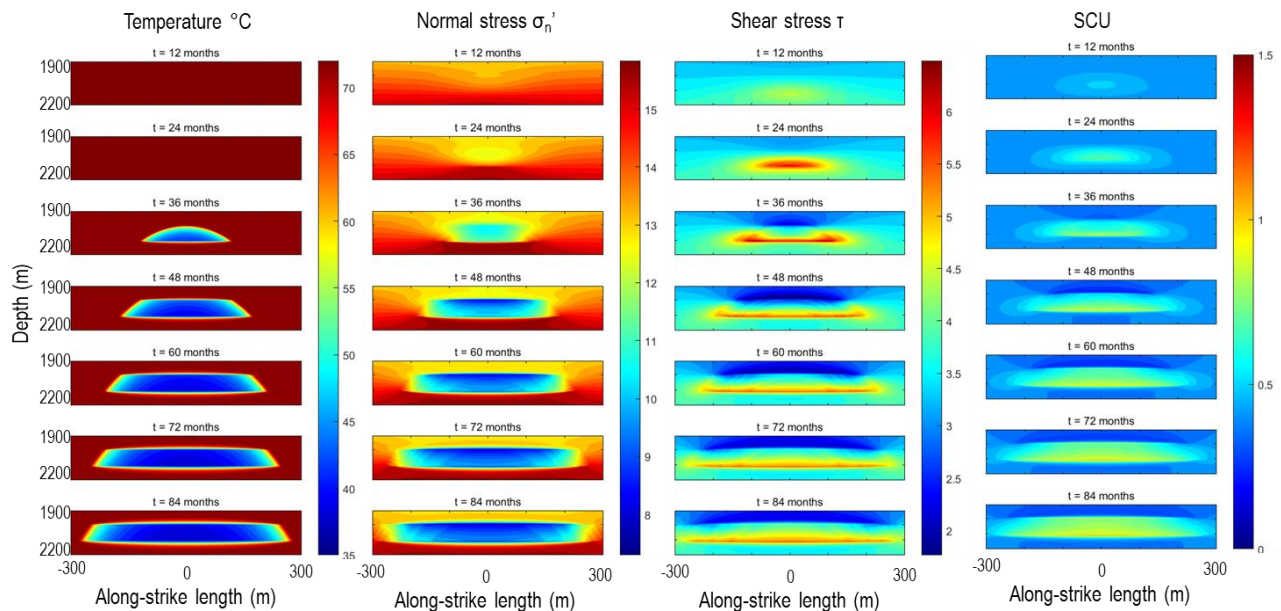


Figure 21 Example stress change development on the fault plane as the cold front passes the fault.

Stochastic analysis of fault reactivation

An important aim of SRIMA is to assess probabilities of fault reactivation, as many of the input parameters are uncertain. Therefore, the implementation has been embedded in a stochastic framework. First, the parameters which are uncertain are identified by the user. Then, many realizations of model parameter combinations are created, where these parameters are varied independently. The parameters are drawn from a (optionally skewed) bi-triangular probability distribution with an expected value and maximum and minimum values. For each realization, fault stresses are computed, from which in turn the SCU is calculated for each realization.

Workflow in the SHS

For each of the faults in the GT-Aol, the probability of fault reactivation can be calculated with SRIMA (in case it is elected to *assume* fault reactivation, one can proceed directly to the standard extensive SHRA-procedure). For projects with insufficient seismic coverage and quality, in these calculations a fault shall be assumed at (or infinitely close to) the location of the injector well. This fault shall be assumed to have the optimal orientation to be reactivated (i.e., the ‘worst-case’ in terms of seismic hazard). This means that a strike parallel to the orientation of the maximum horizontal stress direction (σ_{hmax}), and a dip angle of 60° shall be assumed.

If <5% of the realizations returns an SCU-value of ≥ 1 , the chance of fault reactivation is considered negligible. If this is the case for a project, the SHRA ends here, and the project obtains the classification ‘negligible hazard’ (Figure 22). For all other projects (those with $\geq 5\%$ of the SCU realizations ≥ 1) it is deemed that there is a chance of fault reactivation. Therefore, these projects will have to proceed to the standard extensive SHRA to assess the largest credible earthquake potential consequence in case of fault reactivation. This procedure is described in the next sections.

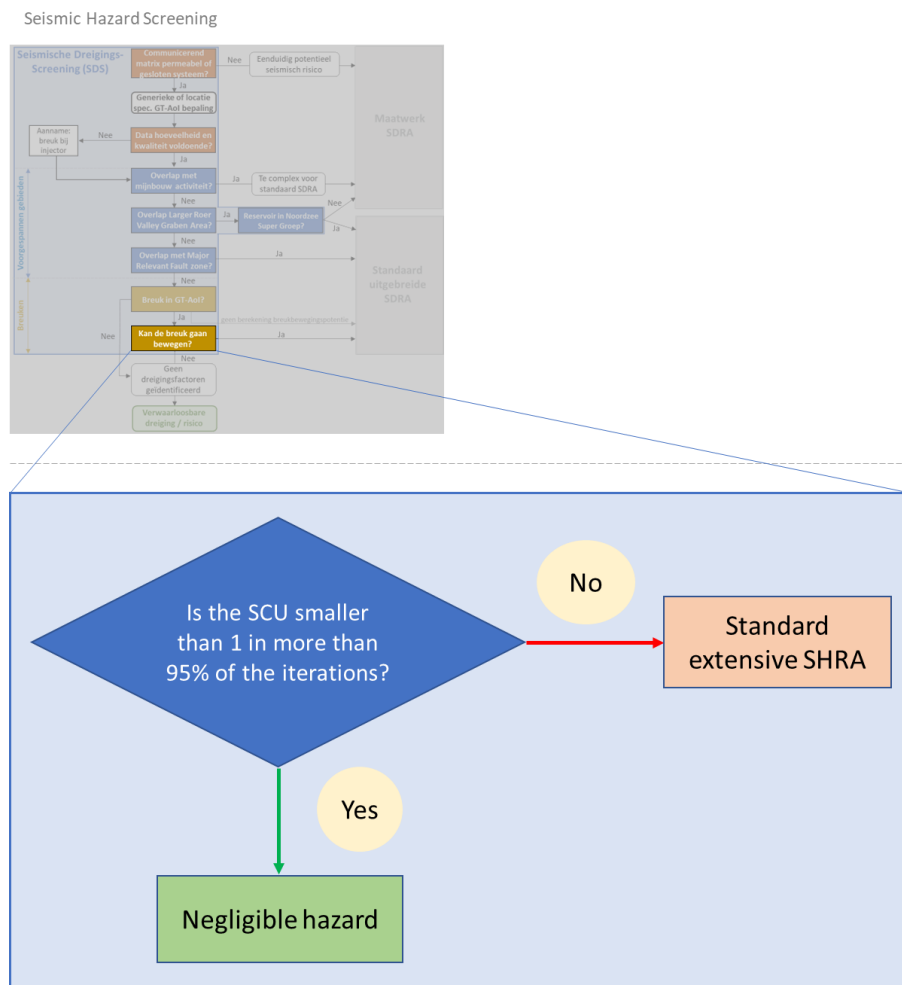


Figure 22 Schematic workflow for the assessment of fault reactivation. Inset shows the position of this element in the full workflow (for larger version, see Figuur 9).

Standard extensive SHRA-procedure

To compute seismic hazard, a (pseudo) Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) can be performed with SRIMA (the set-up of which was introduced in the section 'SRIMA (Seal and Reservoir Integrity Mechanical Analysis)'). A Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), as is often the standard and as is currently in place for the Groningen field (TNO, 2020), cannot be used as (seismic event) data for such an analysis at sites of geothermal projects is lacking. There are fundamental differences between a DSHA and a PSHA. One of the differences is the fact that in PSHA seismicity rates (and their uncertainties) of all possible sources are considered as well as many other uncertainties in the source characteristics (e.g., location), whereas for DSHA only (scenario-based) magnitudes per source are considered without a given rate, and less/no uncertainties in the source characteristics are taken into the hazard calculation (see also discussion in Fokker and Buijze, 2020). The DSHA as implemented here makes use of SRIMA to compute scenario-based magnitudes and PGV. The basic components of the DSHA as implemented here are:

- Source characteristics (event location and depth): a single event location is used for each model iteration in SRIMA, taken as the minimum distance from the fault to the injection well at the reservoir level.
- Magnitude: a largest credible earthquake magnitude, largely determined by the fault area affected by the geothermal operation in SRIMA. One magnitude is returned per model iteration.
- Ground motion (conversion to Peak Ground Velocity): empirical Ground Motion Prediction Equations are used to compute the Peak Ground Velocity (PGV) probability density functions (pdfs) with epicentral distance, for each model iteration.
- Seismic hazard: combination of PGV pdfs of all model iterations, expressed in a certain characteristic value. Here: mean probability of exceedance of the PGV at the epicenter, contour of mean probability of exceedance of 3 mm/s.

The potential consequences of the largest credible earthquake are addressed in the section 'Procedure to assess required amount of damage claim provision (*'schadevoorziening'*)'.

In the following sections, the method and rationale behind the DSHA approach are described in more detail.

Event location and depth

The stressed fault area will be used as a proxy for the largest credible earthquake magnitude (next section). The center of the stressed fault area lies (approximately) at the mid-depth of the reservoir, at the location where the fault under assessment is closest to the injection well (Figure 23).

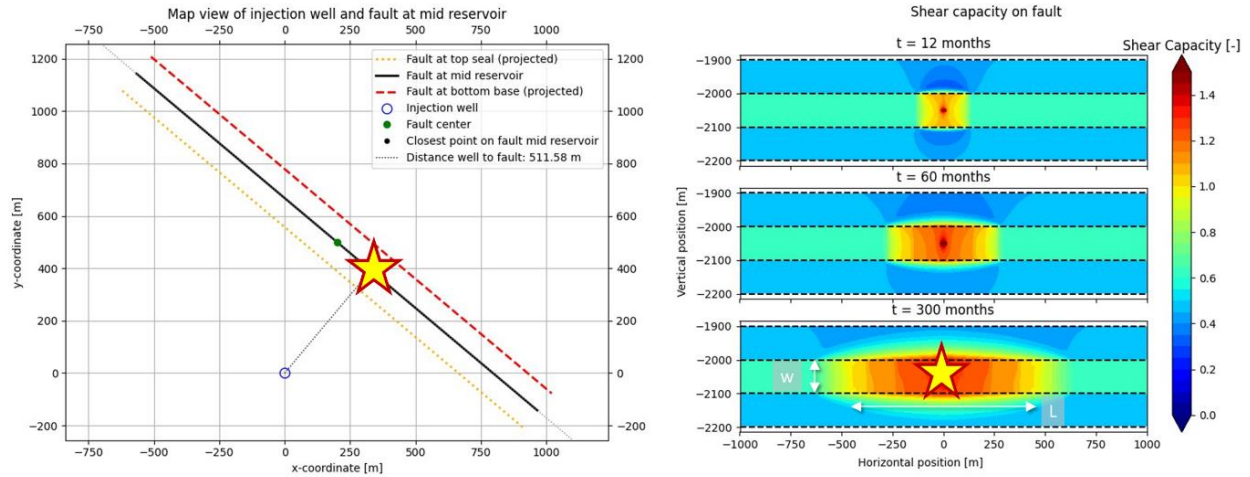


Figure 23 Illustration of epicenter location (star) in SRIMA (a) and determination of fault area where SCU ≥ 1 (b). The hypocenter (star) is also indicated in (b).

Magnitude

It is not (yet) practically possible to perform any modeling of fault slip and (dynamic) rupture to obtain the rupture area, seismic moment, or seismicity rates with a DSHA. Moreover, monitoring data to validate such computations or to construct seismicity catalogs are not available. Therefore, assumptions have to be made regarding the largest credible earthquake magnitude. This can be done by using known mapped faults and assuming any slip events remain confined to the rock volume perturbed by the geothermal operations – i.e., assuming a low-stress environment where triggering of seismicity far from the activity does not occur. This is consistent with most observed (depletion-)induced seismic events in the Netherlands, which are close to or within depleting gas-fields.

Seismic moment, and hence moment magnitude, scales with the fault area that is slipping seismically as well as the static stress drop or fault slip (Aki, 1966). For buried dip-slip faults (normal faults) as representative for faulting in the Netherlands, the seismic moment M_0 [Nm]) is related to the area of the slip event as (Kanamori and Anderson, 1975; Starr, 1928)

$$M_0 = \frac{3\pi}{8} \Delta\tau w^2 L \quad 3$$

Where $\Delta\tau$ is the stress drop, L is the along-strike dimension of the slip zone and w is the along-dip dimension of the slip zone, i.e., for a vertical fault the w would be the depth interval of the slipping zone. The seismic moment can be converted to a moment magnitude M_w through (Hanks and Kanamori, 1979)

$$M_w = \frac{2}{3} (\log_{10}(M_0) - 9.1) \quad 4$$

As a proxy for the area contributing to the largest credible earthquake magnitude, the fault area affected by the geothermal operations is used. This is comparable to one of the ways the M_{\max} is computed in ‘Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning’ (SodM, 2016), which is used for the Dutch small gas fields. For the small gas fields the affected fault area is defined as the maximum fault area intersecting the gas-filled parts of the reservoir. For geothermal projects another definition needs to be used, as the cooled volume expands over time. Here the affected fault area is determined by considering the SCU value on the fault (Figure 23).

For each iteration, for a given timestep, the distribution of computed SCU values (Equation 2) on the fault plane is considered. The slip zone is defined as the fault area where $SCU \geq 1$. The slip zone dimension input into the largest credible earthquake magnitude M_{LCE} computation is as follows:

- The slip zone width w is defined as the average of the along-dip fault length within the slip zone where $SCU \geq 1$.
- The slip zone length L is defined as the average of the along-strike length within the slip zone where $SCU \geq 1$.

Besides the slip zone dimensions, a stress drop $\Delta\tau$ over the slip zone is required for the calculation. Fault slip and changes of stress due to fault slip are not modeled in SRIMA, therefore an assumption must be made for the stress drop. This can be done on the basis of observed stress drops, and/or the available shear stress on faults within the AoI. Typically, stress drops for induced events in the Netherlands range between 0.1 and 10 MPa (e.g. Kraaijpoel and Dost, 2013; Bommer et al., 2016; Ameri et al., 2020). For the Dutch small gas fields risk analysis 5 MPa is deemed an appropriate value for calculation of the strongest realistic possible earthquake (SodM, 2016). For geothermal projects, it is expected that the stress drop is on average lower than for gas depletion (see 'KADER Basistheorie voor breukbeweging'). The appropriate stress drop for the M_{LCE} computation can be determined with a methodology chosen by the operator and should be properly justified. Alternatively, the stress drop module in the SRIMA tool can be used to calculate the stress drop. In that case, at each point within the slip zone, the stress drop $\Delta\tau$ is defined as the difference in shear stress between the point where the stress path intersects the failure line, and the residual shear stress which is defined using a residual friction coefficient of 0.3 (Figure 24). The residual friction is based on laboratory measurements on sand fault gouges by Hunfeld et al., 2021. This stress drop is then averaged for all the points within the slip zone.

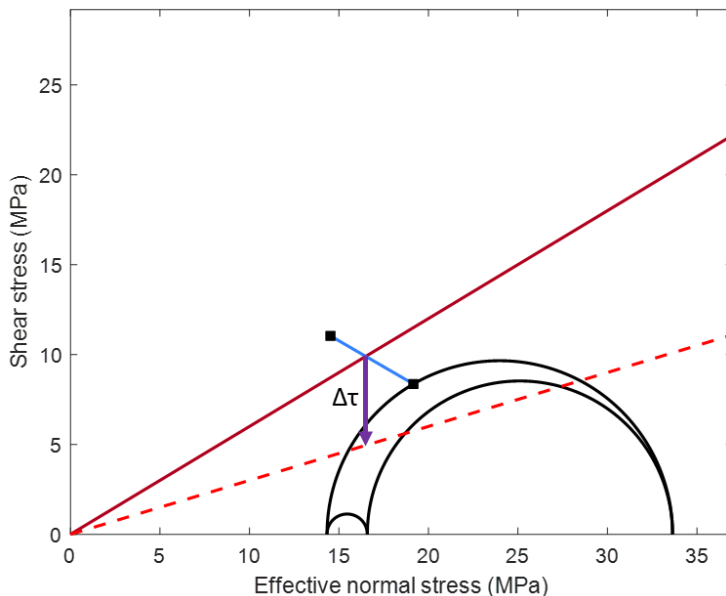


Figure 24 Example of calculation of the stress drop $\Delta\tau$ at a point within the slip zone. Solid red line: Mohr-Coulomb failure criterion, dashed red line: residual shear stress.

For the example in Figure 23b, the width w is ~ 110 m and the length L is ~ 750 m. In this example, where a stress drop of 5 MPa is assumed, the resulting moment magnitude (or M_{LCE}) is 3.1. Various assumptions are (implicitly) made in the approach to compute the largest credible earthquake magnitude:

- (conservative) it is assumed that the entire slip zone will experience seismic slip. For some fault lithologies such as clays, fault slip may be (partly) aseismic. However, not enough data is available to quantify the ratio of seismic and aseismic fault slip in the Dutch geothermal targets. Hence the conservative approach is used where it is assumed that the entire slip zone will take part in a single seismic event.
- (not conservative) fault slip and stress redistribution are not modelled. Computation of (dynamic) fault slip is complex and beyond the first-order approach employed in the standard SHRA methodology. Instead of fault slip, an estimate is made for the stress drop to compute the magnitude. Not taking into account stress redistribution will lead to a (small) underestimate of the slip zone. However, considering the conservative nature of the previous assumption, the assumption of a low-stress environment, and the logarithmic relationship between magnitude and slip zone area, this assumption is not expected to have a major effect on the MLCE.
- (not conservative) it is assumed slip cannot propagate far beyond the stressed fault area. The same assumption is made for the gas field analysis (SodM, 2016). Such an assumption is deemed valid for a low-stress environment, which is typically assumed for the upper kilometers of the Dutch subsurface (Bakx et al., 2022), and so far, there has been no or little evidence for triggering seismicity far away from a project.
- (conservative) another assumption is that the stress build-up on the fault is released in a single event. This is regarded conservative; given the gradual buildup of stress on the fault, progressive fault reactivation through multiple smaller events is more likely. Modeling of fault slip and separate events is beyond the scope of the SRIMA tool.
- furthermore, it is assumed that the slip zone can be confined to a finite size fault. If a fault terminates within the cooled and stressed rock volume around the injection well, the fault terminus is considered the endpoint for the along-strike slip zone length.

It is recommended to update the procedure for determining the largest credible earthquake magnitude as more data becomes available in the future.

Ground motion (conversion to Peak Ground Velocity)

For each largest credible earthquake magnitude, the distribution of corresponding peak ground velocities (PGV) with epicentral distance is computed. To translate magnitude to ground motion, ground motion prediction equations (GMPEs) are required. Here we use the BMR2 GMPE model which has been developed for regions in the Netherlands beyond the Groningen field (Ruigrok and Dost, 2020). This model has been derived on the basis of recorded PGV values resulting from M 1.5 – 3.5 induced earthquakes in the Netherlands, occurring near gas fields other than the Groningen field. The PGV values are taken from the horizontal recordings of a seismic station. For the three definitions of PGV (see Ruigrok and Dost, 2020, detailed description Fokker et al., 2023) we use the rotated PGV (PGV_{rot}) value as this is the maximum value within the horizontal plane and hence the most conservative value. From now on we refer to PGV_{rot} as PGV.

The BMR2 model is an adaptation of the Bommer GMPE model, which was developed for the Groningen field (Bommer, 2019). The Bommer model yielded the best fit with the recorded PGV values outside

Groningen, compared to three other GMPE models (comparison in Ruigrok and Dost, 2020). Only in the first few km from the epicenter the Bommer model tended to overestimate the ground motions. To reduce this misfit, in the BMR2 model the hypocentral depth was included in the computation of the source-site distance term. The depth was not included in the Bommer model, since this was developed specifically for the Groningen field which has little variation in depth. Inclusion of the depth reduced the misfit with the observed PGV values.

Details of the GMPEs can be found in Ruigrok and Dost (2020), and a summary of the BMR2 model can be found in Fokker et al. (2023). An example of the expected PGV with epicentral distance is shown in Figure 25 for a M_L of 3.1 at a depth of 2.0 km. The highest PGV is expected above the hypocenter (at the epicenter), with an average value P_{mean} (here equal to median value, P50, since the distribution is symmetric) of 25 mm/s. The PGV decreases with epicentral distance. The sharp inflections in the plot are the result of the distance ranges used to define the geometrical spreading.

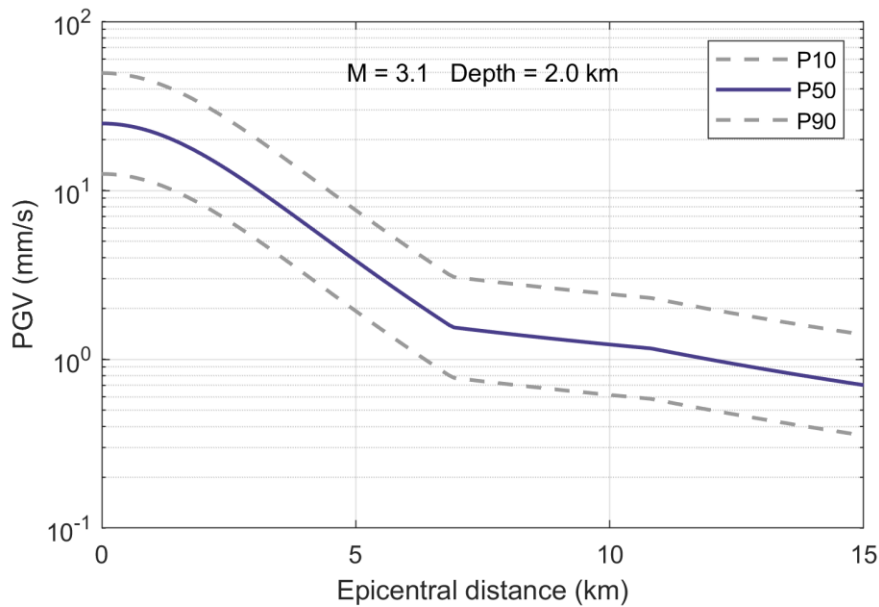


Figure 25 Example of PGV with epicentral distance, for a M 3.1 event at 2.0 km depth.

Seismic hazard

Two measures are used to define the seismic hazard:

- The P_{mean} (average value) of the PGV probability distribution at the epicenter
- The P_{mean} (average value) of contour at which a PGV of 3 mm/s is exceeded

For these metrics the largest credible earthquake magnitude results for all model realizations are taken into account. For each model realization, at each epicentral distance, a probability distribution of PGV values is computed, based on the largest credible earthquake magnitude value, and hypocentral depth of that realization. These probability distributions are added for all realizations to take into account the full distribution (see Fokker et al., 2023). From the final probability density functions, probability of exceedance curves are returned by SRIMA (Figure 26).

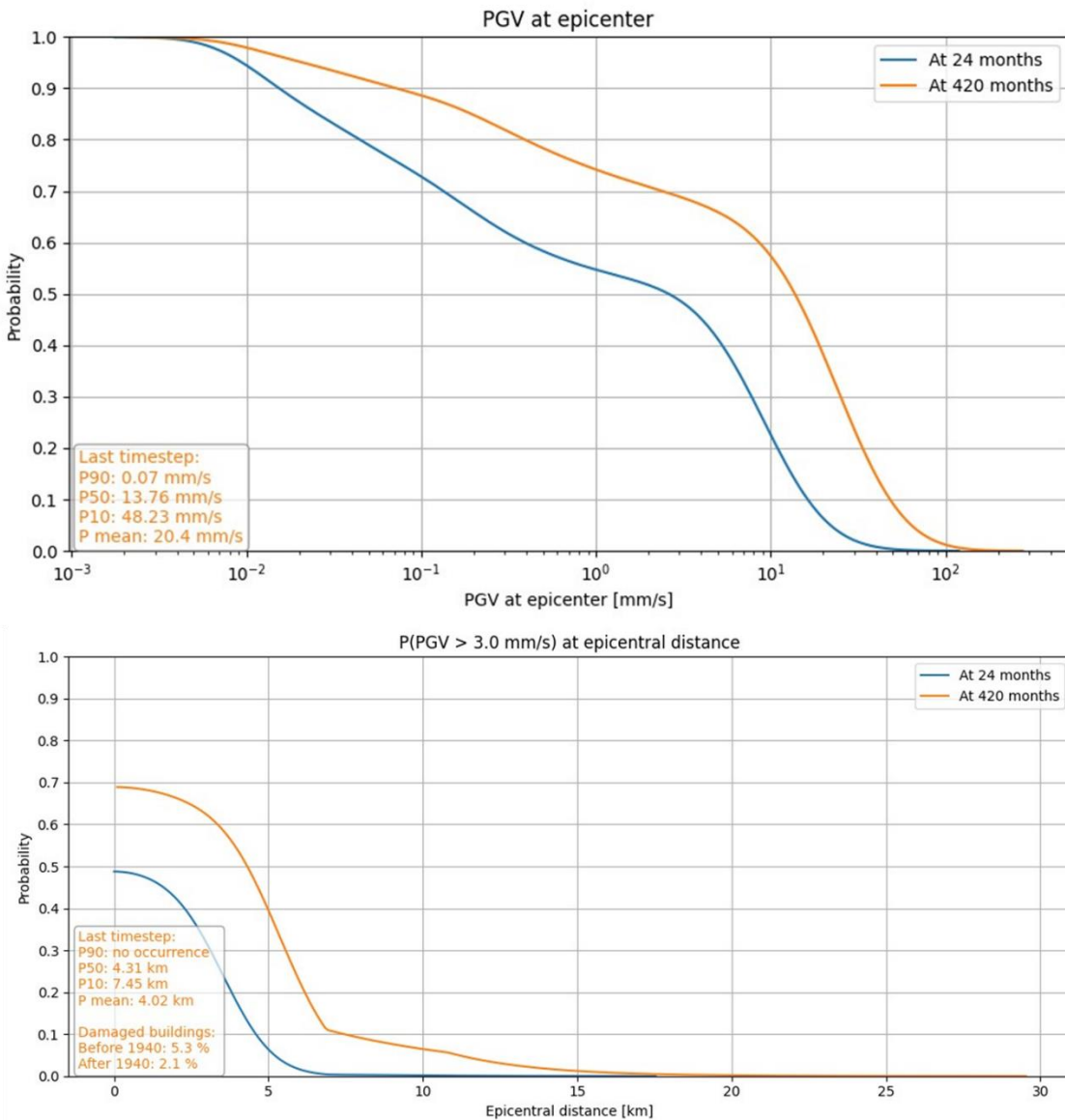


Figure 26 Output PGV measures of stochastic analysis. a) Cumulative density function (cdf) of PGV at the epicenter. b) probability of exceeding 3 mm/s at each epicentral distance.

The resulting PGV curves are used to compute the potential amount of damage claim (see 'Procedure to assess required amount of damage claims')

Custom SHRA

Projects that have to be evaluated with the Custom SHRA are projects that either have an unequivocally elevated seismic hazard level, or a non-negligible hazard level, but which are not suitable (usually: too complex) for evaluation with the standard extensive SHRA-method. The newly developed SHRA does not

give a standard solution for the analysis of such projects. Depending on the reason why the project was referred to the Custom SHRA, a specific workflow should be designed and justified to address the specific project situation.

The Custom SDRA procedure is shown schematically in Figuur 11 (*DEEL I*). It is considered likely that for all projects following this route 3D seismic data (or possibly very dense 2D seismic data) is required to perform an adequate SDRA. In most cases, the tailor-made analysis will also require a detailed subsurface model based on an extensive dataset, to properly visualize the local threat level. Furthermore, a tailor-made analysis will have to be chosen based on the specific characteristics of the project.

Based on the results of the Custom SHRA, a project is classified into one of the following classes:

- Acceptable risk: for these projects, a potential amount of damage must be determined
- Unacceptable risk: these projects (in the proposed form) cannot go ahead at the moment
- Threat and/or risk determination uncertain: The project cannot proceed at the moment; a pilot project could possibly be possible under specific conditions to be determined later.

Procedure to assess required amount of damage claim provision (‘schadevoorziening’)

To fulfil the legal requirements upon the application for a starting permit (*startvergunning*) or follow-up permit (*vervolgvergunning*) for a geothermal project, an assessment is to be made of the potential extent of the damage for the ‘largest credible earthquake’ scenario (see section ‘Inschatten seismiteit bij aardwarmtewinning’), based on which an estimate can be made of the required amount of damage claim provision. To assess the potential extent of damage in case an earthquake the following parameters have to be taken into account: (1) ground motion; (2) number of buildings exposed to the ground motion and (3) vulnerability to damage (fragility) of the buildings exposed to the ground motion. The procedure for the assessment of these parameters is described in the sections below, followed by a section on the estimation of the potential amount of damage claim provision.

Ground motion and potential damage area

The potential damage area is the area within which the ground motion, more specific the vibration, is such that damage may occur. Peak Ground Velocity (PGV) is considered a suitable and widely used measure to assess damage (e.g. Bommer and Alarcón, 2006; SBRCUnet, 2017). To establish the potential damage area as a result of the largest credible earthquake scenario, one has to determine the distance from the epicentre of this earthquake to where the resulting PGV-values are reduced to negligible damage probabilities.

From the coupling between the EMS damage scale (Grünthal et al., 1998) and the PGV-values (Zang et al., 2014), it is expected that damage of the first grade (DS1) may occur from a PGV value of c. 5 mm/s onwards. DS1 damage is thereby characterized as no structural damage, or slight non-structural damage which is manifested through hairline cracks in walls and damage to plaster (Grünthal et al., 1998). In line with that, the Dutch SBR-guidelines (SBRCUnet, 2017) state that masonry structures (their ‘Category 2’) have a characteristic threshold velocity of damage of 5 mm/s. According to these guidelines, the probability of damage is sufficiently small if the characteristic threshold velocity is not exceeded. This is often interpreted as 1% damage probability. Applying a safety factor for ‘vibration sensitive’ buildings (see section ‘Fragility of the exposed buildings’ for further details) results in a characteristic threshold velocity of damage of 3 mm/s. This last value is taken in this SHRA as the lower PGV-threshold of the potential damage area.

In other words, the potential damage area of the largest credible earthquake scenario shall be taken as the area within which the PGV_{mean} -values may reach 3 mm/s or more. This area can be approximated by a radius (of ‘x’ km) around the hypothetical earthquake epicenter (with the hypocenter assumed to occur at the point where the cold front first touches the fault), matching with the area within the 3 mm/s contour from the PGV_{mean} of the largest credible earthquake scenario. The calculation of radius is built into the SRIMA tool.

Number of buildings within the potential damage area

In order to assess how many buildings could be exposed to a PGV of 3 mm/s or more, the number of buildings within the 3 mm/s contour (as described in the previous section) shall be derived based on data from the Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG; www.kadaster.nl). The number of buildings

shall be derived in two separate categories: masonry before 1940 and masonry built from 1940 onwards (see next section for explanation of these categories).

Fragility of the exposed buildings

The probability that a building is damaged at a certain PGV-value is dependent on the type and state of the building. High-rise buildings (*'flatgebouwen'*) and/or buildings made for example of reinforced concrete, steel or wood are non-vibration sensitive buildings and are therefore excluded from this assessment. In The Netherlands a substantial part of the building stock consists of non-reinforced masonry buildings (brick houses). These structures are considered more sensitive to vibrations (more fragile). How sensitive masonry buildings are to vibrations is also dependent on the state of these buildings. The year of construction is considered to be an appropriate proxy for building state. All houses built before 1940 are considered 'vibration sensitive'. For unreinforced masonry buildings before and after 1940 different fragility curves are available (Crowley et al., 2019) that can be used to determine the exceedance probability of DS1 (i.e., the probability of suffering damage due to vibration) at a certain PGV value (see Figure 27). The calculation of the average expected percentage of damaged buildings within the 3 mm/s contour of the $PGV_{\text{mean LCE}}$ scenario, for each of the two building categories (before 1940 and 1940 onwards), is built into SRIMA. An example of this is shown in Table 4.

Number of potentially damaged buildings

These percentages can be multiplied with the number of buildings in the relevant category, within the 3 mm/s contour, as derived from the BAG, to obtain the number of buildings in each category that may incur DS1 damage (example in third and fourth columns of Table 4). Adding the two outcomes will give the total number of buildings that may incur DS1 damage.

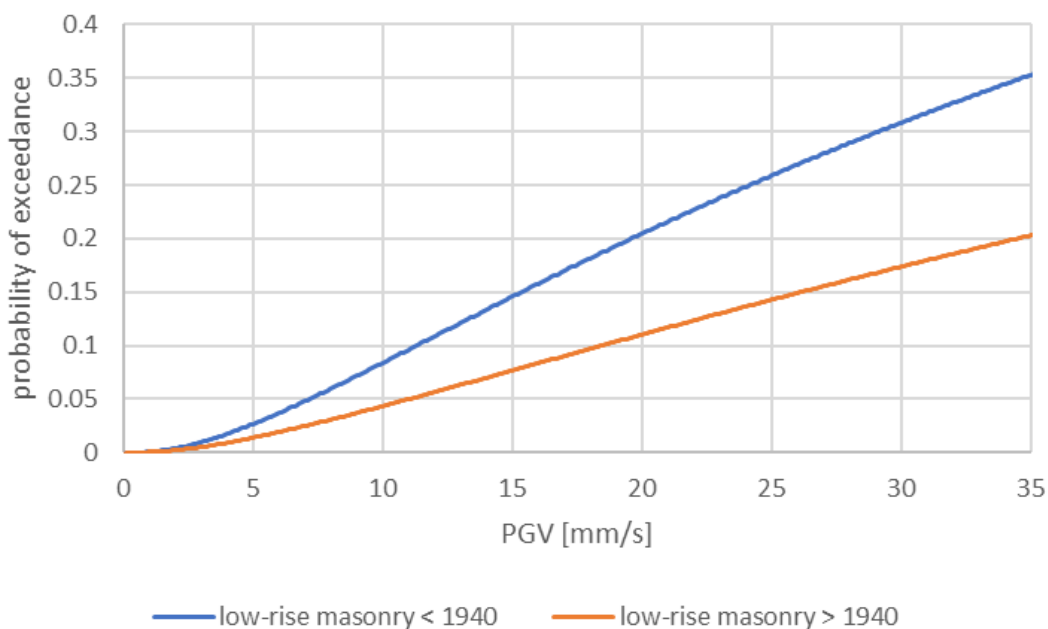


Figure 27 Fragility curves for (non-high-rise) unreinforced masonry buildings built before and after 1940, showing the probability that such a building will be damaged at a certain PGV-value (after Crowley et al., 2019).

Potential amount of damage claim provision required

With the obtained number of potentially damaged buildings, the amount damage claim provision required for the geothermal project can be calculated by multiplying this number with a 'damage amount' per building. A representative damage compensation to repair slight, non-structural damage could, for instance, be taken as 4000 Euros per building (derived from experience in the Groningen earthquake area; IMG, 2022).

An example of this is shown in the last row of Table 4. It could be considered to adopt high-level categories of damage claim provision required for certain ranges of amounts of buildings potentially affected. A system with such high-level categories may be preferred over calculating and reporting a project-specific damage claim provision number, as such a single, very specific amount suggests an unrealistic amount of precision in the potential damage amount.

| Year of construction | Mean radius of the 3 mm/s PGV-contour (km) | Total amount of buildings within that contour | Damage percent | Number of buildings for damage claim provision | Average damage compensation per building (€) | Damage claim provision (€) |
|----------------------|--|---|----------------|--|--|----------------------------|
| <1940 | | 1800 | 5,3% | 95 | | € 381.600 |
| ≥1940 | | 8200 | 2,1% | 172 | | € 688.800 |
| Total | 4.02 | 10000 | | 267 | 4.000 | € 1.070.400 |

Table 4 Example calculation for the required amount of damage claim provision (in Euros) for a hypothetical project with the damage percents from Figure 26. Approximately 18% of the building stock in the Netherlands is built before 1940, hence 1800 out of 10000 is used for the number of buildings within the 4 km contour.

References

- Aki, K., 1966. Generation and Propagation of G Waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964.: Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 44(1), 73-88.
- Ameri, G., Martin, C. and Oth, A., 2020. Ground-Motion Attenuation, Stress Drop, and Directivity of Induced Events in the Groningen Gas Field by Spectral Inversion of Borehole Records. *Bulletin of the Seismological Society of America* 110 (5), 2077-2094.
- Baisch, S., Koch, C., Stang, H., Pittens, B., Drijver, B. and Buik, N., 2016. Defining the framework for seismic hazard assessment in geothermal projects V0.1. Technical Report. Report No. 161005. KennisAgenda Aardwarmte.
- Bakx, E., Buijze, L. and Wassing, B., 2022. Formation, lithology and region-specific stress field in the Netherlands. WarmingUP, 060.43160.
- Bommer, J.J. and Alarcón, J.E., 2006. The prediction and use of peak ground velocity. *Journal of Earthquake Engineering* 10(1), 1–31
- Bommer, J.J., Dost, B., Edwards, B., Stafford, P.J., Van Elk, J., Doornhof, D. and Ntinalexis, M., 2016. Developing an application-specific ground-motion model for induced seismicity, *Bulletin of the Seismological Society of America* 106, 158–173.
- Bommer, J. J., Stafford, P. J. and Ntinalexis, M., 2019. Updated Empirical GMPEs for PGV from Groningen earthquakes—March 2019. NAM Study Report, 13 p.
- Bonté, D., Van Wees, J.-D. and Verweij, J.M., 2012. Subsurface temperature of the onshore Netherlands: new temperature dataset and modelling. *Netherlands Journal of Geosciences* 91-4, 491-515.
- Buijze, L., van Bijsterveldt, L., Cremer, H., Paap, B., Veldkamp, H., Wassing, B. B., van Wees, J., van Yperen, G.C.N., ter Heege, J.H. and Jaarsma, B., 2019. Review of induced seismicity in geothermal systems worldwide and implications for geothermal systems in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 98, e13.
- Buijze, L., Fokker, P.A., Wassing, B., 2021. Quantification of induced seismicity potential of geothermal operations. WarmingUP, 060.43190.
- Buijze, L., Veldkamp, H. and Wassing, B., 2023. Comparison of hydrocarbon and geothermal energy production in the Netherlands: reservoir characteristics, pressure and temperature changes, and implications for fault reactivation. *Netherlands Journal of Geosciences*, 102 e7, 22p.
- Carpenter, B., Ikari, M. and Marone, C., 2016. Laboratory observations of time dependent frictional strengthening and stress relaxation in natural and synthetic fault gouges. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* 121(2), 1183–1201.
- Coulomb, C.A., 1776. Sur une application des règles maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. *Acad Sci Paris Mem Math Phys* 7, 343-382.
- Crowley, H., Pinto, R, Van Elk, J. and Uilenreef, J., 2019. Probabilistic damage assessment of buildings due to induced seismicity. *Bulletin of Earthquake Engineering* 17, 4495–4516.

- De Santis, F., Klein, E., Thoraval, A., Contrucci, I., and Kinscher, J. L., 2022. Case analysis of seismicity related to the exploitation of deep geothermal energy. In European Geothermal Congress (EGC 2022)
- De Vos, D. D., 2010. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for the Southern part of the Netherlands. MSc Thesis.
- EZK, 2022. Beleid voor verantwoord omgaan met fysieke risico's en onzekerheden bij geothermie. Kamerbrief, DGKE-WO / 22194678.
- Fokker, P.A. Buijze, L. and Pluymaekers, M.P.D., 2023. SRIMA: Background information of the Python tool, TNO 2023_R11303, 22 september 2023.
- Grünthal, G., Musson, R.M.W., Schwarz J. and Stucchi, M., 1998. European Macroseismic Scale EMS-98, European Seismological Commission. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, 100 p.
- Gutenberg, B., and Richter, C. 1941. Seismicity of the Earth. Geological Society of America. Special papers (34), 1-130
- Hanks, T. C., and Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 84(B5), 2348-2350.
- Hooglerarenpanel Risicobeleid seismiciteit overige mijnbouw, 2020. Advies geothermie, bijlage bij DGKE-WO/22194678.
- Houtgast, G., 1991. Catalogus aardbevingen in Nederland. Royal Netherlands Meteorological Institute (De Bilt). ISBN: 90-369-2002-7, 166 p.
- Hunfeld, L. B., Niemeijer, A. R., and Spiers, C. J., 2017. Frictional properties of simulated fault gouges from the seismogenic Groningen gas field under in situ P–T–chemical conditions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(11), 8969-8989.
- Hunfeld, L. B., Chen, J., Hol, S., Niemeijer, A. R., and Spiers, C. J., 2020. Healing behavior of simulated fault gouges from the Groningen gas field and implications for induced fault reactivation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(7), e2019JB018790.
- Instituut Mijnbouwschade Groningen (IMG), 2022. Schadevergoeding voor Groningers van 2012 tot nu. www.schadedoormijnbouw.nl/nieuws/schadevergoeding-voor-groningers-van-2012-tot-nu
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W., 1979. Fundamentals of Rock Mechanics, 3rd edn. Chapman & Hall, London.
- Kadaster, Basisregistratie Adressen en Gebouwen. <https://www.kadaster.nl/zakelijk/registraties/basisregistraties/bag/bag-producten>
- Kanamori, H., and Anderson, D. L., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bulletin of the seismological society of America, 65(5), 1073-1095. Kanamori, H., and Anderson, D. L. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bulletin of the seismological society of America, 65(5), 1073-1095.

- KNMI, 2021a. First-order assessment of location uncertainty of events in the Roer Valley Graben. KNMI R&D Seismology and Acoustics, prepared for EBN & TNO-AGE for the Seismic Hazard Screening workflow, 9 p.
- KNMI, 2021b. Screened list of Houtgast (1991) earthquake database. Prepared by KNMI for EBN & TNO-AGE for the Seismic Hazard Screening workflow.
- Kombrink, H., Doornenbal, J. C., Duin, E. J. T., Den Dulk, M., Ten Veen, J. H., and Witmans, N., 2012. New insights into the geological structure of the Netherlands; results of a detailed mapping project. *Netherlands Journal of Geosciences*, 91(4), 419-446.
- Kraaijpoel, D. and Dost, B., 2013. Implications of salt-related propagation and mode conversion effects on the analysis of induced seismicity, *J. Seismol.* 17, no. 1, 95–107.
- Labuz, J.F. and Zang, A., 2012. Mohr-Coulomb Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45, 975-979.
- Marone, C., Raleigh, C.B. and Scholz, C.H., 1990. Frictional behavior and constitutive modeling of simulated fault gouge. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* 95(B5), 7007-7025.
- Mijnlieff, H. and Maaijwee, C., 2023. Integriteit afdichtende gesteentepakketten. Evaluatiemethodiek voor geothermie projecten. TNO 2023 R00000, september 2023.
- Mohr, O., 1900. Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? *Zeit des Ver Deut Ing* 44, 1524-1530.
- Mossop, A. P., 2001. Seismicity, subsidence and strain at The Geysers geothermal field. PhD Thesis, Stanford University.
- Muntendam-Bos, A. G., Hoedeman, G., Polychronopoulou, K., Draganov, D., Weemstra, C., van der Zee, W., Bakker, R.R. and Roest, H., 2022. An overview of induced seismicity in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 101, e1.
- Myklestad, N. O., 1942. Two problems of thermal stress in the infinite solid. *Journal of Applied Mechanics*, 9(3), A136-A143.
- NAM, 2021. Appendix A - Reservoir Pressure and Subsidence Groningen Field - update for Production Profile. GTS - raming 2021. Seismic Hazard and Risk Assessment of Production Profile “GTS raming 2021” for the Groningen field - March 2021, 46 p.
- NEN, 2020. NPR 9998:2020 – Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en afkeuren – Geïnduceerde aardbevingen – Grondslagen, belastingen en weerstanden. Nederlandse praktijkrichtlijn, Delft: Nederlands Normalisatie Instituut.
- PanTerra Geoconsultants B.V./IF Technology B.V. (Borst, L., Poessé, J. and Van den Bogert, P.), 2021A. Seismic Hazard Screening (SHS): Area of Influence, V2.1.
- PanTerra Geoconsultants B.V./IF Technology B.V. (Böker, U.), 2021B. Seismic Hazard Screening (SHS): Larger Roer Valley Graben Area definition, V2.1, 21 p.
- PanTerra Geoconsultants B.V./IF Technology B.V. (Boersma, Q.), 2021C. Seismic Hazard Screening (SHS): Relevant major fault zones, V1.4, 31 p.

PanTerra Geoconsultants B.V./IF Technology B.V. (Boersma, Q.), 2021D. Seismic Hazard Screening (SHS): Fault and data density, V3.1, 30p.

PanTerra Geoconsultants B.V./IF Technology B.V. (Van den Hoek, P., Poessé, J. and Van den Bogert, P.), 2021E. Seismic Hazard Screening (SHS): Fault Reactivation, V1.1, 41 p.

Perkins, T. K., and Gonzalez, J. A., 1985. The effect of thermoelastic stresses on injection well fracturing. Society of Petroleum Engineers Journal, 25(01), 78-88.

Q-Con (Baisch, S. and Koch, C.), 2021. Area of Influence of mining activities in aquifers, salt caverns and cavern storage facilities. Q-Con report EBN001_210722, 23 p.

Ruigrok, E., and Dost, B., 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, TR-386, 60 p.

SBRCURnet, 2017. SBR Trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken: 2017, 91 p.

Schultz, R., Muntendam-Bos, A., Zhou, W., Beroza, G. C., and Ellsworth, W. L., 2022. Induced seismicity red-light thresholds for enhanced geothermal prospects in the Netherlands. Geothermics, 106, 102580

SodM en TNO-AGE, 2013. Protocol bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning – versie 2, 2 p.

SodM, 2016. Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning. Tijdelijke leidraad voor adressering MBB. 24.1.P, Versie 1.2 (https://www.nlog.nl/sites/default/files/fdb3cd42-ecba-49ce-969f-44318e9d1272_tijdelijke%20leidraad%20sra%20v1-2.pdf)

SodM, 2019. Protocol ter bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning – versie 3, 3 p.

Starr, A. T., 1928. Slip in a crystal and rupture in a solid due to shear. In Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society (Vol. 24, No. 4, pp. 489-500). Cambridge University Press.

Tembe, S., Lockner, D.A. and Wong, T.-F., 2010. Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges: Binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite. Journal of Geophysical Research, Solid Earth 115(B03416), 22 p.

TNO, 2020. Probabilistic Seismic Hazard and Risk Analysis in the TNO Model Chain Groningen. TNO2020 R11052|3.

USGS, 2023. [Magnitude Types | U.S. Geological Survey \(usgs.gov\)](https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/magnitude-types).
<https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/magnitude-types> (geconsulteerd juni 2023)

Van Gessel, S., Hintersberger, E., van Ede, R., ten Veen, J., Doornenbal, H., Diepolder, G.W., den Dulk, M., Hamiti, S., Vukzaj, N., Çako, R., Prendi, E., Ceroni, M., Mara, A., Barros, R., Tovar, A., Britze, P., Baudin, T., Stück, H., Jähne-Klingberg, F., Jahnke, C., Höding, T., Malz, A., Kristjánsson, S., Porbergsson, A., Di Manna, P., D'Ambrogio, C., Congi, M., Lazauskienė, J., Andriuškevičienė, G., Baliukevičius, A., Jarosiński, M., Gogołek, T., Stępień, U., Krzemińska, E., Salwa, S., Habryn, R., Aleksandrowski, P., Szykaruk, E., Konieczńska, M., Ressurreição, R., Machado, S., Moniz, C., Sampaio, J., Dias, R., Carvalho, J., Fernandes, J., Ramalho, E., Filipe, A., Celarc, B., Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Shevchenko, A., Melnyk, I., Lapshyna, A., 2021. The HIKE European Fault Database (EFDB) compiled in the framework of

the GeoERA project HIKE (2018-2021). <https://egdi.geology.cz/record/basic/5edf7bd4-9270-4188-b69d-7ddd0a010833>

Van Wees, J., 2023 (concept). Determining the stress perturbation area (Salt mining Area of Influence) around salt caverns. 8 p.

Van Wees, J., Fokker, P.A., van Thienen-Visser, K., Wassing, B.B.T., Osinga, S., Orlic, B., Ghouri, S.A., Buijze, L., and Pluymaekers, M., 2017. Geomechanical Models for induced seismicity in the Netherlands: inferences from simplified analytical, finite element and rupture model approaches. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96(5), s183-202.

Wassing, B.B.T., Candela, T., Osinga, S., Peters, E., Buijze, L., Fokker, P.A. and Van Wees, J.D., 2021. Time-dependent Seismic Footprint of Thermal Loading for Geothermal Activities in Fractured Carbonate Reservoirs. *Frontiers in Earth Science*, 9:685841.

www.knmi.nl/nederland-nu/seismologie/aardbevingen

Yuan, W., Chen, Z., Grasby, S. E., and Little, E., 2021. Closed-loop geothermal energy recovery from deep high enthalpy systems. *Renewable Energy*, 177, 976-991.

Zang, A., Oye, V., Jousset, P., Deichmann, N., Gritto, R., McGarr, A., Majer, E. and Bruhn, D., 2014. Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs—An overview. *Geothermics*, 52, 6-21.

Appendix A – Handleidingen / User manuals

Appendix A1 – Handleiding Seismische Dreiging en Risico Analyse

Appendix A2 – User manual Location Specific SHRA tooling (“SRIMA”)