

TNO PUBLIEK

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

TNO-rapport

www.tno.nl

TNO2018 R10807 | Eindrapport

T +31 88 866 42 56

**Inventarisatie aantoonbare effecten voor mens
en milieu als gevolg van historische
conventionele frackoperaties**

Datum 11 september 2018
Auteur(s) TNO-Adviesgroep Economische Zaken (AGE)

Exemplaarnummer 1
Aantal pagina's 99 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen 5
Opdrachtgever Staatstoezicht op de Mijnen (SodM)
Projectnaam Historische conventionele fracking
Projectnummer 060.32116/01.11

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2018 TNO

TNO PUBLIEK

Samenvatting

TNO-AGE heeft in opdracht van SodM onderzocht of conventionele frackoperaties die in Nederland op het vaste land zijn uitgevoerd mogelijk hebben geleid tot risico voor mens en milieu. Het onderzoek is een verdieping van de inventarisatie die SodM eerder heeft uitgevoerd (SodM, 2016). De doelstelling is om te onderzoeken of de slotsom van SodM door TNO aan de hand van de beschikbare gegevens kan worden gestaafd.

SodM heeft in haar inventarisatie vijf potentiële risico's getoetst die verband houden met frackactiviteiten, te weten:

1. Geïnduceerde seismiciteit
2. Verlies van integriteit van afsluitende lagen
3. Verlies van integriteit van de put
4. Ongewenste geochemische interacties
5. Blootstelling van mens en milieu aan gevaarlijke stoffen

SodM is daarbij tot de slotsom gekomen dat er, voor zover bekend, geen nadelige gevolgen zijn geweest voor mens en milieu en dat de toepassing van fracking ten behoeve van conventionele koolwaterstofwinning op een verantwoorde manier kan plaatsvinden.

Algemene conclusies

TNO onderschrijft, in algemene zin, de bevindingen van SodM zoals gepubliceerd als resultaat van haar inventarisatie (SodM, 2016). Er zijn geen aanwijzingen gevonden dat fracking nadelige effecten voor mens en milieu heeft veroorzaakt binnen de vijf door SodM aangewezen potentiële risico-elementen. Deze conclusie berust op de aan TNO ter beschikking staande gegevens en gegevensbronnen, met elk hun eigen volledigheid en informatiewaarde.

TNO heeft haar onderzoek gebaseerd op relevante gegevens uit documentatie die is verstrekt door de huidige eigenaars van putten waarin frackactiviteiten zijn uitgevoerd en databases/archieven van verschillende instituten (o.a. SodM, EBN, KNMI en TNO). Om de grote hoeveelheid documenten efficiënt en met een minimale kans op menselijke fouten te analyseren is een intelligente zoekmethode ontwikkeld, waarmee met (variaties op) sleutelwoorden kan worden gefilterd op relevante gegevens en statistiek gegenereerd kan worden. Voor elke frackoperatie is per categorie toegewerkt naar een risico-analyse met een acceptabele betrouwbaarheid op basis van de beschikbare gegevens. Daarbij is waar nodig gebruikgemaakt van generieke modellen om evaluatiecriteria te onderbouwen. In geen geval zijn nadelige effecten voor mens en milieu vastgesteld, waarbij moet worden opgemerkt dat de beschikbare gegevens en gegevensbronnen niet in alle gevallen uitsluitend geven.

Geïnduceerde seismiciteit

Geïnduceerde seismiciteit wordt door het KNMI pas geregistreerd vanaf 1986. Dat betekent dat ongeveer de helft van de frackoperaties vóór die tijd heeft plaatsgevonden. De gevoeligheid van het meetnet is in de loop der tijd vergroot; momenteel kunnen in heel Nederland bevingen worden geregistreerd vanaf 1,5 op de Schaal van Richter (in specifieke gebieden zoals Groningen is de detectiegrens

lager dan 1,5). Het optreden van geïnduceerde seismiciteit is onderzocht aan de hand van een correlatie in locatie (binnen een straal van 10 km) en tijd (binnen korte tijd) tussen een beving en daaraan voorafgaande frackactiviteiten. Hierbij is vastgesteld dat bij vijf putten zich binnen 100 dagen na een frackoperatie een geïnduceerde beving is opgetreden, waarvan drie binnen een maand. Het lijkt gezien de geologische situatie ter plaatse aannemelijk dat depletie als gevolg van gaswinning in naburige gasvelden hier de oorzaak van de bevingen is geweest.

Verlies van integriteit van afsluitende lagen of de put

Van verlies van integriteit van afsluitende lagen is geen aanwijzing gevonden in de beschikbare documentatie. Op basis van gesteentemechanische modellen is het aannemelijk gemaakt dat de kans klein is dat de integriteit van een afsluitende laag door een frack wordt aangetast. Met name de gesteentemechanische eigenschappen van steenzout in het afsluitende pakket zijn hier debet aan. Voor ongeveer de helft van de frackoperaties geldt dat steenzout een (hoofd)component van de afsluitende laag vormt.

In geen geval is vastgesteld dat als gevolg van frackactiviteiten verlies van integriteit van de put is opgetreden. Wel zijn in enkele gevallen deelproblemen gerapporteerd binnen putten die in het verleden één of meerdere frackoperaties ondergaan hebben. Daarbij is het niet mogelijk een eenduidige oorzaak aan te wijzen en kan een frackoperatie als aanleiding niet worden uitgesloten.

Indien daadwerkelijk sprake is geweest van verlies van integriteit van afsluitende lagen of van de put wil dat nog niet zeggen dat er een lekpad naar de ondiepe ondergrond (aquifers) of de oppervlakte is ontstaan, aangezien zich in het bovenliggende gesteentepakket meerdere (secundaire) afsluitende lagen bevinden. Migratie treedt bovendien alleen op als er een drijvende kracht is die het transport van stoffen mogelijk maakt. Voor gassen is dat het verschil in dichtheid met het formatiewater en eventuele reservoirdruk, maar voor frackvloeistof is die drijvende kracht na het wegvallen van de druk die bij het fracken wordt aangewend niet meer aanwezig. De kans dat frackvloeistof langs een migratiepad zal lekken is derhalve verwaarloosbaar. Bovendien zou de concentratie (schadelijke stoffen) door de migratieafstand en diffusie sterk afnemen.

Ongewenste geochemische interacties

Ongewenste geochemische interacties kunnen optreden bij fracken, veroorzaakt door het gebruik van de diverse chemicaliën. Er wordt onderscheid gemaakt in frackoperaties met proppants (proppant fracks) en met zuren (acid fracks). Daarnaast zijn er putten die met behulp van zuurspoeling verstoppingen in het reservoirgesteente verwijderen direct rondom het boorgat. Deze matrix acidizing veroorzaakt geen fracks. Het onderzoek richt zich op de aantasting van de put (casing en cement), de chemische monitoring, het oplossen van steenzout door de frack vloeistof, de mobilisatie van zware mineralen en natuurlijk aanwezig radioactief materiaal (NORM) en het vrijkomen van H₂S.

De informatie die beschikbaar is om opgetreden, ongewenste geochemische gebeurtenissen te kunnen herleiden is beperkt. De enige vorm van ongewenste geochemische gebeurtenissen waarvan melding wordt gemaakt in de brondocumenten van de verrichte frackoperaties is het vrijkomen van natuurlijk

voorkomend (laag-)radioactief materiaal (NORM en LSA) hetgeen leidt tot besmetting van instrumenten en materialen, waaronder proppants. Besmetting van deze aard komt ook bij reguliere gasproductie voor en het is niet vast te stellen of frackoperaties hierop enige invloed hebben. De ernst van voorkomende gevallen kon niet nader beschouwd worden op basis van de beschikbare informatie. In algemene zin zijn de geochemische interacties bij acid fracks intenser dan bij proppant fracks, omdat acid fracking een gecombineerde fysisch-chemische methode is om doorlatendheid te verhogen en proppant fracking een louter fysische methode is.

Blootstelling van mens en milieu aan gevaarlijke stoffen

Blootstelling van het milieu aan gevaarlijke stoffen is bestudeerd aan de hand van de beschikbare documenten, alsmede de meetreeksen van grondwaterkwaliteitsmeetnetten. Meetpunten binnen een straal van 500 meter van een gefracte put zijn nader bekeken. Geen van deze meetreeksen vertoont verschijnselen die wijzen op (nadelige) invloed door een frackoperatie, maar hierbij wordt aangetekend dat de hydrologische relatie met de putten niet verder is onderzocht. 53 gefracte putten liggen binnen twee kilometer van Natura 2000- en grondwaterbeschermingsgebieden. Er is geen informatie beschikbaar over welke gevolgen dat heeft indien er daadwerkelijk gevaarlijke stoffen vrijkomen. Over het algemeen is de beschikbare hoeveelheid informatie gering; de al beperkte monitoring van het grondwater is niet ingericht op de onderhavige problematiek (qua meetnetopzet noch qua analyse van de meetreeksen).

TNO heeft een beperkt onderzoek uitgevoerd naar de blootstelling van de mens aan gevaarlijke stoffen. De focus ligt daarbij op het screenen van de gerapporteerde incidenten op de mijnbouwlocatie, de bedrijfsrapportages zoals beschikbaar gesteld door de puteigenaren en resultaten van het huidige onderzoek zoals gepresenteerd in de voorgaande paragrafen. Het blijkt niet mogelijk om te bepalen in hoeverre de registratie van deze gegevens compleet en goed is gearchiveerd. Er is geen aanwijzing dat er specifieke monitoringsactiviteiten zijn uitgevoerd om dit onderwerp te volgen. Daarnaast maken eventuele lange termijneffecten van blootstelling geen deel uit van deze rapportages. In geen geval zijn nadelige effecten voor mens en milieu vastgesteld, waarbij moet worden opgemerkt dat de beschikbare gegevens en gegevensbronnen het niet toestaan een sluitende conclusie te trekken. In overleg met SodM is besloten dit onderwerp binnen dit onderzoek niet verder uit te werken.

Limitaties en aanbevelingen

Het blijkt dat niet alle in dit onderzoek behandelde potentiële risico's systematisch worden gemonitord. Zo zijn de beschikbare brongegevens voor met name de geochemische- en risico-aspecten voor mens en milieu summier te noemen. Dit geldt in mindere mate voor gegevens omtrent geïnduceerde seismiek, integriteit van afsluitende lagen en putintegriteit. De rapportage richt zich met name op de technische voorbereiding en het verloop van frackactiviteiten; er is weinig of geen specifieke monitoring van de gevolgen van frackoperaties op de langere termijn. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van bestaande meetnetten die niet specifiek zijn ingericht voor dit onderwerp (landelijk seismometernetwerk KNMI, grondwaterkwaliteitsmeetnetten (LGM/DGM) en enkele lokale meetnetten). Voor een specifieke inzet van meetgegevens om de mogelijke risico's van frackoperaties goed in beeld te brengen zouden aanpassingen nodig zijn in de locatie en dichtheid van monitoringspunten, meetfrequenties, gemeten parameters/monstername en analyse daarvan. In 2016 is de mijnbouwwet aangepast om de potentiële risico's bij het fracken expliciet te behandelen in de plannen van de frackoperaties zoals voorkomen bij vergunningaanvragen (art 9 Mijnbouwwet) en winningsplannen (art 35

Mijnbouwwet). Evaluaties daarvan, na afloop van de frackoperaties, komen niet voor in de beschikbare documenten.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	8
2	Projectbeschrijving	9
2.1	Vraagstelling, achtergrond en aanleiding	9
2.2	Doelstelling	9
2.3	Afbakening	9
2.4	Algemene beschrijving van frackactiviteiten	11
3	Data en methoden.....	14
3.1	Data en databronnen	14
3.2	Documentanalyse	15
3.3	Inventarisatiemethodiek.....	16
3.4	Generieke benadering mogelijke risico's.....	17
4	Overzicht van conventionele frackoperaties	18
5	Geïnduceerde seismiciteit	21
5.1	Screeningsmethodiek	21
5.2	Bevindingen	23
5.3	Conclusies	25
6	Verlies van integriteit van afsluitende lagen	27
6.1	Screeningsmethodiek	29
6.2	Bevindingen	31
6.4	Conclusies	35
7	Verlies van integriteit van de put	37
7.1	Screeningsmethodiek	37
7.2	Bevindingen	39
7.3	Conclusies	41
8	Ongewenste geochemische interacties	42
8.1	Screeningmethodiek	42
8.2	Bevindingen	42
8.3	Conclusies	49
9	Incidenten met blootstelling van het milieu aan gevaarlijke stoffen.....	51
9.1	Screeningsmethodiek	51
9.2	Bevindingen	54
9.4	Conclusies	63
10	Blootstelling van de mens aan gevaarlijke stoffen	64
10.1	Screeningsmethodiek	64
10.2	Bevindingen	64
10.3	Conclusies	65

11	Conclusies	66
12	Literatuurlijst	68
13	Bijlagen	70
A.	Overzicht en risico-indicatiematrix van frackoperaties	70
B.	Verzoek om data over uitgevoerde fracks in putten	76
C.	Zoektermen gebruikt in documentanalyse	78
D.	Verlies van integriteit van afsluitende lagen	80
E.	Chemische additieven bij frackoperaties	98
14	Ondertekening	99

1 Inleiding

De Inspecteur Generaal der Mijnen (IGM) van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft TNO-AGE verzocht om een onderzoek om de mogelijke effecten van conventionele frackoperaties voor mens en milieu uit te diepen.

SodM heeft in 2016 op verzoek van de Minister van Economische Zaken de toepassing van conventionele frackoperaties, de mogelijke consequenties en de beoordeling daarvan inzichtelijk gemaakt in haar rapport 'Resultaten Inventarisatie fracking, de toepassing van fracking, de mogelijke consequenties en de beoordeling daarvan (SodM, 2016). De minister heeft deze inventarisatie op 1 maart 2016 met de Tweede Kamer gedeeld (DGETM-EO / 16031333). SodM heeft in de slotsom van dit inventarisatierapport betoogd:

“SodM is tot de slotsom gekomen dat er bij al deze frackoperaties zich voor zover bekend geen nadelige consequenties voor mens en milieu hebben voorgedaan. SodM is van mening dat de toepassing van fracking ten behoeve van conventionele gaswinning op een verantwoorde manier plaats kan vinden. Het wettelijk regiem, het toezicht daarop en de betrachte beheersmaatregelen door de mijnondernemingen zijn volgens de huidige inzichten solide en afdoende.”

Deze slotsom is opgetekend op basis van een scan van de informatie die bij SodM bekend is over de bedreigingen en effecten van conventioneel fracking voor mens en milieu. Echter, de gevoeligheid van frackoperaties in het parlementaire- en publieke debat zou vraagtekens kunnen oproepen over de mate van diepgang van de inventarisatie door SodM. Immers, de zinsnede 'voor zover bekend' in de bovengenoemde slotsom kan als een voorbehoud over de mate van stelligheid worden opgevat.

Om de mate van stelligheid van de slotsom (al dan niet) kracht bij te zetten en om toekomstige vervolgvragen daarover prompt te kunnen bedienen, verzoekt de IGM van SodM om een onderzoek om de mogelijke effecten van conventionele frackoperaties voor mens en milieu uit te diepen. Deze verdiepingsslag is gebaseerd op alle beschikbare relevante rapporten en gegevens van zowel de operators die de frackoperaties hebben uitgevoerd als van de betrokken (overheids)instanties. Het onderzoek dient zodoende een nog betrouwbaardere basis en referentie te zijn om de slotsom van de inventarisatie te kunnen verheffen naar een sluitende conclusie.

N.B. In dit rapport wordt uitsluitend ingegaan op de frackoperaties (ook wel hydraulische stimulatie genoemd) bij conventionele olie- en gaswinning zoals uitgevoerd in Nederland. In Nederland wordt geen olie of gas op onconventionele wijze gewonnen (zoals schaliegaswinning); onconventionele frackoperaties (groot volume hydro-fracken) hebben daarom in Nederland niet plaatsgevonden. In het volgende hoofdstuk wordt het frackproces nader beschreven.

2 Projectbeschrijving

Het project behelst een nader onderzoek van het mogelijke risico voor mens en milieu van conventionele frackoperaties die in Nederland zijn uitgevoerd (niet te verwarren met fracking bij schaliegaswinning, hetgeen in Nederland nog nooit is toegepast). Het onderzoek is een verdieping van de inventarisatie die SodM heeft uitgevoerd (2016). Hiertoe zijn additionele gegevens betrokken afkomstig uit databases van SodM, TNO (DINO database), EBN en het KNMI. Van de betrokken puteigenaren (NAM en Vermilion) zijn alle beschikbare relevante rapporten onderzocht. In eerste instantie gaat het om het vaststellen van feitelijke gebeurtenissen. In een aantal gevallen zijn meer generieke analyses en/of modelstudies uitgevoerd om inzicht in eventuele risico's te kunnen verkrijgen, omdat informatie uit beschikbare documenten daartoe niet voldoende wordt geacht.

2.1 Vraagstelling, achtergrond en aanleiding

De slotsom van het inventarisatieonderzoek van SodM (2016) is opgetekend op basis van een scan van de informatie die bij SodM bekend is over de bedreigingen en effecten van conventionele frackoperaties voor mens en milieu. Omdat er in de verschillende databases additionele gegevens beschikbaar zijn heeft SodM gemeend dat de slotsom van haar onderzoek nader moest worden getoetst.

Op verzoek van SodM zijn alle conventionele frackoperaties die zijn uitgevoerd op het vaste land in Nederland geëvalueerd en is onderzocht in welke mate potentiële risico's zich hebben voorgedaan, danwel kunnen voordoen als gevolg van reeds uitgevoerde frackactiviteiten. De vijf potentiële risico's die door SodM zijn gedefinieerd zijn:

1. Geïnduceerde seismiciteit
2. Verlies van integriteit van afsluitende lagen
3. Verlies van integriteit van de put
4. Ongewenste geochemische interacties
5. Blootstelling van mens en milieu aan gevaarlijke stoffen

2.2 Doelstelling

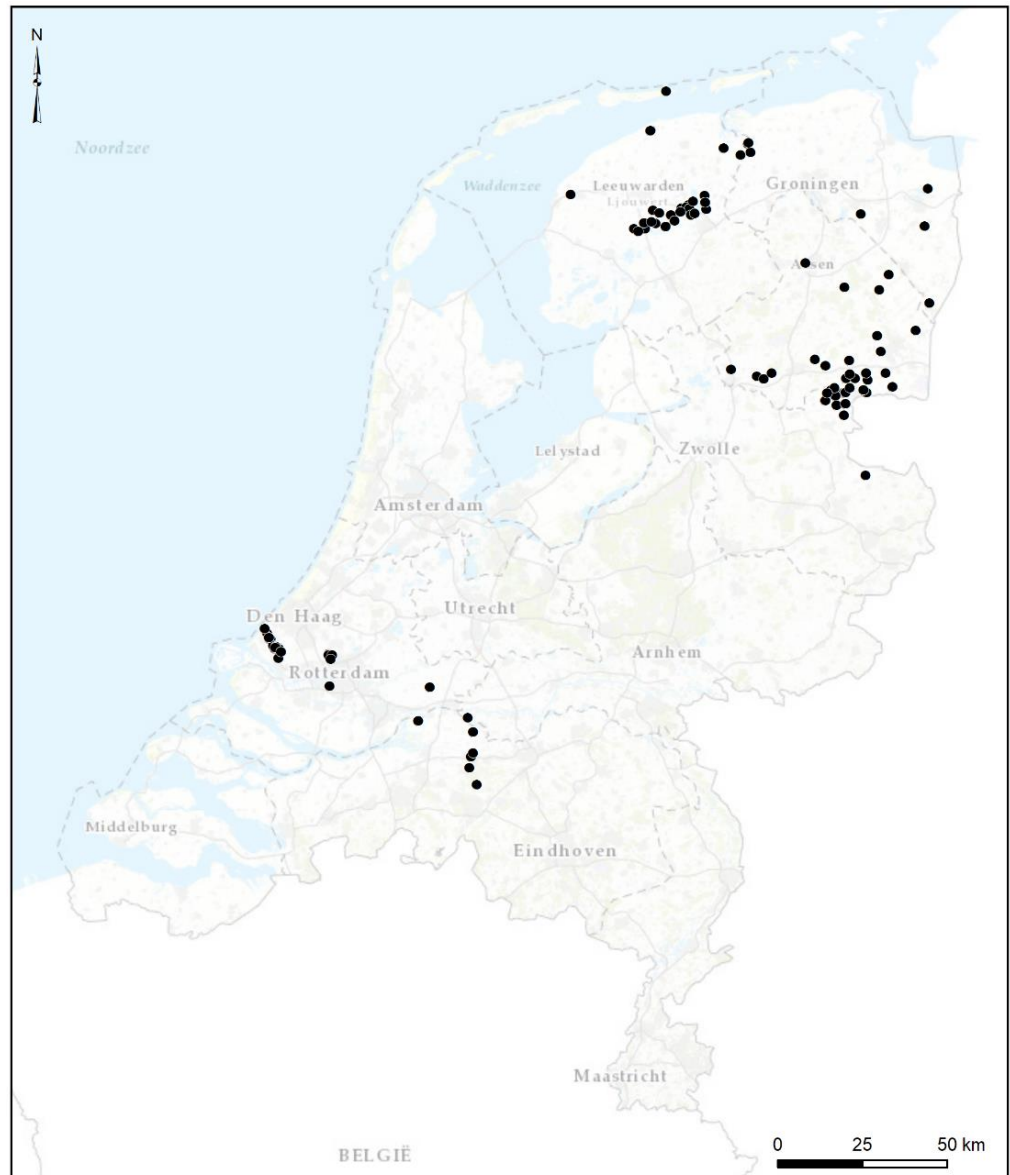
De doelstelling is om te onderzoeken of TNO de slotsom van SodM kan staven, dat zich bij geen van de in Nederland uitgevoerde conventionele frackoperaties nadelige consequenties voor mens en milieu hebben voorgedaan.

2.3 Afbakening

Dit project behandelt en beperkt zich tot:

1. Alle conventionele frackoperaties op het vaste land in Nederland, zoals opgenomen in de inventarisatie lijst van SodM (SodM, 2016), aangevuld met een aantal frackoperaties die destijds niet in de evaluatie waren opgenomen (zie Figuur 2.1 en bijlage A).

2. De vijf bovengenoemde potentiële risico's die in het parlementaire en publieke debat worden aangehaald in relatie met effecten voor mens en milieu.
3. De gegevensset zoals beschreven in Hoofdstuk 3. Deze gegevens zijn verstrekt door de betrokken eigenaars van putten waarin frackoperaties zijn uitgevoerd, of zijn afkomstig uit de relevante databases. Daarnaast wordt een aantal generieke, numerieke, modeluitkomsten in het onderzoek betrokken om bepaalde aannamen te onderbouwen.



● *Gefrachte putten*

Figuur 2.1 Overzicht van de gefrachte putten die onderwerp zijn van dit onderzoek.

2.4 Algemene beschrijving van frackactiviteiten

De onderstaande beschrijving van frackoperaties als stimulatietechniek is grotendeels overgenomen uit het inventarisatierapport van SodM (2016).

Om aardolie en/of aardgas te winnen uit de ondergrond dient een boorgat te worden geboord naar het ondergrondse reservoir. Tijdens de boring worden stalen buizen in het boorgat ingebracht, ook wel 'casing' genoemd, die aan het gesteente rondom het boorgat wordt vastgehecht met cement. Het systeem van verbuizingen, opvoerbuis en cement wordt een put genoemd. De put vormt de verbinding tussen de bovengrond en het ondergrondse reservoir. De stroming door de put verloopt niet door de casing, maar door een opvoerbuis, ook wel 'tubing' genoemd, die in de put is aangebracht en is verankerd aan de casing van de put. De tubing vormt hiermee de eerste barrière (binnenbuis) en de aan het omliggende gesteentepakket gecementeerde casings (buitenhuizen) de tweede barrière. Met deze opbouw van barrières wordt voorkomen dat er vanuit de put stoffen in het omliggende gesteentepakket terecht kunnen komen.

Het reservoir is het gesteente dat koolwaterstoffen (zoals aardolie of aardgas) bevat en geheel omsloten is door ondoorlatende gesteentelagen, dan wel ondoorlatende geologische breuken. De mate van productiviteit uit het reservoir hangt o.a. af van:

- porositeit van het reservoir;
- permeabiliteit ofwel doorlaatbaarheid van het reservoir; en
- viscositeit ofwel stroperigheid van de koolwaterstoffen.

In conventionele reservoirs is de permeabiliteit van het gesteente veelal afdoende om de koolwaterstoffen te kunnen winnen. Daar waar de permeabiliteit in het reservoir laag is, zullen de koolwaterstoffen niet gemakkelijk door het reservoirgesteente naar de put stromen, waardoor de koolwaterstoffen moeilijker te winnen zijn. Dit is helemaal het geval in onconventionele reservoirs zoals schalies (een versteende vorm van klei) waarin schaliegas of schalieolie zit 'opgesloten'. Dit type reservoirgesteente heeft een heel dichte structuur waarin nauwelijks tot geen doorlaatbaarheid is. Ook kan in de loop van de winning de doorstroming van het reservoir rond de put verminderen, waardoor de koolwaterstoffen moeilijker te winnen worden.

Om de permeabiliteit in het reservoirgesteente rond de put te verhogen, kan een frackoperatie als stimulatietechniek worden toegepast. De industrie kent twee soorten frackoperaties die kunnen worden geplaatst, te weten de 'proppant' frack en de 'acid' frack (ook wel hydraulische- en chemische stimulatie genoemd). De keuze voor een van de soorten wordt bepaald door de karakteristieken van het reservoirgesteente.

Voor het maken van een proppant frack wordt vloeistof onder druk vanaf de bovengrond door de put naar het reservoirgesteente gebracht totdat er een scheuring in het reservoirgesteente optreedt. Aangezien de put is voorzien van een beschermende verbuizing is het zwakste punt het gesteente ter hoogte van het reservoir dat wordt blootgesteld aan de verhoogde vloeistofdruk. Op deze positie vindt dan ook de frack (scheur) plaats. Hierdoor ontstaan er nieuwe stromingspaden in het reservoirgesteente naar de boorput en verbetert de permeabiliteit. De vloeistof

die wordt toegepast en in het reservoirgesteente terecht komt bestaat uit water, korrels en chemicaliën (zie Tabel 2.1). De stromingspaden die tijdens de frackoperatie in het reservoir met de vloeistof worden gecreëerd worden opgehouden door korrels (proppants). Deze proppants worden met de frackvloeistof meegevoerd. De chemicaliën die aan de frackvloeistof worden toegevoegd dienen onder andere om de vloeistof te verdikken tot een gel, zodat het zand goed meegevoerd kan worden. Proppant frackoperaties worden met name gebruikt om de productie te verbeteren.

Tabel 2.1 Karakteristieken van een conventionele frackoperatie. Bij onconventionele frackoperaties wordt tot 50 keer zoveel frackvloeistof (met chemicaliën en proppant) geïnjecteerd.

Karakteristieken van een conventionele frackoperatie
Frack 1 - 4 km diepte
300 - 700 bar vloeistofinjectie
100 - 400 m ³ water per frackoperatie
2 - 8 m ³ chemicaliën per frackoperatie
50 -150 ton keramiekkorrels (of zand) per frackoperatie

Bij een acid frackoperatie wordt gewerkt met een vloeistof op zuurbasis. Deze wordt onder hoge druk vanaf de bovengrond door de put naar het reservoirgesteente gebracht totdat er ook hier een scheur ontstaat. Doel van de zuurbasis in de vloeistof is een chemische reactie tussen de zure vloeistof en het gesteente te bewerkstelligen. Hierdoor zullen delen van het slecht permeabele reservoirgesteente worden opgelost waardoor de doorlaatbaarheid verbeterd wordt. Voor carbonaatgesteenten wordt hiervoor zoutzuur gebruikt terwijl zandsteen reservoirs met waterstoffluoride worden behandeld. In bepaalde gevallen kan ook een mengsel van deze twee zuren worden gebruikt. Er wordt geen zand of proppant gebruikt om de scheuren open te houden. Acid frackoperaties worden gebruikt om zowel de productiviteit als de injectiviteit van een put te verbeteren.

Het verschil in aanpak tussen frackoperaties in conventionele (zandsteen of carbonaat) reservoirs en onconventionele schaliegesteenten zit hem in de hoeveelheid, de dichtheid en het volume van de fracks. Zo behoeven conventionele reservoirs veelal slechts één of enkele frackbehandelingen te ondergaan (afhankelijk van de hoeveelheid aan reservoirlagen in de put) om een netwerk van stromingspaden te creëren. Uit schaliegesteentes met nauwelijks of geen permeabiliteit kan alleen worden geproduceerd nadat deze zijn behandeld met meerdere (rond de tien) frackbehandelingen in dezelfde put én in dezelfde reservoirlaag ('massive hydraulic fracturing'). Nadat deze zone is uit geproduceerd dient weer een nieuwe schaliezone te worden aangeboord en te worden behandeld met meerdere frackbehandelingen. Dit maakt de winning uit schalies intensiever. Daarnaast worden bij schaliegas veel grotere volumes (tot ca. 50 keer) aan frackvloeistof gebruikt om zo lang mogelijke fracks te maken en daarmee uit een zo groot mogelijke zone het gas en/of olie te laten toestromen.

Een frackoperatie is een tijdelijke activiteit die, afgezien van de op- en afbouw van het benodigde materieel, veelal minder dan een dag in beslag neemt. Hiertoe staan er op de bovengrondse locatie enkele tanks waar de frackvloeistof in opgeslagen wordt. Daarnaast staat er bij een proppant frackoperatie een soort mixer op de locatie

om de proppants met de frackvloeistof te vermengen en is er een aantal hogedruk pompen aanwezig die de frackvloeistof in de put pompen.

Nadat de pompactiviteiten in de put voltooid zijn wordt de put schoongemaakt. De in de diepe ondergrond toegepaste frackvloeistof wordt daardoor voor een deel teruggewonnen (ongeveer twee derde van wat geïnjecteerd is). De achtergebleven vloeistofresten blijven opgesloten in het reservoir en de chemicaliën breken grotendeels of geheel af tot elementen die ook van nature voorkomen in de diepe ondergrond. De teruggeproduceerde frackvloeistoffen worden van de locaties afgevoerd naar en verwerkt bij erkende externe afvalstoffenverwerkers. Op zee mogen deze vloeistoffen, mits ze voldoen aan strenge normeringen in lijn met de OSPAR conventie, in zee worden geloosd.

Frackoperaties worden in conventionele reservoirs in de VS sinds eind jaren '40 van de vorige eeuw toegepast. In Nederland is dit midden jaren '50 gestart. Vanaf de jaren '70 van de vorige eeuw zijn frackoperaties een standaard stimulatietechniek in de internationale olie- en gasindustrie voor de ontwikkeling van reservoirs met een lage permeabiliteit. In Nederland zijn op het vaste land ca. 245 fracks geplaatst in 161 verschillende putten, allen in conventionele reservoirs.

3 Data en methoden

TNO-AGE voert een gedetailleerde screening uit van alle individuele putstimulaties op het vaste land waarbij fracking van een conventioneel reservoir is toegepast. In dit onderzoek wordt uitgegaan van de bij de puteigenaar opgevraagde documentatie aangevuld met relevante gegevens uit diverse databanken. Per frackoperatie wordt gekeken naar de mate waarin de vijf potentiële risico's (zie Paragraaf 2.1) zich hebben voorgedaan, danwel hebben kunnen voordoen.

De criteria die aan de risico-inschatting ten grondslag liggen zijn waar nodig getoetst en/of geverifieerd door experts. Gedurende de screening is de onderzoeksfocus continu (bij)gestuurd middels een risico-indicatiematrix, waarin ook de betrouwbaarheid is weergegeven (Bijlage A).

3.1 Data en databronnen

De screening van de gebruikte data is gebaseerd op gegevens uit de hieronder genoemde bronnen, waarbij onderlinge discrepanties waar nodig zijn onderzocht en opgelost.

- **SodM** inventarisatie naar het inzichtelijk maken van de toepassing van fracking, de mogelijke consequenties en de beoordeling daarvan uit 2016:
 - omvat 252 gestimuleerde putten (waarvan 155 onshore)
 - per put het aantal en type fracks en de datum van de meest recente frack
- **SodM** archief van gedocumenteerde putproblemen en incidentrapportages:
 - database van putproblemen (vanaf 2005) met een omschrijving van het probleem en de getroffen maatregelen
 - database van incidentrapportages (vanaf 1994) met een omschrijving van het incident en de getroffen maatregelen
 - registraties van natuurlijk voorkomend radioactief materiaal (NORM) en lage radioactiviteit (LSA)
 - alle aanwezige (papieren) documentatie gerelateerd aan de gestimuleerde putten
- **EBN** post-frack performance review uit 2005:
 - omvat 65 fracks in 50 putten (waarvan 37 onshore)
 - per frack het gestimuleerde veld en formatienaam, datum, productiesnelheid en -druk
- **EBN** vertrouwelijke studie naar putstimulaties door fracking uit 2013:
 - omvat 241 gestimuleerde putten (waarvan 153 onshore)
 - per put het aantal en type fracks, formatienaam, putprofiel en -product en in enkele gevallen putafwerking
- **KNMI** database van geïnduceerde seismiteit (vanaf 1986):
 - locatie, tijd, diepte en magnitude van geïnduceerde bevingen
- **TNO** databases (o.a. Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond):
 - putstratigrafie, algemene gegevens over velden/voorkomens
 - GIS database van Natura 2000 gebieden, grondwater-beschermingsgebieden, Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit (LMG) en Provinciale Meetnetten Grondwaterkwaliteit (PMG)

- **TNO-AGE** jaarlijkse rapportages van operators:
 - reservoirdrukken, productiesnelheden en volumes
- **NAM** put-stimulatie gerelateerde documenten:
 - 2285 documenten (1907 *.PDF, 77 *.DOC, 70 *.PPT, 231 overig), wisselend in compleetheid en leesbaarheid
 - variabele inhoud, met name plannen, rapporten van aannemers en/of de (toenmalige) puteigenaar, tests en modellen (zie Bijlage B)
- **Vermilion** put-stimulatie gerelateerde documenten:
 - 251 documenten (215 *.PDF, 10 *.DOC, 26 overig), wisselend in compleetheid en leesbaarheid; deels in de Franse taal
 - variabele inhoud, met name: plannen, rapporten van aannemers en/of de (toenmalige) puteigenaar, tests en modellen (zie Bijlage B)

3.2 Documentanalyse

Teneinde de door de puteigenaars aangeleverde grote hoeveelheid aan documentatie efficiënt en met een minimale kans op menselijke fouten te analyseren is gebruikgemaakt van een geautomatiseerde documentanalyse (zgn. 'text mining'). Daarbij is op basis van (variaties op) sleutelwoorden (Bijlage C) gefilterd op relevante informatie, die vervolgens op basis van de aard van de gegevens statistisch, danwel kwalitatief is geanalyseerd (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Stroomschema voor de geautomatiseerde documentanalyse, waarbij gescande documenten middels optical character recognition (OCR) en een indexering middels *elasticsearch* doorzoekbaar worden gemaakt, met gebruikmaking van scripts in *python*.

De aangeleverde documentatie bestaat uit verschillende typen bestanden, waarvan het grootste deel bestaat uit PDF files van gescande pagina's (Tabel 3.1). Om deze documenten automatisch te analyseren is het nodig om ze eerst te converteren naar digitale tekst middels optical character recognition (OCR). Dit is gebeurd met behulp van *Abbyy Finereader*. De kwaliteit van de OCR is steekproefsgewijs geverifieerd. Het is zeer waarschijnlijk dat er onnauwkeurigheden in de geOCR-de tekst zitten. Deze onnauwkeurigheden kunnen betekenen dat bepaalde letters of woorden niet juist herkend worden, waardoor woorden gekke spelfouten bevatten of zelfs helemaal niet te herkennen zijn. Ondanks het gebruik van de best beschikbare OCR software is het mogelijk dat de nauwkeurigheid van de statistieken niet perfect is. Echter, over het algemeen is het resultaat voldoende bevonden.

Tabel 3.1 Overzicht van de aantallen van de verschillende bestandstypen en het aandeel succesvolle toepassingen van OCR (tussen haakjes).

Puteigenaar	Documenttype (OCR succesvol)				
	alle	PDF	DOC	PPT	anders
NAM	2285 (1864)	1907 (1774)	77 (63)	70 (27)	231
Vermilion	251 (214)	215 (205)	10 (9)	-	26
alle	2536 (2078)	2122 (1979)	87 (72)	70 (27)	

De documenten zijn geïndexeerd in een zogenaamde *elasticsearch* index. *Elasticsearch* is database software, gespecialiseerd voor tekstuele data. Ook is een web-interface beschikbaar gesteld om deze database gemakkelijk te kunnen doorzoeken, op basis van *Kibana*.

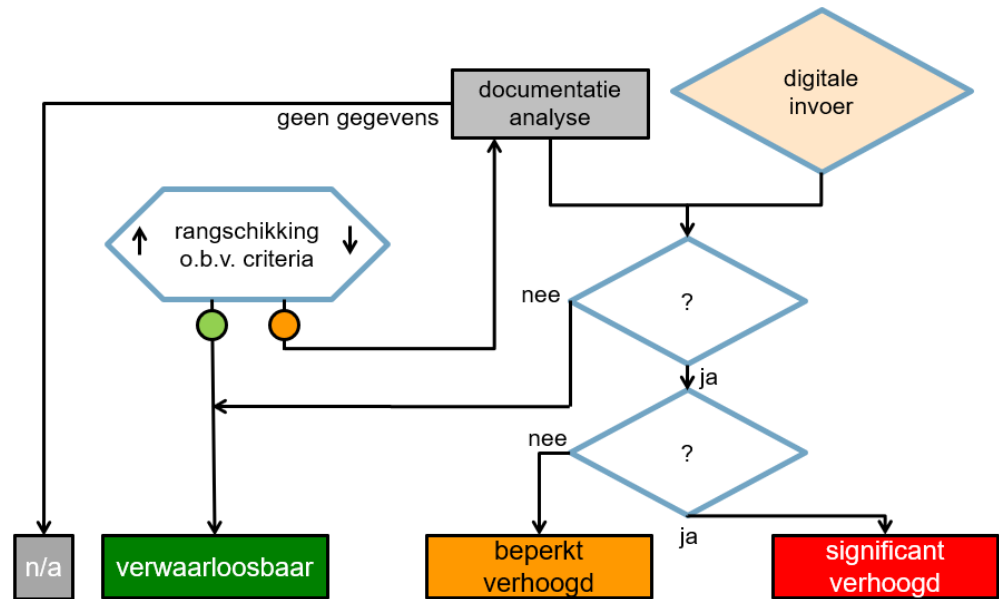
Om snel relevante informatie te extraheren uit de documenten is een lijst van sleutelwoorden opgesteld (Bijlage C). Vervolgens is, met behulp van een python script, voor elk document bepaald hoe vaak elk van de sleutelwoorden in dit document voorkomt. Deze statistieken zijn geëxporteerd naar een CSV file die o.a. met Excel kan worden bekeken en bewerkt.

3.3 Inventarisatiemethodiek

De risico-analyse wordt pragmatisch onderbouwd om efficiënt toe te werken naar een acceptabele betrouwbaarheid op basis van de beschikbare gegevens. Tijdens de screening wordt middels een risico-indicatiematrix (Bijlage A) voor elke frackoperatie inzichtelijk gemaakt in hoeverre zich (mogelijk) risico's hebben voorgedaan (Figuur 3.2). Voor elk van de vijf risico-categorieën (Paragraaf 2.1) is daartoe op basis van relevante criteria een stroomdiagram opgesteld waarmee de relatieve risico-indicatie wordt vastgesteld (Figuur 3.3). Daarnaast wordt ook de betrouwbaarheid van de analyse weergegeven op basis van de kwaliteit en volledigheid van de gegevens en de criteria waarmee het risico vastgesteld is (Figuur 3.2). Daar waar de beschikbare gegevens ontoereikend zijn voor de onderbouwing van een risico-inschatting wordt geen indicatie toegekend (wit). De focus van de screening wordt met deze methodiek gericht op die frackoperaties die een mogelijk verhoogd risico en/of lage betrouwbaarheid kennen.

		RISICO-INDICATIE			
		significant verhoogd	bepert verhoogd	verwaarloosbaar	
ZEKERHED	hoog				<i>afdoende gedocumenteerd</i>
	matig				<i>deels gedocumenteerd</i>
	laag				<i>indirecte aanwijzingen</i>
	g.g.				<i>geen gegevens</i>
		<i>significant effect; hoge impact*</i>	<i>bepert effect; lage (of geen) impact*</i>	<i>geen significant effect*</i>	<i>* gedefiniëerd per categorie</i>

Figuur 3.2 Legenda bij risico-indicatiematrix.



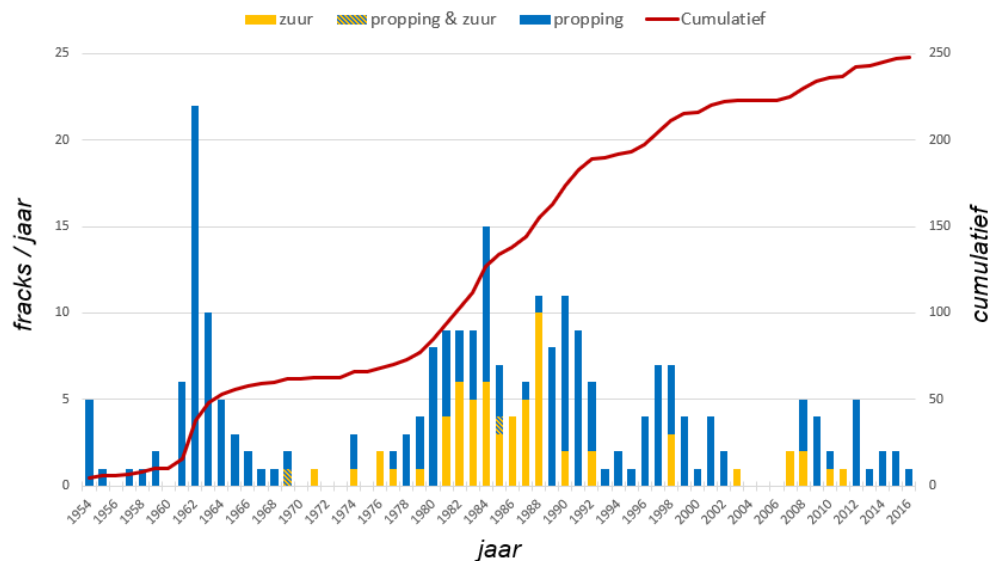
Figuur 3.3 Voorbeeld van een stroomschema waarmee voor elk van de vijf risicocategorieën, per put, op basis van de beschikbare gegevens (gekleurde blokken bovenaan) een risico-indicatie (gekleurde blokken onderaan; laag, matig, hoog en niet van toepassing (N/A)) wordt vastgesteld op basis van relevante criteria (blauw-omlijnde beslissingspoorten).

3.4 Generieke benadering mogelijke risico's

Voor een aantal mogelijke risico's waarvan geen directe gegevens per individuele frackoperatie bestaan is voor een generieke benadering gekozen. Zo is de waarschijnlijkheid dat de integriteit van de afsluitende laag bij het fracken van een reservoir wordt aangetast niet voor individuele gevallen gedocumenteerd. Met behulp van numerieke simulaties is dit risico inzichtelijk gemaakt.

4 Overzicht van conventionele frackoperaties

Er zijn 245 conventionele frackoperaties in putten op het vaste land geïnventariseerd, waarvan een deel mogelijk slechts acidjobs betreft (zuurbehandeling zonder hoge druk toe te passen). De eerste toepassing van fracking dateert uit 1954, waarna de techniek vooral in de periodes 1962 – 1964 en 1980 – 1998 is gebruikt. Sinds 1984 is er over het algemeen een afnemende trend in het aantal frackoperaties per jaar (Figuur 4.1).

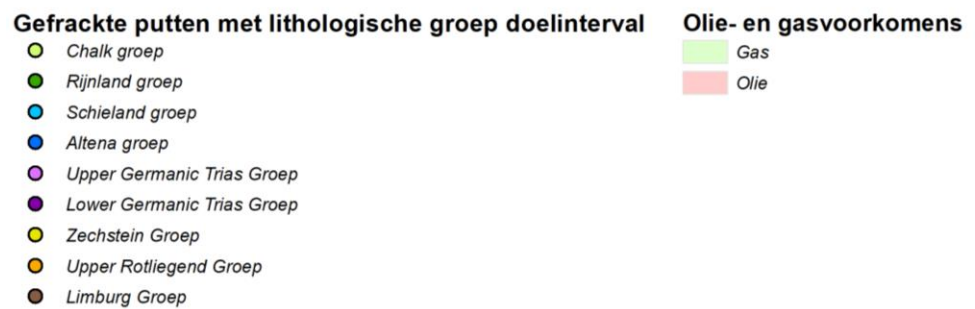
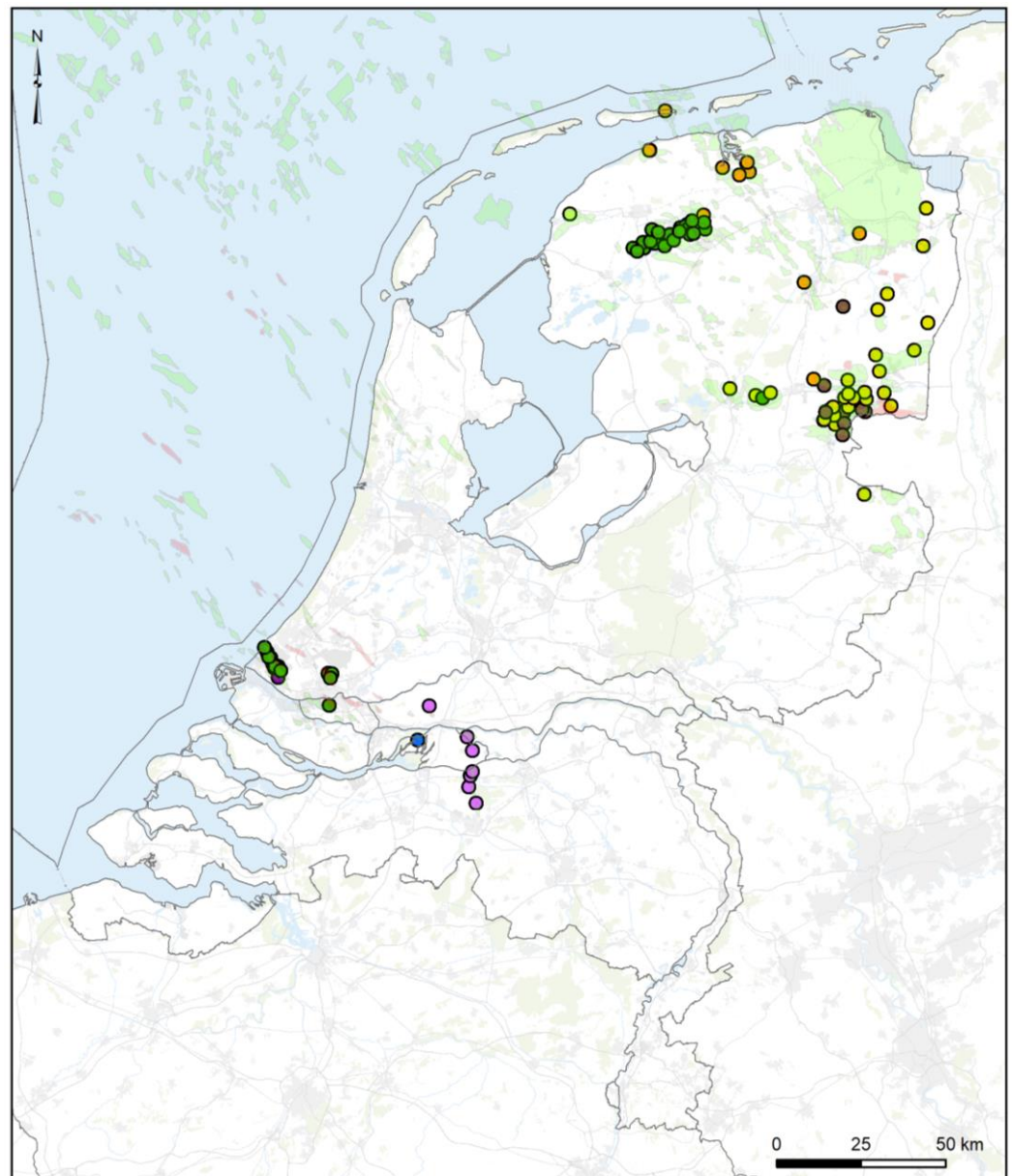


Figuur 4.1 Aantal frackoperaties per jaar uitgesplitst op type en cumulatief (zie legenda) vanaf 1954.

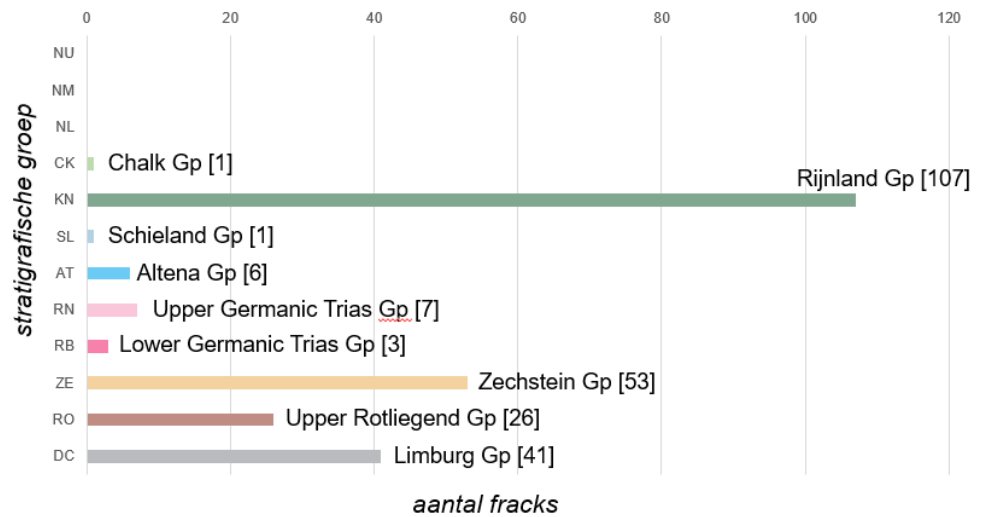
De locaties van de frackoperaties worden bepaald door de geologie; daar waar reservoirs voorkomen met een van nature slechte doorlatendheid. Figuur 4.2 laat zien dat dit met name in het noordoosten van Nederland, Zuid-Holland en West Noord-Brabant het geval is.

Verreweg de meeste frackoperaties zijn uitgevoerd in de reservoirs van de Rijnland Groep. In Zuid Holland betreft dit de olievelden rondom Rotterdam die met name in de zestiger jaren van de vorige eeuw zijn gefracked. De frackoperaties in het begin van de tachtiger jaren zijn met name in het grensgebied tussen Drenthe en Overijssel uitgevoerd. Daar betrof het veelal kalkhoudend gesteente uit de Limburg Groep (Carboon) en Zechstein Groep (Perm), hetgeen tot uiting komt in het relatief grote aantal acid frackoperaties. In de overgang van de tachtiger naar de negentiger jaren zijn het met name activiteiten in Friesland die de overhand hebben. Dit zijn frackoperaties in de zandsteen reservoirs van de Rijnland Groep (Onder-Krijt) en de Upper-Rotliegend Groep (Perm) (Figuur. 4.2 en Figuur 4.3).

De reservoirs van de Limburg-, Upper-Rotliegend- en Zechstein Groepen worden afgesloten door de zoutformaties van de Zechstein Groep. De overige reservoirs liggen boven het zout en hebben veelal ondoorlatende kleien als afdekkend pakket.

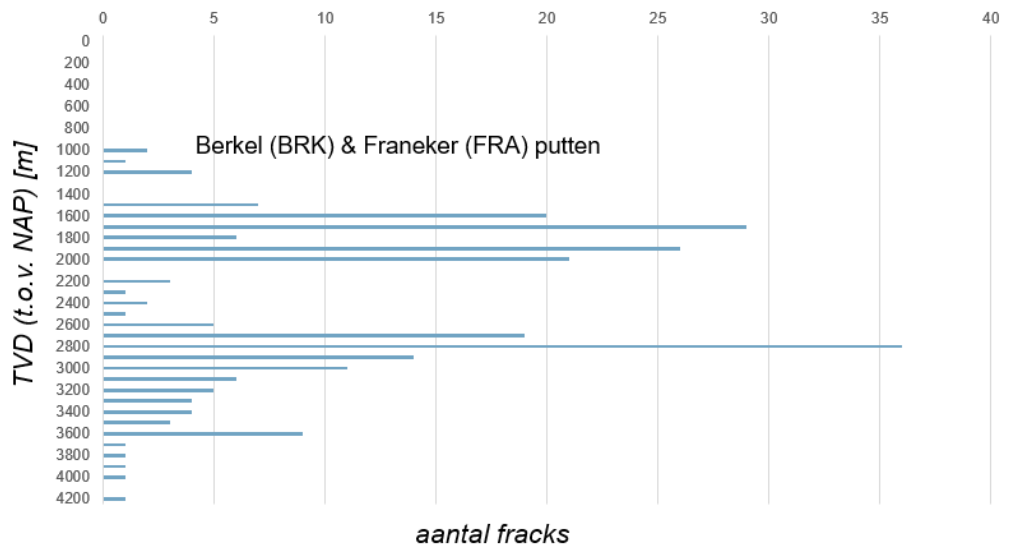


Figuur 4.2 Frackoperaties in Nederland waarbij de kleur het stratigrafische doelinterval weergeeft.



Figuur 4.3 Aantal fracks per stratigrafisch interval. Diepere reservoirs in de Limburg, Upper-Rotliegend en Zechstein Groepen worden afgesloten door de zoutlagen in de Zechstein Groep. De overige reservoirs liggen boven het zout en worden voornamelijk afgedekt door ondoorlatende kleien.

De gestimuleerde intervallen liggen op een diepte tussen de 950 en 4000 m onder NAP (Figuur 4.4) De ondiepste putten zijn die van de oudere olievelden bij Rotterdam en het gasveld bij Franeker.

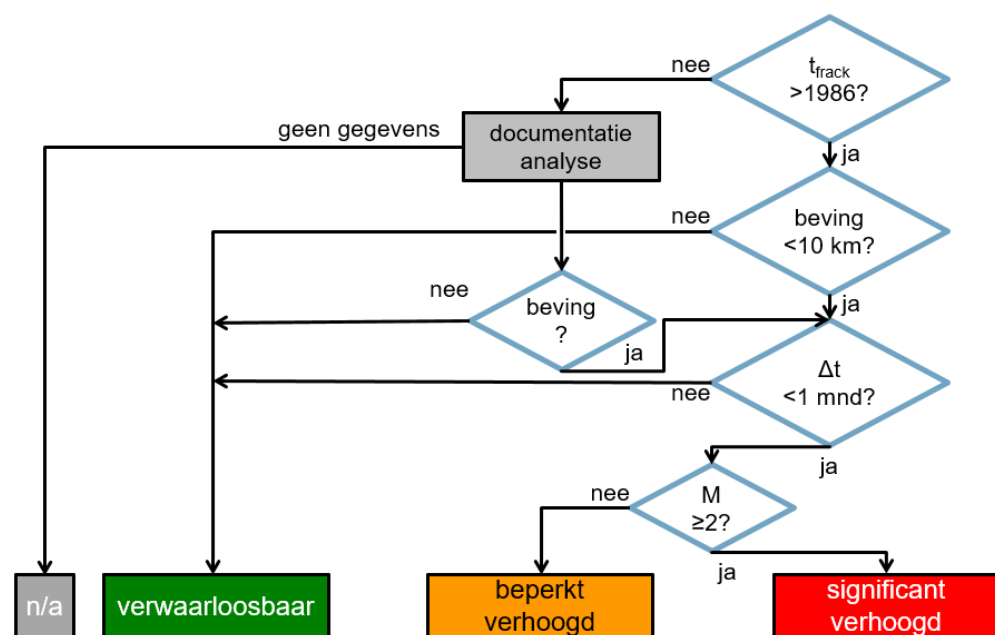


Figuur 4.4 Aantal fracks per 100 m diepte-interval (ware verticale diepte t.o.v. NAP).

5 Geïnduceerde seismiciteit

5.1 Screeningsmethodiek

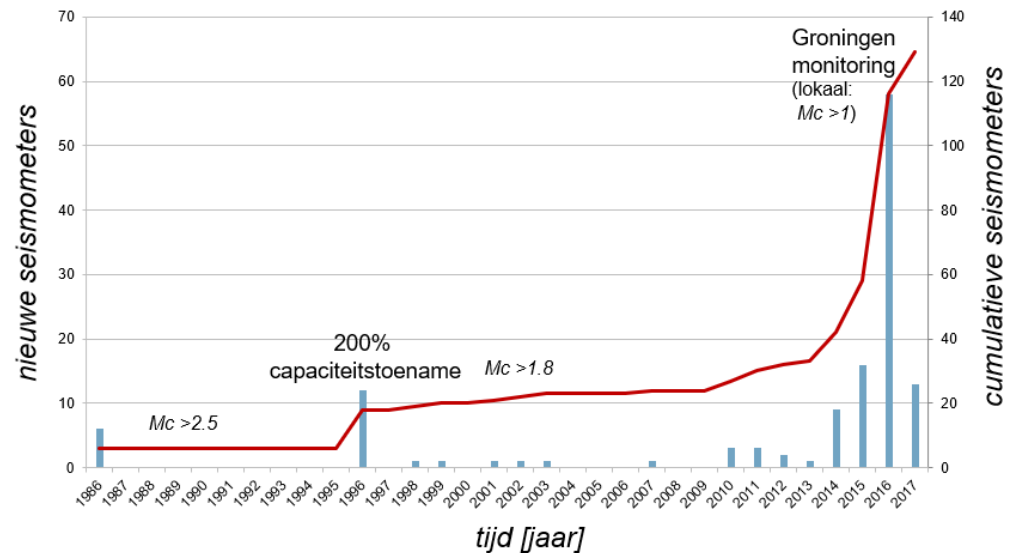
Om te bepalen of frackoperaties in het verleden hebben geleid tot geïnduceerde seismiciteit is gekeken naar historische waarnemingen van het KNMI en de beschikbaar gestelde documentatie. Daar waar geregistreerde bevingen qua tijdstip en locatie in verband kunnen worden gebracht met de frackoperaties die binnen de strekking van deze screening vallen is vervolgens gekeken naar de magnitude van de beving om tot een risico-indicatie te komen (Figuur 5.1). Voor elk voorkomend geval is daarnaast gekeken of er een specifieke oorzaak voor het induceren van een beving kan worden vastgesteld.



Figuur 5.1 Samenvattend stroomschema voor het bepalen van de risico-indicatie voor geïnduceerde seismiciteit. N.B. Het resultaat voor frackactiviteiten in de periode 1986 – 1996 krijgt een lagere zekerheid toegekend omdat de dekking van het netwerk toen nog niet volledig was.

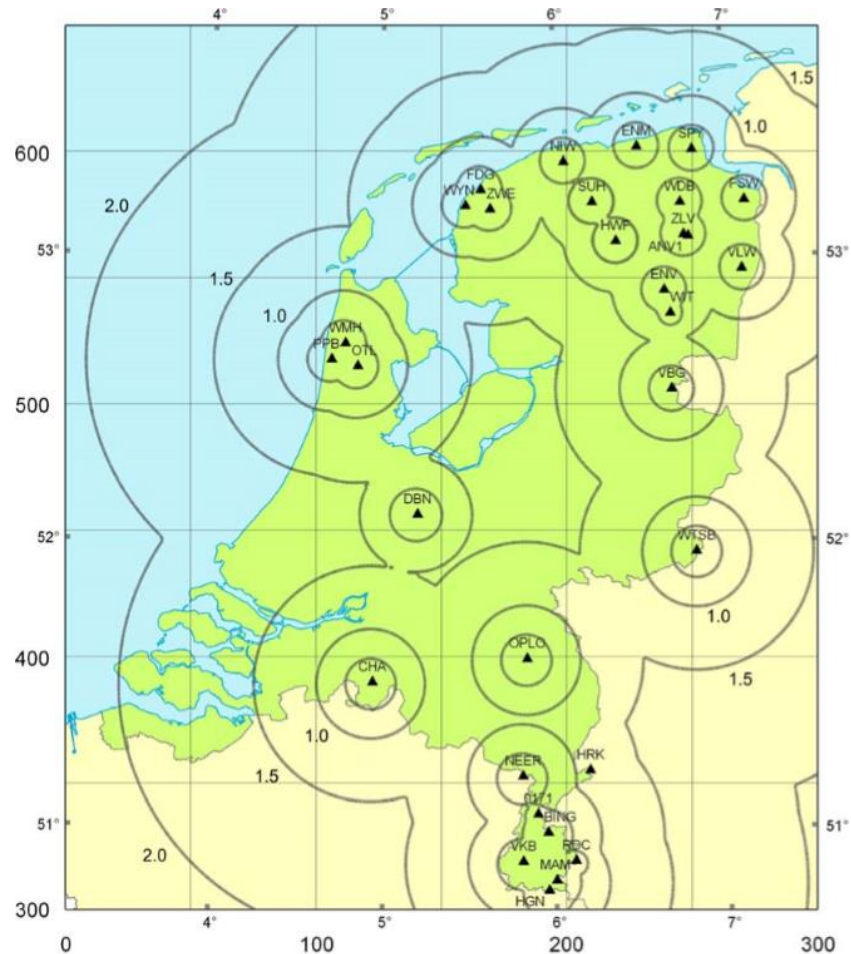
Tot 1970 was het seismische monitoringsnetwerk beperkt en voornamelijk gericht op die gebieden waar van nature aardbevingen optraden (met name Zuid-Limburg). Door uitbreiding van het meetnet werd het mogelijk om landelijk bevingen met een magnitude van 2,5 op de Schaal van Richter of hoger te registreren, waarbij moet worden opgemerkt dat in nabijheid van seismische meetstations ook kleinere bevingen gemeten konden worden. Door stapsgewijze verdere uitbreiding bestaat sinds 1996 een landelijke dekking van minimaal 1,8 op de Schaal van Richter (Figuur 5.2 en Figuur 5.3) die sindsdien verder verbeterd is. Door de grotere dichtheid van meetpunten is ook de nauwkeurigheid van de plaatsbepaling van aardbevingen mettertijd toegenomen. In de provincie Groningen is de detectiegrens vanaf 2015 nog verder verlaagd tot magnitude 1,0 op de schaal van Richter (Figuur 5.2). Eventuele bevingen beneden de stapsgewijs verlaagde detectiegrens zijn niet geregistreerd in de database van het KNMI.

Een beving wordt aangemerkt als zijnde geïnduceerd op grond van de geringe diepte van de bevingshaard (het epicentrum), de beperkte lengte van het gemeten seismische signaal en de nabijheid van ondergrondse activiteiten die een beving kunnen induceren. Alle tot 1986 geregistreerde bevingen worden door het KNMI toegewezen aan een natuurlijke oorzaak (www.knmi.nl).



Figuur 5.2 Aantal nieuwe seismometers per jaar (blauw) en cumulatief (rood), waar M_c de minimale magnitude (Schaal van Richter) weergeeft die landelijk (onafhankelijk van de locatie) kan worden gemeten. M_c wordt lager met een toename van het aantal meetpunten en varieert afhankelijk van nabijheid van één of meerdere meetpunten.

De wijze waarop de mogelijke relatie tussen frackoperaties en geïnduceerde seismische bevingen is geanalyseerd wordt weergegeven in Figuur 5.1. Voor frackoperaties van voor 1986 moet worden uitgegaan van meldingen in de beschikbaar gestelde documentatie. Indien daar niet expliciet over seismische activiteit wordt gerapporteerd kan er geen oordeel worden geveld (geen data). Voor frackoperaties vanaf 1986 wordt de KNMI database van geïnduceerde bevingen eerst gefilterd op bevingen binnen een straal van 10 km van de gestimuleerde putten. De aangenomen locatieonzekerheid wordt bepaald door twee aspecten: de opzet (geometrie en dichtheid) van het meetnet en de onzekerheid in seismische snelheden. Het eerste aspect, de geometrie en dichtheid van het meetnet, is in de jaren verbeterd. Het tweede aspect, de onzekerheid in de seismische snelheden (vooral voor dieptes groter dan ~4 km) is niet verbeterd in verband met het gebrek aan diepe boorgaten waar sonische boorgatmetingen zijn opgenomen om informatie te verkrijgen over de seismische snelheden door de verschillende laagpakketten in de ondergrond. Ondanks de verbetering van het meetnet is gekozen voor een ruime zoekstraal van 10 km. In de tweede stap wordt de chronologie tussen elke frackoperatie en de bevingen (binnen 10 km van de put) bepaald. Bevingen opgetreden vóór een frackoperatie worden niet meegenomen. Bevingen die binnen een bepaalde tijd ($\Delta t < 1$ maand) na de frackoperatie plaatsvinden zijn mogelijk gerelateerd aan die frackoperatie. Aan de hand van de magnitude van deze bevingen wordt de bijbehorende risico-indicatie bepaald (Figuur 5.1). Voorts wordt nagegaan of er geen aannemelijke alternatieve oorzaak voor de beving bestaat.

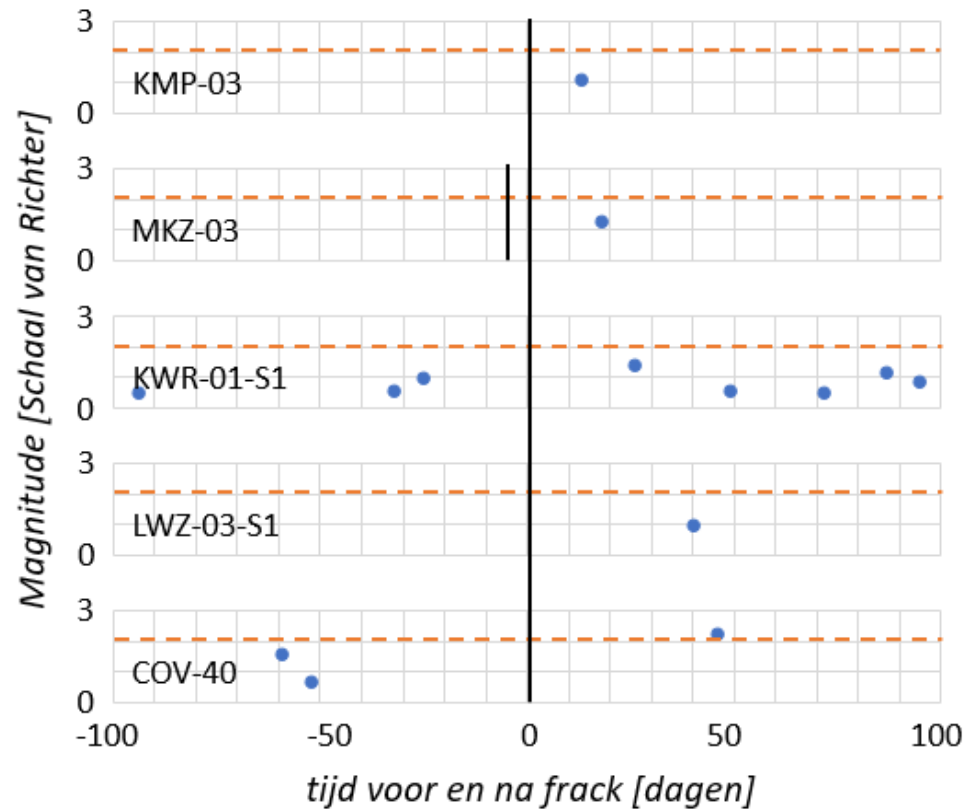


Figuur 5.3 Verbreiding van seismometers in Nederland in 2010. Met contouren wordt de gevoeligheid van het meetnet aangegeven (magnitude op de schaal van Richter). Naar Dost et al., 2012.

5.2 Bevindingen

131 van de 245 frackoperaties binnen de scope van deze screening dateert uit de periode van voor 1986 (Figuur 4.1) waarin de seismische monitoring ontoereikend was om geïnduceerde seismiteit waar te nemen onder een magnitude van 2,5 op de Schaal van Richter. In de beschikbaar gestelde rapportages zijn geen expliciete vermeldingen van seismiteit gevonden. Na 1986 zijn in vijf gevallen bevingen waargenomen binnen 10 kilometer en minder dan 100 dagen na een frackoperatie, waarvan drie binnen één maand (Figuur 5.4), te weten bij de putten Kollumerpomp-03 (KMP-03), Munnekezijl-03 (MKZ-03; twee frackoperaties kort na elkaar) en Kiel Windeweer-01-S1 (KWR-01-S1). Bij de overige twee putten (LWZ-03-S1 en COV-40) is een beving waargenomen na respectievelijk 40 en 46 dagen. Figuur 5.5 laat de drie putten in Noord-Nederland zien, gelegen in een gebied met een groot aantal producerende gasvelden. Deze gasvelden hebben in een eerdere studie (TNO, 2012) een kans op beven als gevolg van gaswinning toegeschreven gekregen van minimaal 19% bij een depletie van minimaal 28%. Ten tijde van de beving waren (omliggende) gasvelden verder gedepleteerd dan 28%. De locatie van de bevingen ten opzichte van deze gasvelden en de tussenliggende breukstructuren maakt het derhalve zeer waarschijnlijk dat zij gerelateerd zijn aan de gasproductie uit de

gasvelden (waaronder de doelreservoirs van KMP-03 en KWR-01-S1 zelf; zie Tabel 5.1) en niet aan de respectievelijke frackoperaties. Een vergelijkbare situatie geldt voor de put COV-40, bovendien is de periode na de frackoperatie 46 dagen. De put KWR-01-S1 (niet op Figuur 5.5 afgebeeld) ligt in het bevingengebied van het Groningen gasveld. Hier is een groot aantal (83) seismische gebeurtenissen waargenomen die zowel voor als na de frackoperatie hebben plaatsgevonden (Figuur 5.4). De relatie met de frackoperatie zelf is daardoor zeer onwaarschijnlijk.



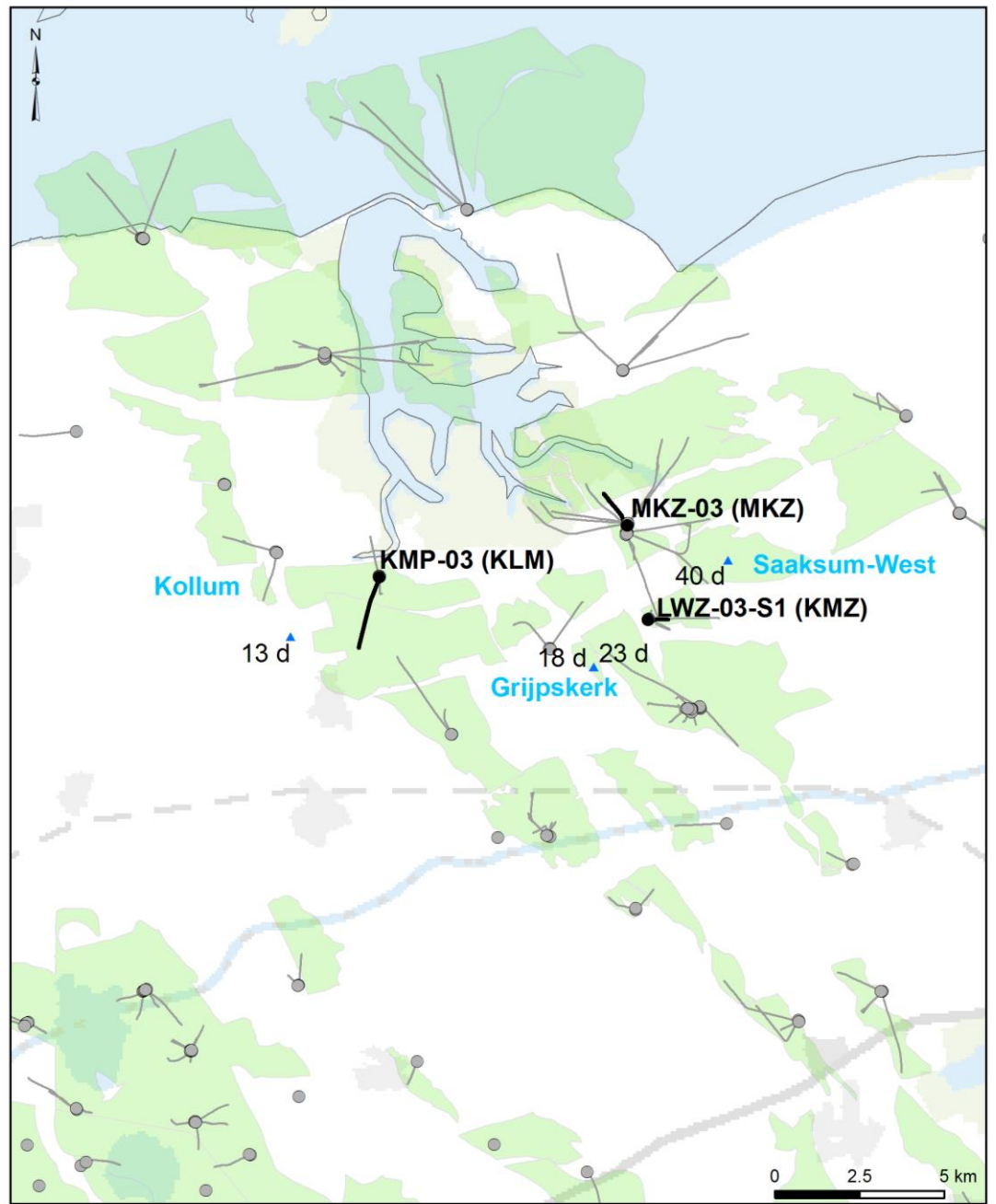
Figuur 5.4 Magnitude van seismische activiteit (blauwe stippen) op <10 km afstand en <100 dagen voor en na frackoperaties (verticale zwarte lijnen; bij MKZ-3 twee vlak na elkaar), waarbij de eerste beving <100 dagen na de frackoperatie (verticale zwarte lijn) heeft plaatsgevonden. Horizontale oranje stippellijn geeft het magnitudecriterium van 2 op de Schaal van Richter (zie Figuur 5.1) voor de risico-indicatie weer.

Tabel 5.1 Alle gevallen van seismische activiteit binnen 10 km en tot 100 dagen na een frackoperatie. Voor elke put is het doelveld, productie start en depletie ten tijde van de frackoperatie weergegeven. Voor de eerstvolgende beving is de magnitude en de vermoedelijke oorzaak (TNO, 2016) vastgesteld.

Locatie				Frackoperatie		Eerste beving binnen 10 km		
Putcode	Veld	Start prod.	Dpl. [%]	#	Datum	Δt [dgn]	M_L	Vermoedelijke oorzaak
KMP-03	Kollum	2002	45	2	03-10-2012	13	1,1	Gaswinning Kollum
MKZ-03	Munnekezijl	1997	0	1	12-02-1997	18	1,0	Gaswinning Grijpskerk
KWR-01-S1	Kiel-Windeweer	2003	45	1	01-11-2012	26	1,4	Gaswinning Groningen
LWZ-03-S1	Kommerzijl	2008	1,4	2	30-11-2012	40	1,0	Gaswinning Saaksum
COV-40	Coevorden	2003	58,8	1	02-10-1996	46	2,2	Gaswinning Coevorden

5.3 Conclusies

Voor zover de beschikbare gegevens toestaan zijn er geen gevallen vastgesteld waarbij een frackoperatie heeft geleid tot gemeten geïnduceerde seismiciteit. In drie gevallen is weliswaar een geïnduceerde beving binnen de screeningscriteria geregistreerd, maar wordt die toegeschreven aan gaswinning (depletie). Voor frackoperaties van voor 1986 is geen relatie met seismische activiteit aangetoond, maar omdat bevingen onder de gevoeligheid van het meetnet niet geregistreerd zijn is het niet uit te sluiten dat zich een dergelijke beving heeft voorgedaan. Alleen wanneer bij de frackoperatie een beving zou zijn gevoeld en deze in de door de pteigenaar aangeleverde documentatie wordt genoemd zou een dergelijke beving kunnen worden getraceerd. Datzelfde geldt voor bevingen van na 1986 die onder de detectiegrens van het KNMI meetnet vallen.



Geïnduceerde bevingen < 100 dagen

Magnitude

▲ 1.0 - 1.5

● Gefracte putten

○ Niet gefracte putten met X,Y maaiveld locatie

Voorkomen

■ Gas

— Deviaties van de gefracte putten

— Deviaties van de niet gefracte putten

Figuur 5.5 Kaart van geïnduceerde bevingen binnen 10 km van frackoperaties waarin seismiciteit minder dan 100 dagen na de frackoperatie plaatsvond. (label geeft het aantal dagen (d) tussentijd weer). De gaswinning uit de omringende gasvoorkomens (groen) is vermoedelijk de oorzaak van de bevingen (geassocieerde veldnamen in blauw).

6 Verlies van integriteit van afsluitende lagen

Dit hoofdstuk behandelt het risico dat een frack vanuit het reservoir zou doorgroeien door de afsluitende laag ('seal' of 'cap-rock') heen en zodoende een migratiepad creëert naar bovenliggende lagen. Naast gegevens uit de documentatie is bij de evaluatie gebruik gemaakt van een aantal gesteente-mechanische principes die hieronder worden toegelicht.

Om een frack in een reservoir te kunnen creëren is een injectiedruk (P_f) in de put nodig van net iets boven de minimale hoofdspansing (σ_3) in het reservoirgesteente ($S_{\text{hmin-res}}$). Een frack die in het reservoir ontstaat kan alleen propageren in de afsluitende laag wanneer de injectiedruk ook hoger is dan de minimale hoofdspansing in de afsluitende laag ($S_{\text{hmin-seal}}$). De integriteit van afsluitende lagen is dus gewaarborgd als de injectiedruk onder deze minimale hoofdspansing van de afsluitende laag blijft ($P_f < S_{\text{hmin-seal}}$).

In Nederland is, op een diepte van één tot vier km, de minimale hoofdspansing horizontaal georiënteerd. De maximale hoofdspansing (σ_1) is verticaal en wordt veroorzaakt door het gewicht van het bovenliggende gesteente (lithostatische druk). Een frack groeit vanuit de put loodrecht op de oriëntatie van de minimale horizontale spanning en opent zich daarom in horizontale richting (de frack is dan langs een verticaal vlak georiënteerd). Het in-situ meten van een hydraulische frack in de ondergrond is niet mogelijk; ruimtelijke propagatie van een frack kan wel gemonitord worden door micro-seismische metingen en met numerieke simulatoren benaderd worden.

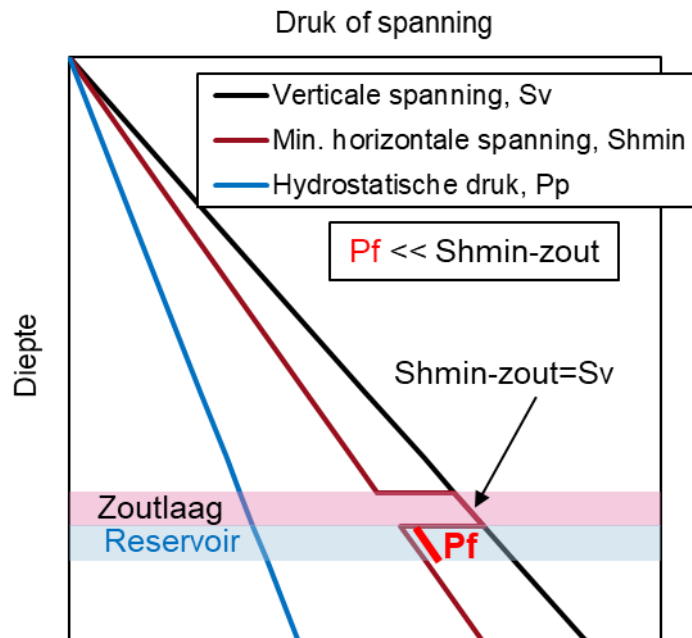
Wanneer een frack vanuit het (gefrackte) reservoir door de gehele dikte van de bovenliggende afsluitende laag groeit spreekt men van het verlies van integriteit van de afsluitende laag. Door verlies van integriteit bestaat er de kans dat vervuiling plaatsvindt in de bovenliggende lagen door koolwaterstoffen of andere chemische stoffen gebruikt tijdens de frackoperatie. De migratie van deze stoffen naar de oppervlakte is onwaarschijnlijk, gezien het grote aantal ondoorlatende lagen en het gebrek aan drijvende kracht (zoals een significant dichtheidsverschil). Bij fracks die de afsluitende laag slechts gedeeltelijk penetreren blijft de integriteit van de afsluitende laag intact en is dit geen risicofactor.

De afsluitende lagen van gefracte reservoirs zijn in Nederland in het algemeen tientallen tot honderden meters dik. Bovendien liggen in het gesteentepakket tussen de afsluitende laag en het maaiveld nog verschillende lagen die ondoorringbaar zijn (secundaire seals). Een voorbeeld zijn schalies (als primaire seal) die vaak bedekt zijn door een bovenliggende secundaire seal (Zechstein evaporieten met steenzout).

Het risico van aantasting van de integriteit van de afsluitende lagen door een frackoperatie is aanzienlijk kleiner wanneer de minimale spanning in de afsluitende laag beduidend groter is dan in het onderliggende reservoir. Dit geldt bij:

- Fracking van een reservoir met steenzout als afsluitende laag. Steenzout heeft gesteente-eigenschappen die in gedrag lijken op die van een zeer dikke stroop (op geologische tijdschaal). De spanningstoestand in steenzout is namelijk isotroop, d.w.z. dat de horizontale spanningen gelijk

zijn aan de verticale (lithostatische) spanning (S_v). De injectiedrukken waarbij zich in het reservoir een frack vormt blijven daardoor ruim onder de minimale spanning in het steenzout en daarom zal de propagatie van een frack zich beperken tot het reservoirgesteente (de weg van de minste weerstand) (Figuur 6.1).



Figuur 6.1 Een schematische doorsnede van de aardkorst met op grote diepte (2500-3500 m) een door steenzout afgesloten reservoir. De lijnen geven de toename van de spanning in de ondergrond aan. De minimale horizontale spanning (S_{hmin}) in de zoutlaag vanwege de eigenschappen van zout gelijk aan de verticale lithostatische spanning (S_v).

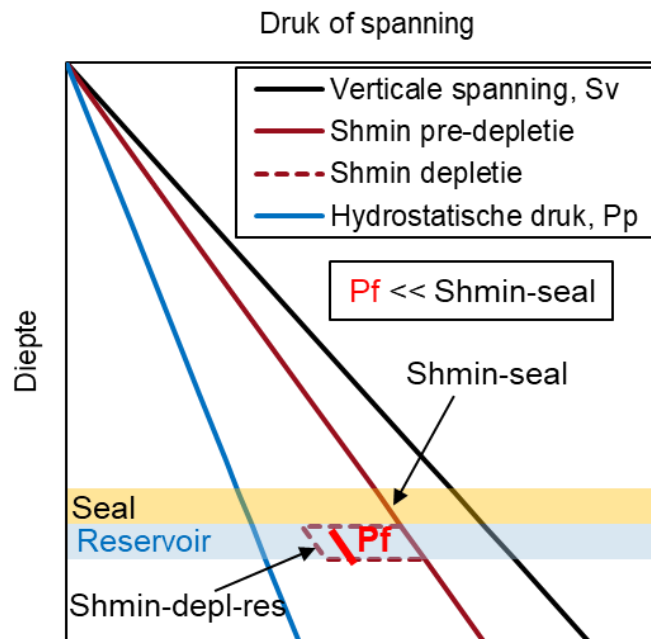
- Fracking van (gedeeltelijk) gedepleteerde reservoirs. De minimale horizontale spanning in het reservoir neemt af met de productie van olie of gas (depletie) (Figuur 6.2). De mate waarin de minimale horizontale spanning ($S_{hmin-res}$) afneemt bij depletie van een reservoir wordt gegeven door de simpele analytische benadering:

$$dS_{hmin-res} = \alpha * dP * (1-2\nu)/(1-\nu),$$

waarbij de mate waarin de horizontale minimale spanning ($S_{hmin-res}$) afhangt van de depletie (dP in MPa) wordt bepaald door de gesteentemechanische eigenschappen van het reservoir (de Biot coëfficiënt (α) en de Poisson coëfficiënt (ν). In de praktijk komt het er op neer dat $S_{hmin-res}$ afneemt met een factor 0,5 – 0,7 maal de depletie.

Als de horizontale minimale spanning ($S_{hmin-res}$) in het reservoir afneemt kan het fracken onder lagere injectiedrukken plaatsvinden dan wanneer het reservoir gefracked wordt voor het begin van productie. Door het toegenomen contrast in minimale spanning tussen het reservoir en de seal, beperkt de groei van de frack zich tot het reservoir zonder zich uit te breiden in de bovenliggende seal.

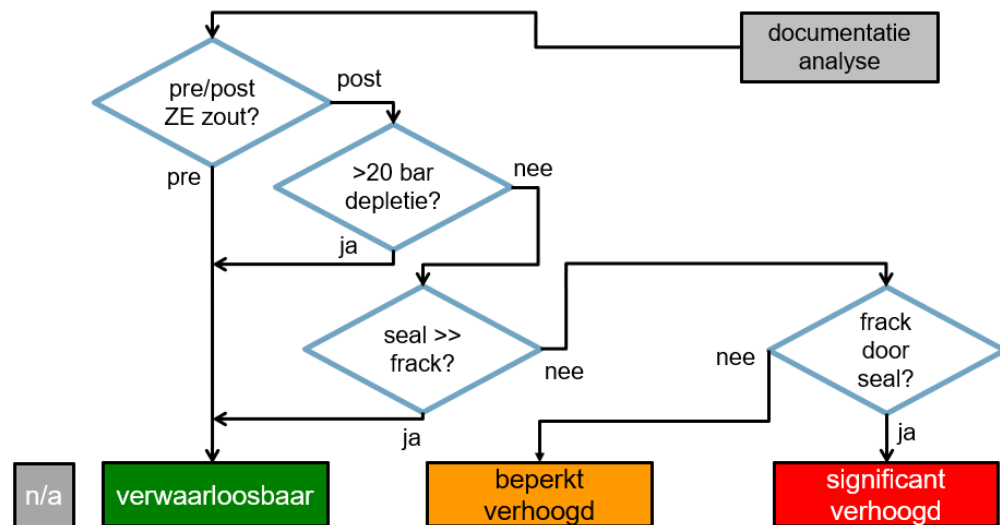
De in Nederland uitgevoerde frackoperaties zijn allen getoetst op de bovenbeschreven situaties met de in dit onderzoek toegepaste screeningmethodiek.



Figuur 6.2 Schematisch weergave van de toename van de spanningen met diepte in het geval van een gedeeltelijk gedepleteerd reservoir. De minimale horizontale spanning in het reservoir neemt af door de daling van de reservoirdruk als gevolg van de productie (depletie). Daardoor is de druk bij fracken (P_f) van een gedepleteerd reservoir lager dan de minimale horizontale spanning in de afsluitende laag (seal). De frack blijft in dat geval binnen het reservoir.

6.1 Screeningsmethodiek

De screeningsmethodiek die is toegepast bij de evaluatie van het risico op het verlies van de integriteit van de afsluitende lagen is weergegeven in Figuur 6.3. Allereerst zijn de rapporten gescreend op meldingen van het verlies van sealintegriteit als gevolg van conventioneel fracken. Omdat er in geen van de rapporten melding wordt gemaakt van de schending van deze integriteit (mogelijk door de beperkte kans op waarneming), zijn de volgende stappen uitgevoerd in Figuur 6.3. Voor alle conventionele fracks in onshore putten in Nederland is bepaald of het gestimuleerde stratigrafische interval (reservoir) zich boven of onder de afsluitende Zechstein evaporieten bevindt. Deze evaporieten bestaan namelijk voor een belangrijk deel uit steenzout. Steenzout heeft, zoals eerder beschreven, zodanige geomechanische eigenschappen dat fracks niet vanuit het gefrackte reservoir propageren in het zout (zie ook Figuur 6.1). De aanwezigheid van een steenzoutpakket boven het gefrackte reservoir reduceert het risico op verlies van de integriteit van de afsluitende laag tot verwaarloosbaar.



Figuur 6.3 Samenvattend stroomschema voor het bepalen van de kans op verlies van integriteit van afsluitende lagen. 'seal >> frack?' en 'frack door seal?' worden bepaald aan de hand van generieke modellen in Mfrac.

Vervolgens wordt gekeken of het reservoir al gedeeltelijk gedepleteerd was bij het uitvoeren van de frackjob. Fracken van gedepleteerde reservoirs vermindert het risico op het verlies van de integriteit van de afsluitende laag (Paragraaf 6.1 en Figuur 6.2). Hoe hoger de druksdaling in het reservoir is, hoe lager het risico wordt. Het effect treedt al op bij kleine reservoirdrukdalingen van ca. 20 bar en de kans wordt zeer klein bij druksdalingen boven de 50 bar.

Ten slotte wordt op basis van de dikte en samenstelling (lithologie) van de afsluitende laag en de gerapporteerde geschatte geometrie van een frack de kans op verlies van integriteit van afsluitende lagen bepaald. Hierbij ontbreekt in veel gevallen echter data omtrent frackgeometrie, vooral bij putten die enkele decennia geleden gefracked zijn. Om toch een inschatting te maken van de groei van een frack (frackpropagatie) in de afsluitende laag is er een generieke studie uitgevoerd naar de invloed van de dikte van de afsluitende laag. Voor elke reservoir-seal combinatie die in Nederland is gefracked is een referentiemodel ontwikkeld met modelparameters typerend voor het betreffende reservoir en seal gesteente. Het fracken is gesimuleerd met het software pakket *Mfrac Suite 12* (Mfrac, 2018). Er is gekozen om naar de meest riskante ('worst-case') scenario's te kijken. Als in een worst-case scenario geen frackpropagatie in de seal plaats vindt zal dat ook niet in een ander scenario gebeuren. De aannames die van toepassing zijn op de generieke modellering zijn als volgt:

- De frackoperatie vindt plaats bij initiële reservoirdruk.
- De frackvloeistof is laag viskeus
- De frack wordt geïnitieerd in het bovenste deel van het reservoir, vlak onder de seal
- De hoogste injectievolumes en injectiesnelheden per reservoirtype zoals gevonden in de gescreende rapporten worden toegepast.
- De leakoff (het weglekken van frack vloeistoffen in het reservoir, waardoor het geen bijdrage meer levert aan de frackvorming) wordt laag ingeschat.

Putparameters en gesteente-eigenschappen zijn bepaald op basis van geïnventariseerde post-frack evaluatierapporten en gangbare literatuur, zoals verder beschreven in bijlage D. Verder is er een aantal additionele scenario's gesimuleerd om de minimale dikte van de bovenliggende seal en intra-reservoir seals te bepalen waarbij de verticale propagatie van een frack wordt verhinderd. Individuele analyses per individuele put vallen buiten de scope van deze studie.

6.2 Bevindingen

Documentanalyse

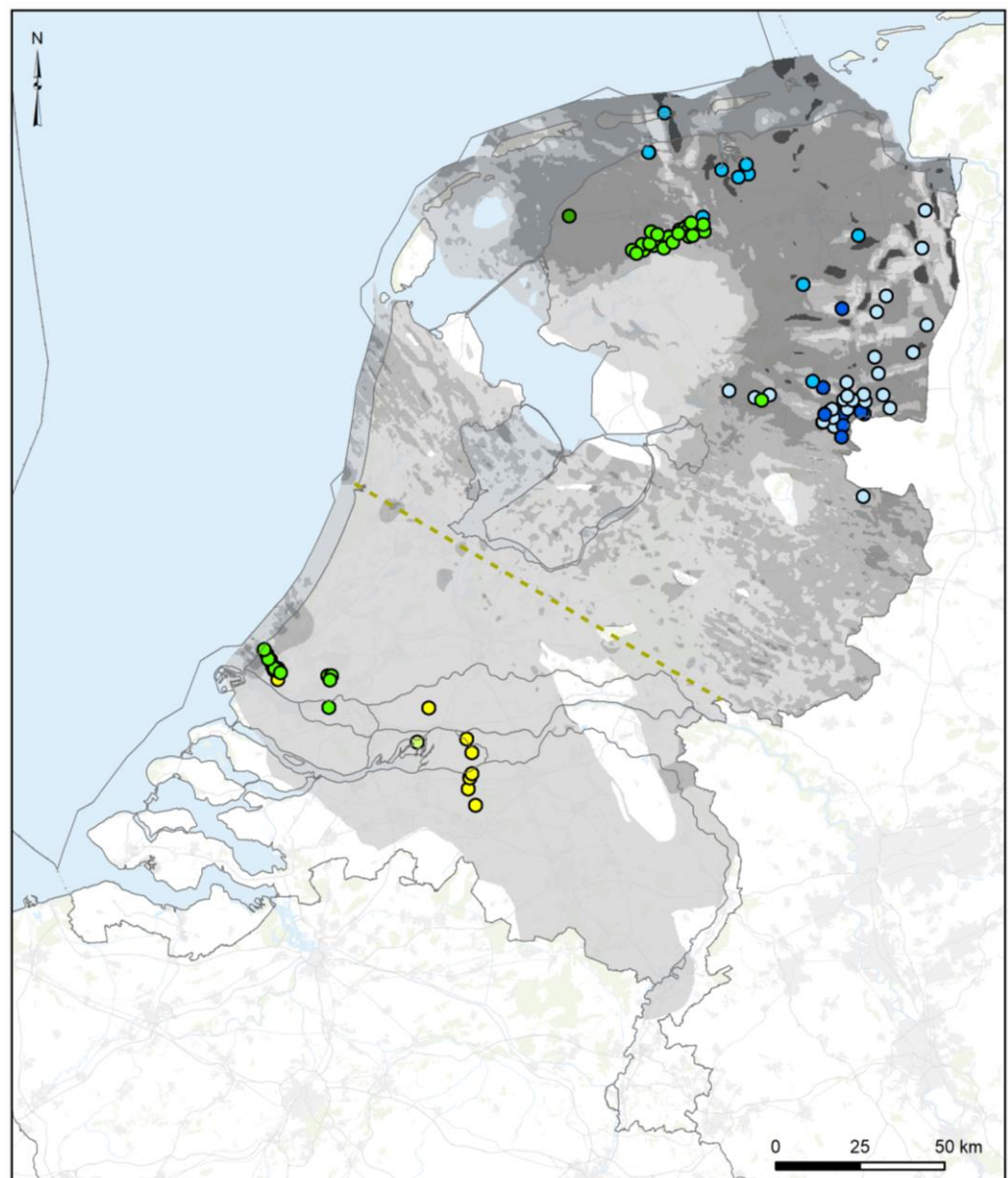
Er is in de gescreende rapporten geen melding gevonden van lekkages door het verbreken van de sealintegriteit als gevolg van conventionele frackoperaties binnen de strekking van dit onderzoek. Daarbij moet worden opgemerkt dat de kans bestaat dat enig verlies van integriteit van de afsluitende laag als gevolg van fracking niet is opgemerkt door de uitvoerder.

Samenstelling afdekkende laag (seal)

Op basis van gesteentemechanische wetmatigheden is beredeneerd dat frackoperaties uitgevoerd onder de afsluitende lagen van het Zechstein steenzout een verwaarloosbare kans hebben dat de sealintegriteit wordt verbroken. Modelresultaten laten zien dat een 2 m dikke zoutlaag voldoende zou zijn om een frack tegen te houden (bijlage D, Figuur D7). De zoutlagen zijn in de betreffende regio's veel dikker dan dat (Figuur 6.4). Ongeveer de helft van de geïnventariseerde fracks is gezet in een reservoir onder de afsluitende zoutlagen uit de Zechstein Groep (Figuur 6.4).

Depletie reservoir

Voor gedepleteerde velden is vastgesteld dat de kans op verlies van sealintegriteit sterk gereduceerd is door de afgenomen druk in het reservoir. Van de putten in reservoirs onder het Zechstein zout is ruim de helft meer dan een jaar na de start van de productie gefracked (dat betekent over het algemeen een drukdaling van 10 tot 20 bar ten opzichte van de initiële druk in het veld). Voor de putten in reservoirs die niet door het Zechstein zout worden afgedekt is bijna 80% pas na 1 of meer jaar na de productiestart gefracked (Tabel 6.1). Voor die putten geldt daarom een verkleinde kans op verlies van integriteit van de afsluitende lagen.



Dikte Zechstein met gefracte putten per reservoir eenheid

- Post Zechstein:**
- Chalk groep
 - Rijnland groep
 - Altona groep
 - Trias groep
- Pre Zechstein:**
- Zechstein groep
 - Upper Rotliegend groep
 - Carboon groep

Dikte Zechstein (m)

- 0 - 250
- 250 - 500
- 500 - 1500
- 1500 - 4200
- Zout (Haliet) lijn

Figuur 6.4 Diktekaart van de Zechstein Groep en de locaties van de geïnventariseerde fracks. Van de fracks is aangegeven of ze in reservoirs onder (pre-Zechstein) of boven (post-Zechstein) de afsluitende steenzoutlagen van de Zechstein Groep zijn gezet. De gele stippellijn (Zout (Haliet) lijn) geeft de zuidelijke grens aan van het verbreidingsgebied van het Zechstein steenzout. Alle fracks in het pre-Zechstein bevinden zich in het gebied met een (zeer) dikke laag steenzout.

Tabel 6.1 Periode tussen productiestart en het uitvoeren van de frackoperatie.

Formatie (Groep)	Periode tussen productiestart en uitvoeren van de frackoperatie			
	<1 jaar	1-5 jaar	5-10 jaar	>10 jaar
Ommelanden Fm. (Chalk Groep)	0	0	0	1
Vlieland Fm. (Rijnland Groep)	28	29	26	24
Schieland Groep	0	0	1	0
Altena Groep	4	1	0	1
Upper en Lower Germanic Trias Groep	2	2	3	3
Zechstein Groep	18	22	1	12
Rotliegend Groep	11	6	2	7
Limburg Fm. (Carboon Groep)	11	25	0	5
Totaal	74	85	33	53

Sealdikte en frackhoogte

De frack simulaties die met het numerieke softwarepakket MFrac hebben voor de verschillende reservoir/seal combinaties onderstaande resultaten opgeleverd.

De resultaten van de simulaties worden nader beschreven in bijlage D. In het algemeen kan worden gesteld dat het risico op het verlies van integriteit voor de door zout afgedekte pakketten zeer laag tot verwaarloosbaar is, ook bij dunne zoutpakketten van slechts 2 meter dik. Ook bij zoutsteenlagen van deze beperkte dikte geldt dat differentiële spanningen snel opgeheven worden door zoutkruip en is de spanningstoestand isotroop. Bij kleisteen of schalie seals is de kans op het fracken van de seal groter dan bij een zoutpakket, maar nog steeds klein. Door de dikte van de kleisteenlagen en de dikke sequentie gesteenten die zich tussen de seal en het door mens en milieu benutte grondwatervoerende pakket ligt, is de kans op migratie via die route onwaarschijnlijk. Ook ontbreekt een drijvende kracht (zoals een significant dichtheidsverschil) voor een dergelijke verplaatsing.

1) Limburg Tubbergen (reservoir) – De Lutte (seal)

Risico op verlies van seal integriteit is verwaarloosbaar door de grote dikte van De Lutte Kleisteen seal en het daarboven liggende Zechstein steenzout.

2) Rotliegend (reservoir) – Ten Boer en Zechstein (seal)

Risico op verlies van seal integriteit is verwaarloosbaar door de aanwezigheid van een dikke sealende laag van schalies afgedekt door Zechstein steenzout.

3) Zechstein Carbonaat (reservoir) – Zechstein Anhydriet (seal)

Risico op verlies van seal integriteit is verwaarloosbaar door de aanwezigheid van een dikke sealende laag van Zechstein steenzout.

4) Bunter Sandstone (reservoir) – Röt Claystone (seal)

Risico op verlies van seal integriteit is zeer laag door de aanwezigheid van meerdere verticaal gestapelde seals. Alleen de onderste ~5 m van de seal kan aangetast worden door een frack.

5A) Vlieland: De Lier Member (reservoir) – Holland Mergel (seal)

Risico op verlies van integriteit van de Holland Mergel seal dat ligt tussen het diepere gefracte oliereservoir en het ondiepere gasreservoir, is laag. Alleen de onderste meters van de seal kunnen aangetast worden door een frack.

5B) Vlieland: Friesland Member (reservoir) – Vlieland Claystone (seal)
 Risico op verlies van seal integriteit is laag door de aanwezigheid van meerdere verticaal gestapelde seals. Alleen de onderste ~15 m van de seal kan aangetast worden door een frack.

Sensitiviteitsanalyse

Het verschil in S_{hmin} -gradient tussen seal en reservoir is de belangrijkste parameter die de frack propagatie in en door de seal beïnvloedt. De gevoeligheid voor variaties in deze gradiënt is bestudeerd. Een twee meter dikke afsluitende steenzoutlaag is in het algemeen voldoende om verticale groei door de seal tegen te houden (Figuur 6.5). Links in Figuur 6.5 wordt het spanningsprofiel van de minimale spanning tegen de diepte weergegeven. Bovenin is de 2 m dikke zoutlaag zichtbaar met een relatief hoge minimale spanning, daaronder het zandsteenreservoir met een stress gradiënt die beduidend lager is, tenslotte het gesteente onder het reservoir met weer een hogere spanning. In de rechter twee figuren zijn een dwars en lengte profiel opgenomen met in kleur de derde dimensie (frackbreedte in cm).

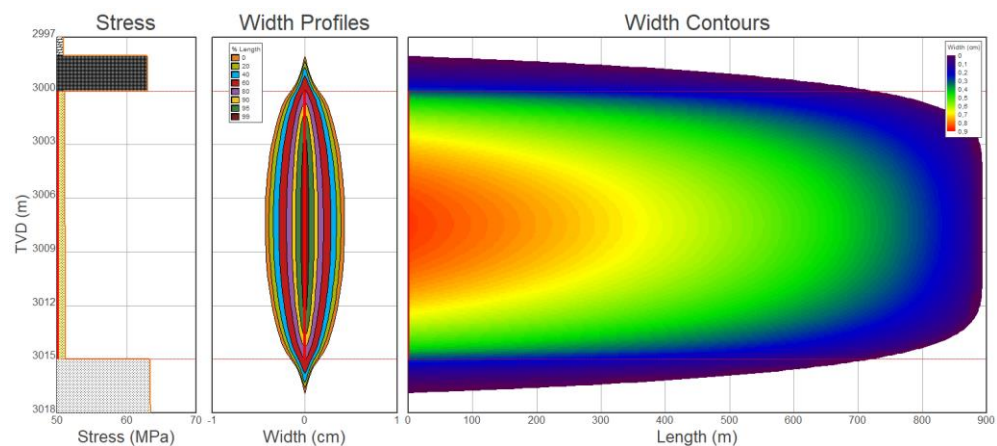
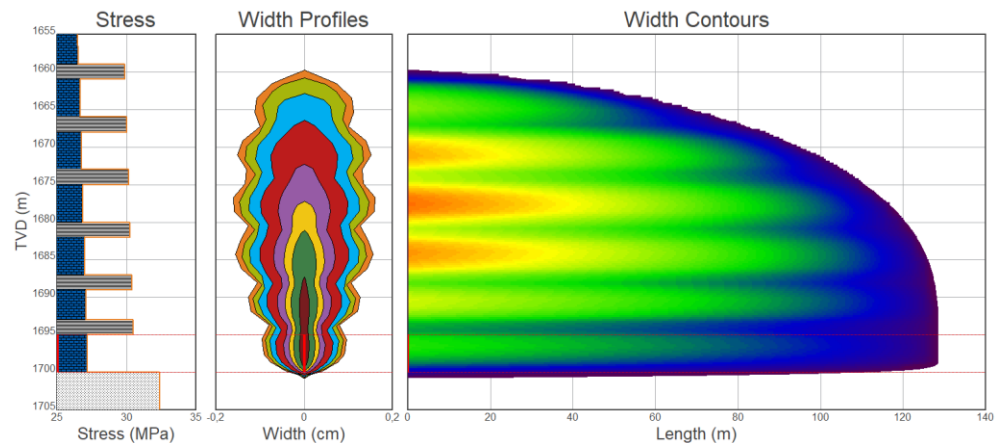


Fig 6.5 Resultaten MFract simulatie voor het scenario met dun zandsteen reservoir (15 meter) met daarboven een 2 meter dikke zoutlaag..

In het geval van meerdere dunne reservoirs en seals bestaand uit schalies (kleisteen) zou propagatie door de seal mogelijk kunnen zijn. Er is daarom ook gekeken naar het effect van de aanwezigheid van meerdere afsluitende lagen op de verticale propagatie van de frack. Hierbij is uitgegaan van een klein (2kPa/m) stress contrast tussen het reservoir en de seal, en van een hogere stressgradiënt in de seal dan in het reservoir. Er zijn verschillende modelruns gedaan (Bijlage D). In het geval van 2 m dikke lagen met een reservoir van 5 m ontstaat er een verticale propagatie van ongeveer 50 meter door de bovenliggende schalielagen (Figuur 6.5), de verticale groei stopt bij de zesde schalie.

In het geval van twee 2 m-dikke schalielagen en een dikker reservoir van 30 m, wordt frackpropagatie naar boven gestopt bij de tweede schalie laag (~60 m boven de basis van het reservoir) met een stress gradiënt in schalies die 2 kPa/m hoger is dan in het gefracte reservoir. Dit is een indicatie dat dunne lagen met een relatief klein verschil in S_{hmin} -gradient (bijv. binnen de natuurlijke variatie in schalies) t.o.v. het reservoirgesteente (grote ongecontroleerde) verticale propagatie te kunnen afremmen. (Een modelscenario zonder de schalielagen laat een verticale propagatie

van de frack van enkele honderden meters zien, terwijl in het scenario met schalielagen de propagatie beperkt blijft tot 40 meter). Deze bevindingen worden ondersteund door observaties van werkelijke fracks (dus geen modelstudies) zoals beschreven in de wetenschappelijke literatuur. Daaruit blijkt dat de hydraulische frack hoogte relatief beperkt blijft. Mechanismes die verticale propagatie beperken zijn onder andere complexe geologische gelaagdheid, verschil in gesteente-eigenschappen, de aanwezigheid van lagen met hoge permeabiliteit, de aanwezigheid van zwakke horizontale vlakken en de aanwezigheid van fractures. (Fisher and Warpinski, 2012; Chuprakov and Prioul, 2015).



Figuur 6.6 Resultaten MFract simulatie voor het scenario met afwisselend dunne 2 m dikke seals (schalies met stress gradiënt 18 kPa/m) en 5 m dikke reservoirs (generiek carbonaat reservoir met stress gradiënt 16 kPa/m). De minimale spanningen met de diepte (links), frackdikte (midden) en fracklengte en -hoogte (rechts).

6.4 Conclusies

Het risico op verlies van integriteit van afsluitende lagen van gefracte reservoirs in Nederland op het vaste land is (zeer) laag. Deze conclusie is tot stand gekomen door middel van uitgebreide documentanalyse en door het modelleren van frackoperaties in verschillende reservoir-seal paren.

Op basis van de gesteente-eigenschappen van steenzout (isotrope spanningstoestand) en sensitiviteitsanalyse is het risico op verlies van integriteit van de afsluitende lagen verwaarloosbaar. Ongeveer de helft van de frack-operaties in Nederland is uitgevoerd in een reservoir onder het Zechstein zout.

Het uitvoeren van een frackoperatie in een gedepleteerd reservoir vermindert de kans op propagatie van een frack in het bovenliggende afsluitende laag aanzienlijk. Dit geldt voor bijna 80% van de putten die niet door het Zechstein Zout maar door een kleisteen worden afgedekt.

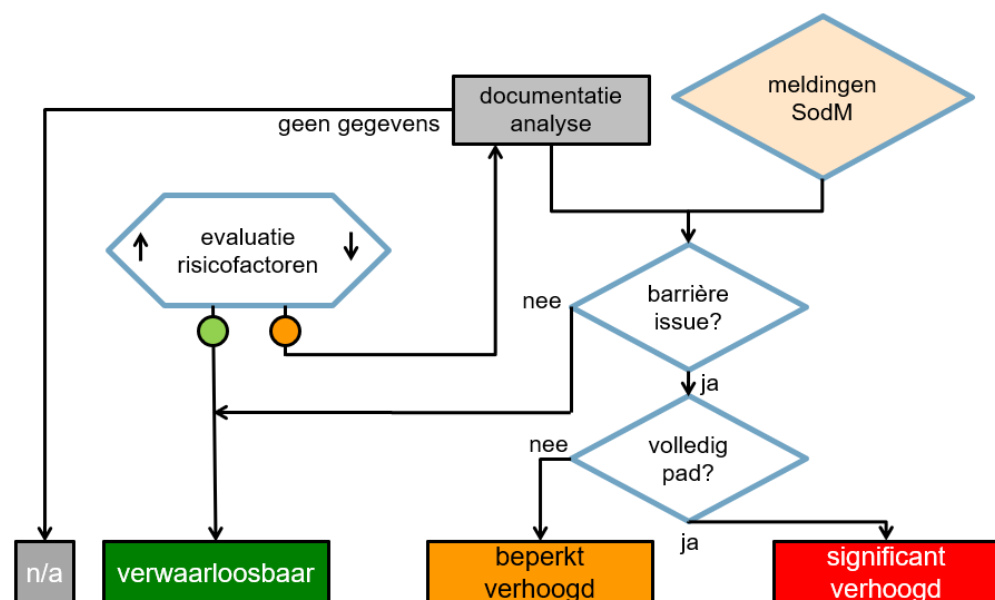
Voor de gefracte reservoirs die boven de Zechstein evaporieten zijn afgezet (e.g. Bunter en Vlieland reservoirs) geldt op basis van de generieke modelleerstudie dat aantasting van enkele meters van de seal mogelijk is, maar dat bij de representatieve diktes de uiteindelijke seal integriteit in stand blijft. Ook voor deze reservoirs geldt dan ook dat het risico op verlies van integriteit van de seal laag is.

Gezien de diepteligging van de reservoirs (minimaal 950 m tot 4000 m) zijn er behalve de direct boven een reservoir gelegen afsluitende pakketten, nog honderden tot enkele duizenden meters dikke gesteente pakketten aanwezig tussen de reservoirs en het door mens en milieu benutte grondwater. Binnen deze pakketten komen nog verschillende ondoordringbare lagen voor (secundaire seals).

7 Verlies van integriteit van de put

7.1 Screeningsmethodiek

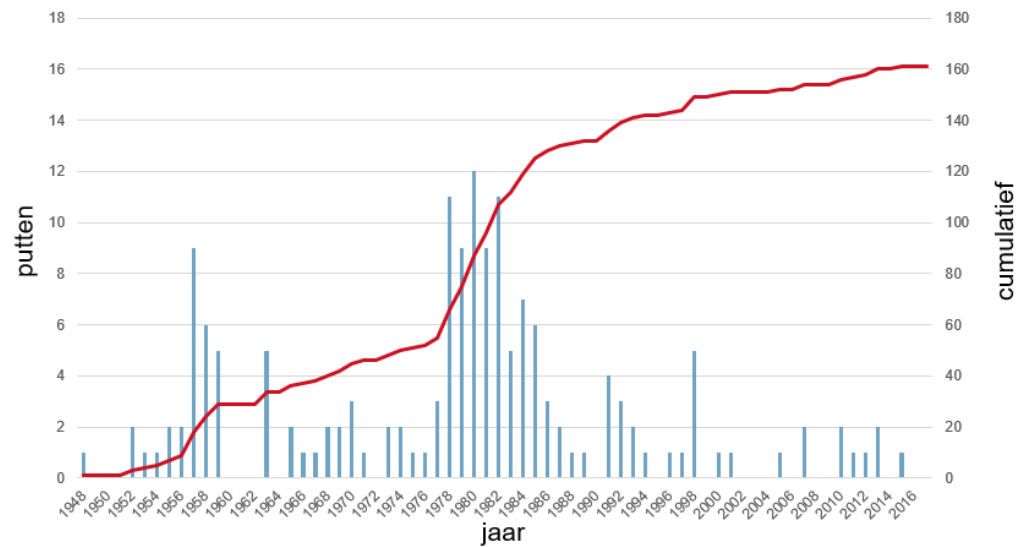
Teneinde vast te kunnen stellen of er zich in het verleden gevallen hebben voorgedaan waarin een frack heeft geleid tot aantasting van de integriteit van de put is gekeken naar gedocumenteerde putproblemen in alle putten die binnen de scope van deze screening vallen (Figuur 7.1). Voor ieder voorkomend geval is vervolgens bekeken of een frackoperatie een mogelijke oorzaak zou kunnen zijn en of het putprobleem daadwerkelijk heeft geleid (of heeft kunnen leiden) tot verlies van de putintegriteit. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen gevallen waarin een putprobleem is ondervangen door een overlappende barrière en gevallen waarin een volledig migratiepad (via of buitenom de put) naar de oppervlakte of de ondiepe ondergrond is veroorzaakt.



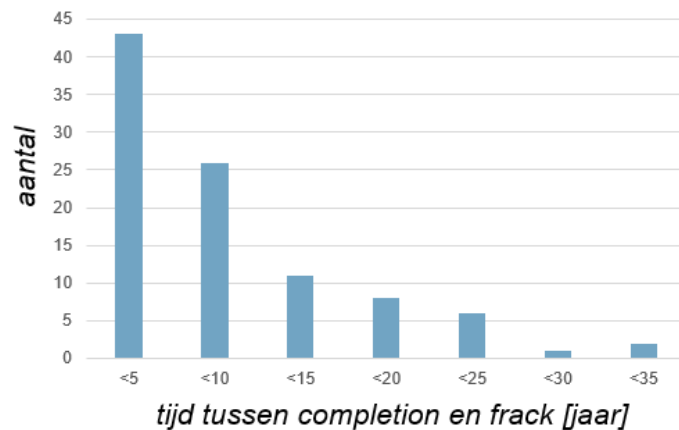
Figuur 7.1 Samenvattend stroomschema voor de risico-analyse van verlies van integriteit van de put.

Het digitale archiefsysteem van meldingen aan SodM gaat wegens implementatie van de Archiefwet niet verder terug dan 2005. Voor de vastlegging van eerdere putproblemen is gekeken naar het papieren archief van SodM en naar de door de puteigenaren geleverde documentatie. Hiervan is de volledigheid niet met zekerheid vast te stellen. Daar waar geen documentatie (meer) aanwezig is berust de risico-inschatting op contextuele indicatoren die relevant worden geacht voor de integriteit van de put (Figuur 7.1). Allereerst wordt gekeken naar de ouderdom van de put (Figuur 7.2), daar de techniek om een put te completeren mettertijd is verbeterd (King & King, 2013). Daarnaast weegt het tijdsverschil tussen het completeren van de put en het zetten van de frack(s) mee (Figuur 7.3), omdat veroudering de putintegriteit zou kunnen hebben aangetast. Het meermaals fracken van dezelfde put (Figuur 7.4) kan de integriteit verzwakken door herhaalde uitzetting en contractie als gevolg van grote drukverschillen. Putten die als 'monobore' zijn uitgevoerd, putten zonder 'packer' en putten waarbij een frack is gezet in een 'open hole' sectie krijgen ook een

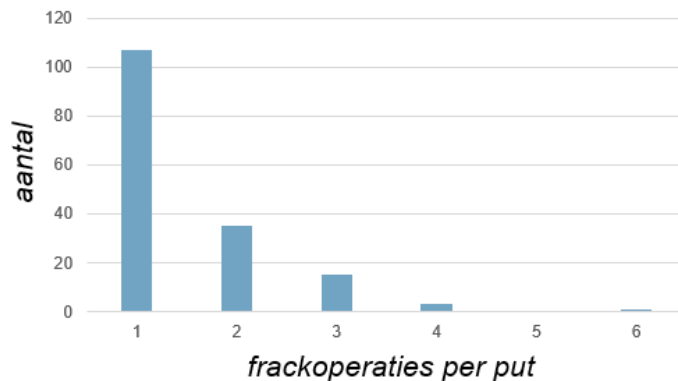
hogere risico-indicatie toegewezen. Het succesvol testen van de putintegriteit voorafgaand aan en na afloop van een frackoperatie wordt juist gezien als een risicomitigatie, waarbij de integriteit van de put expliciet wordt beproefd onder hoge druk. De hier benoemde criteria worden primair gebruikt om de putten te rangschikken ten behoeve van prioriteitstelling om tot een gedetailleerde documentatie-analyse te komen.



Figuur 7.2 Absolute ouderdom van de putten (jaar van completering) in blauw, cumulatief aantal gefracte putten in rood.



Figuur 7.3 Relatieve ouderdom van de put t.o.v. het moment van fracken (zonder hercompletering in overweging te nemen).



Figuur 7.4 Histogram van het aantal fracks per put.

7.2 Bevindingen

Een put is gewoonlijk uitgevoerd met meerdere barrières (Figuur 7.5), te weten:

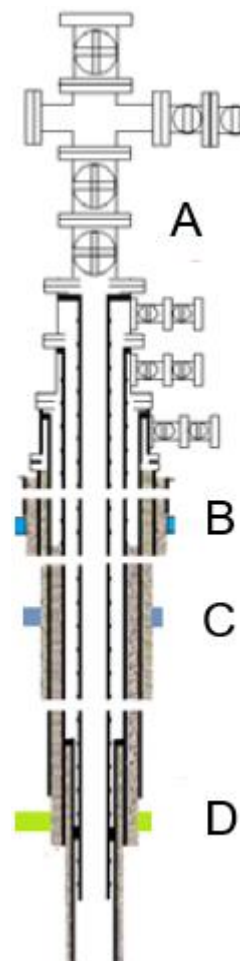
- ~2 barrières aan de oppervlakte ('wellhead')
- ~2-4 barrières in de ondiepe ondergrond
- ~2 barrières halverwege de put
- ≥ 1 barrières op reservoirdiepte

Deze barrières vormen overlappende veiligheidsnetten voor het afsluiten van een migratiepad van het reservoir naar de oppervlakte of de ondiepe ondergrond, anders dan door de putverbuizing zelf. Problemen met de putintegriteit betreffen in het algemeen slechts één of enkele van deze barrières, waardoor de integriteit van de afsluiting gewaarborgd blijft (King & King, 2013).

In negen putten is voorafgaand aan een frackoperatie vastgesteld dat er problemen met de putintegriteit bestonden. In zes gevallen betrof dat het putcement dat in verslechterde staat verkeerde ('poor cement' of 'imperfect cement'). In één put is een lekkende productieverbuizing geconstateerd. In twee putten ging het om een lek langs een pakking ('packer'). Al deze putproblemen zijn voorafgaand aan de frackactiviteiten verholpen, waarna de putintegriteit voorafgaand aan de frackactiviteiten is getest.

Voor tien gefrackte putten (6% van alle putten binnen de scope van deze screening; allen van voor 1985) bestaat documentatie omtrent problemen met de putintegriteit waarvan niet kan worden uitgesloten dat die mogelijk zijn veroorzaakt door een frackoperatie, maar die ook een andere oorzaak kunnen hebben. Het gaat daarbij om problemen zoals een verhoogde druk in de annulus tussen de verbuizingen en/of het boorgat of beschadigde afsluiters. In geen van deze gevallen heeft dit geleid tot verlies van de putintegriteit en in alle gevallen heeft de putoegenaar (onder toezicht van SodM) een tijdige en adequate oplossing voor het probleem geïmplementeerd. Er zijn op basis van de documentatieanalyse geen aanwijzingen gevonden dat putten die pas vele jaren na hun aanleg, of meerdere malen worden gefrackt, vaker integriteitsproblemen vertonen dan putten die direct na aanleg of slechts eenmalig worden gefrackt. Er zijn in geen geval integriteitsproblemen aan het licht gekomen voor frackoperaties waarbij voorafgaand aan het uitvoeren van de frack integriteits- of leakoff testen zijn uitgevoerd.

De voornoemde problemen met de putintegriteit zijn in geen geval direct te herleiden naar de uitvoering van een frack. Ook wijkt het aandeel gefrackte probleempotten niet significant af van de norm (Vignes and Aadnøy, 2008; Davies et al., 2014; Ingraffea et al., 2014). Problemen met de integriteit van een put kunnen diverse oorzaken (anders dan fracking) hebben, zoals beschadiging van putelementen tijdens het completeren van de put, slechte (of verslechterde) kwaliteit van het cement tussen de verbuizing en het gesteente, corrosie van de verbuizingen en slijtage aan kleppen en afdichters ('packers'). Daarnaast openbaren problemen met de integriteit van een put zich mogelijk pas enige tijd nadat ze veroorzaakt zijn. De beschikbare gegevens en de aard van problemen met de putintegriteit staan niet toe een eenduidige oorzaak aan te wijzen.



Figuur 7.5 Schematische weergave van het gebruikelijke putontwerp met meerdere barrières. (A) barrières aan de oppervlakte (kleppen en afsluiters van het spuitkruis), (B) barrières in de ondiepe ondergrond (putcement en pakkingen tussen de verbuizingen en het boorgat op aquiferniveau), (C) barrières halverwege de put (putcement en pakkingen tussen de verbuizingen en het boorgat ter hoogte van ondoorlatende lagen en verbuizingsovergangen) en (D) barrières op reservoirdiepte (putcement en pakkingen tussen de verbuizingen en het boorgat op productiediepte). De productieverbuizing is de binnenste buis. Naar King & King (2013).

Problemen met de integriteit van een put zijn niet in alle gevallen zichtbaar aan de oppervlakte. Zo kan er zich een zogenaamde micro-annulus vormen tussen de

verbuizing en het cement of het cement en het boorgat, zou een frack door het boorgatcement kunnen propageren en kan een zuurfrack het cement dichtbij het reservoirinterval aantasten. Het is gezien de grote diepte van de fracks onwaarschijnlijk dat hiermee een migratiepad wordt gecreëerd naar de oppervlakte of de ondiepe ondergrond (aquifers) daar zich in het bovenliggende gesteentepakket meerdere afsluitende lagen bevinden. Wel zou kruisstroming (zogenaamde 'cross-flow') tussen verschillende doorlatende lagen kunnen optreden in of vlak boven het reservoir. Migratie treedt overigens alleen op als er een drijvende kracht is die het transport van stoffen mogelijk maakt. Voor gassen is dat het verschil in dichtheid met het formatiewater en eventuele reservoirdruk, maar voor frackvloeistof of formatiewater is die drijvende kracht na het wegvallen van de druk die bij het fracken wordt angewend niet meer aanwezig. De kans dat frackvloeistof langs een migratiepad zal lekken is derhalve verwaarloosbaar. Bovendien zou de concentratie (schadelijke) stoffen door de migratieafstand en diffusie sterk afnemen.

7.3 Conclusies

In geen geval is op basis van de beschikbare gegevens vastgesteld dat de integriteit van een put als gevolg van een frackoperatie is aangetast en er zich een migratiepad heeft gevormd naar de oppervlakte of de ondiepe ondergrond. Wel zijn er in enkele gevallen problemen vastgesteld met onderdelen van putten die in het verleden één of meerdere frackoperaties hebben ondergaan. Het is niet mogelijk een eenduidige oorzaak voor deze deelproblemen aan te wijzen. Een frackoperatie kan daarom als aanleiding niet worden uitgesloten.

Problemen met onderdelen van de putintegriteit betreffen in voorkomende gevallen slechts één of enkele van de ingebouwde, elkaar overlappende barrières, waardoor de integriteit van de afsluiting over het geheel gewaarborgd blijft (King & King, 2013). Het aantal barrières in een put is maximaal in het ondiepe traject, daar waar de consequenties voor lekkage het grootst zouden zijn. Behalve gedurende het verhoogde drukregime tijdens de frackoperatie zelf, ontbreekt een drijvende kracht om de frackvloeistof naar het oppervlakte te bewegen. Migratie van aardgas zou bij een volledige aantasting (verlies van alle overlappende barrières) van putintegriteit wel op kunnen treden.

8 Ongewenste geochemische interacties

Ongewenste geochemische interacties kunnen optreden bij fracken, veroorzaakt door het gebruik van de diverse chemicaliën. Bij het fracken wordt een frackvloeistof gebruikt die voor ca 98 % uit water en ca. 2% uit toegevoegde chemicaliën (m.u.v. proppants, zuur en zouten) bestaat. De chemicaliën hebben elk een functie om de frackoperatie efficiënt en effectief te laten verlopen. De volgende effecten zijn in algemene zin ongewenst waarbij de intensiteit waarin deze effecten optreden bepaalt of het als problematisch (en dus als risico) moet worden beschouwd:

- oplossen van reservoirgesteente (anders dan zoals gewenst) of afsluitende laag
- aantasting van de put (casing, cement)
- mobilisatie van zware metalen
- mobilisatie van zogenaamd *naturally occurring radioactive material* (NORM)
- vrijkomen van extra H₂S.

In het onderhavige hoofdstuk wordt eerst de screeningmethodiek beschreven en wordt een beschrijving gegeven van de frackvloeistoffen, die in Nederland zijn aangewend. Vervolgens worden de geochemische interacties in het reservoir en het afsluitende gesteente beschouwd die belangrijk zijn in relatie milieurisico's en hiermee samenhangend het mobiliseren van gevaarlijke stoffen. Een praktische beschouwing is opgesteld aan de hand van beschikbare informatie omtrent de individuele frackoperaties zoals die in Nederland zijn uitgevoerd. Voor algemene beschouwingen over de risico's wordt verwezen naar (inter)nationale literatuur.

8.1 Screeningmethodiek

Diverse documenten zijn bestudeerd die via SodM beschikbaar gesteld zijn door de betrokken operators (NAM en Vermilion) en betrekking hebben op de (geo)chemische aspecten van de frackoperaties. Het gaat hierbij om rapporten waarin het werkplan beschreven wordt of rapporten waarin de frackoperatie geëvalueerd wordt. In aanvulling is door TNO bij SodM opgevraagd bij welke winlocaties low specific activity afval (LSA-afval) geproduceerd wordt doordat NORM meekomt met de winning van met name aardgas. Deze winlocaties zijn vergeleken met de putlocaties waar frackoperaties zijn uitgevoerd. Ook is een excel-file beschikbaar gesteld met radioactiviteitsmetingen (door de operators) gerelateerd aan frack werkzaamheden samen met enkele rapportages van laboratorium analyses van radioactiviteit van monstermateriaal. De excel-file bevat metingen over 9 kalenderjaren in de periode van 1995 tot 2016. Verder zijn twee databestanden bestudeerd van monitoringsgegevens zoals beschikbaar gesteld door NAM. Het gaat hier om chemische analyses van productiewater zoals bemonsterd voor, tijdens en na een frackoperatie. De betreffende periode was 1954-2016. Tenslotte is algemene (inter)nationale literatuur geconsulteerd zoals geciteerd.

8.2 Bevindingen

Twee types frackoperaties zijn onderscheiden in de inventarisatie: proppant fracks en acid fracks. Bij het eerste worden proppants gebruikt om de scheuren na afloop van de frackoperatie open te houden voor verhoging van de permeabiliteit (Economides & Nolte, 2000). Bij het laatste wordt, na het creëren van de fracks, zuur

onder relatief hoge druk in scheuren geperst om mineralen (met name kalk) op te lossen en zo de porositeit en hieraan gerelateerd de permeabiliteit te verhogen. Voor het laatste is er een verschil met het schoonspoelen (clean out) van een put waarbij ook zuur gebruikt wordt maar zonder verhoogde druk om het gesteente te breken. Het doel van de laatste techniek is om ongewenste mineralen nabij de put op te lossen waaronder bijvoorbeeld achtergebleven boorspoeling. Van de 245 onshore verrichte frackoperaties in Nederland waren er 180 proppant fracks, 63 acid stimulaties en 2 proppant + acid fracks. Frackoperaties zijn niet alleen toegepast op winningsputten maar ook op injectieputten (SCH-580 en DAL-08) voor productiewater. Dit productiewater kan ook "spent acid" van een acid frackoperatie bevatten (uitgewerkt zuur dat is geneutraliseerd en omgezet is naar inerte materialen) dat via zo'n put wordt verwerkt.

In de bijlage E is een overzicht opgenomen van de belangrijkste types van toevoegingen aan een frackvloeistof. In het totaal is dit in het algemeen minder dan 2% van de gehele frackvloeistof. Naast de karakterisering wordt tevens aangegeven wat de meest gebruikte stoffen zijn en wat hun functie is. In de volgende paragraaf wordt een aantal voorbeelden gegeven van recent in Nederland gebruikte frackvloeistof samenstellingen.

Proppant fracks

De proppant frackoperaties zijn vanaf 1954 verspreid over Nederland, uitgevoerd in diverse reservoirs (zie Hoofdstuk 4).

Volgens de beschikbaar gestelde informatie zijn de volgende oplossingen meer of minder frequent als proppant frackvloeistof gebruikt:

- YF-serie met o.a. YF135HTD, YF-130, YFG04
- 10% NaCl brine (zout) met toevoegingen
- ThermaFRAC35
- Petrogel op basis van kerosine
- SpectraFrac G4000
- MY-T-OIL III (= YFGO II?)

Het betreft hier mengsels die volgens een bepaalde standaard bestaan uit een combinatie van actieve chemicaliën, waarbij deze chemicaliën weer aangeduid worden met eigen codes (zie Tabel 8.1). Volgens opgave van Vermilion zijn YF135HTD en YFG04 (in de laatste 30 jaar) het meest gebruikt. De hoeveelheden bedroegen enkele tientallen tot enkele honderden m³ frackvloeistof per frackoperatie. De frackvloeistoffen waren op basis van kerosine of diesel (vooral in de beginperiode van het fracken) dan wel water met chloride-zout (NaCl of KCl). Het laatste dient om een brijn (zout water) te verkrijgen en zwelling van kleimineralen te voorkomen. In het totaal maken de chemische toevoegingen niet meer dan 2% van de totale frack vloeistof uit.

Andere chemicaliën die ook bij YF-130 (vloeistof op waterbasis voor kalkreservoir) worden gebruikt staan in Tabel 8.2. Bij een kalkreservoir wordt met 20 kg/m³ veel minder *clay stabiliser* gebruikt wat logisch is gelet op het geringe percentage klei in kalksteen.

Tabel 8.1 Functie van componenten in de YF135HTD frackvloeistof (volgens productinformatie van Schlumberger).

Code	Functie	Hoeveelheid
M275	microbiocide	0,054 kg/m ³
M117	clay stabiliser	186,6 kg/m ³
J564	green guar slurry	10,7 L/m ³
F103	flowback aid	1,0 L/m ³
L010	crosslinker	0,6 L/m ³
M002	caustic soda flake	1,2 kg/m ³
J480	delay agent	2,4 – 3,6 kg/m ³
J450 (boven 100°C)	high temperature stabiliser	2,0 L/m ³

Tabel 8.2 Voorbeelden van andere chemicaliën die gebruikt zijn in proppant frackvloeistoffen (volgens productinformatie van Schlumberger Dowell en BJ service).

Code	Functie	Hoeveelheid
<i>YF-130 (waterbasis; Schlumberger Dowell)</i>		
D047	de-foamer	0,25 L/m ³
F075	surfactant	1 L/m ³
J475/J218	enc. breaker/breaker	0,5/0,6 kg/m ³
J318	breaker aid	1 L/m ³
J221	activator	6,0 L/m ³
J424	gelling agent	3,6 kg/m ³
<i>X-Link Gel (waterbasis; BJ service)</i>		
linear gel	2% KCl + guar polymer	20 kg KCl/m ³
GW-4AFG	surfactant	5,0 kg/m ³
BF-10LE	acetic acid	0,5 L/m ³
D4GB	surfactant	2,00 L/m ³
BF-7L	buffer	8 L/m ³
XLW-56	crosslinker	4 L/m ³
GBW-5	breaker (0,012 kg/m ³ ammonium persulfaat)	1,5 L/m ³

Tabel 8.3 laat de samenvatting zien van het geplande chemicaliën gebruik voor 7 frackoperaties uitgevoerd in de afgelopen 6 jaar (factsheets maken deel uit van de beschikbare dataset van de operators). Wat opvalt is de ruime marge tussen minimum en maximum. Verder geldt dat de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in lage concentratie in de frackvloeistof voorkomt. Absoluut gezien kan het echter om enkele duizenden kilo's gaan. Tenslotte wordt vloeibare stikstof (non-hazardous substances) ook herhaaldelijk toegepast.

Bovenstaande tabel bevestigt, dat de frack chemicaliën tezamen niet meer dan enkele procenten uitmaken van de frackvloeistof met uitzondering van de proppants, het zuur en de zouten (b.v. clay stabiliser - KCl). De laatste twee kunnen meer dan 10% van de frackvloeistof uitmaken.

Tabel 8.3 Samenvatting van chemische informatie over gepland gebruik van chemicaliën bij 7 recente frackoperaties (2012-heden). De percentages verwijzen naar de totale hoeveelheid frackvloeistof. (= grote hoeveelheid vloeibaar stikstof).

Onderwerp	minimum	maximum
total product weight (ton)	255	1485
proppant (%)	4,1	10,3
sum non-hazardous substances (%)	0,736	23,6
sum hazardous substances (%)	0,483	0,701
sum toxic substances (%)	0,000	0,017
sum harmful substances (%)	0,170	0,688
sum corrosive substances (%)	0,004	0,126
Total amount of added substances (%)	1,393	1,532

Acid fracks

De 63 acid fracks zijn verricht op 39 putten (incl. sidetracks) vanaf 1969 tot en met 2011 (Figuur 8.1). 24 van deze putten stonden in het Coevorden gasveld en het naastgelegen Dalen gasveld. Enkele putten hebben 2 of 3 keer een acid behandeling ondergaan. De putten COV-47 en COV-49 hebben respectievelijk 8 en 6 keer een acid behandeling gekregen. Het betreft hier geen acid fracks maar een relatief beperkte hoeveelheid zuur (meestal ca. 30 m³) die iets boven formatiedruk wordt ingebracht. Het zuur penetreert zodoende in de formatie zonder dat er fracks ontstaan. Het zuur lost materiaal op dat de permeabiliteit na het boren of na een periode van productie heeft verstoord.

In de meeste gevallen is de acid frackoperatie toegepast op het kalksteenreservoir van de Zechstein 2 Carbonaat (ZE2C) en éénmalig op de Zechstein3 Carbonaat (ZE3C). Van de klastische reservoirs (zandsteen en kleisteen) met veelal van nature aanwezig calciet cement, gaat het meestal om een zuurbehandeling zonder dat er wordt gefracked. Zo is de Tubbergen Formatie (DCDT) herhaaldelijk met zuur behandeld en de Werkendam Member van de Altena Groep (ATWDM), en de De Lutte Formatie (DCHL) beide éénmalig.

Bij de deze operaties, bedroeg het geïnjecteerde volume meestal enkele tientallen m³ (acid treatments) tot maximaal een paar honderd m³ zuur (acid fracks) gevolgd door injectie van hooguit enkele honderden m³ brinwater of zoet water, waarna een deel (geen percentage voor Nederlandse situatie bekend, dit kan van put tot put sterk variëren) van de frack vloeistof weer terug geproduceerd is.

Bij acid fracks wordt geconcentreerd zoutzuur gebruikt, meestal 28% HCl (ofwel 9,2 mol HCl/L), waaraan inhibitoren toegevoegd zijn om neerslag van secundaire mineralen te voorkomen of te beperken. De injectie van het zuur kan vooraf gegaan worden door injectie van een gel-oplossing op waterbasis (zoals YF4G of US-40 als handelsnamen) om oppervlaktespanning en wrijving te verminderen.

Als 28% HCl als frackvloeistof gebruikt wordt, kan stoichiometrisch (de mate waarin verbindingen met elkaar reageren) 9,2 mol CaCO₃/L oplossen. Voor een volume van 40 m³ aan frackvloeistof correspondeert dit met 36,8 ton kalk met een volume van 13,6 m³ (zonder rekening te houden met porositeit). Dit volume is gering ten opzichte van het reservoirvolume dat door de frack wordt beïnvloed. Het is onwaarschijnlijk dat dit de (mechanische) integriteit van een reservoir aantast.



Figuur 8.1 Aantal acid fracks en treatments per jaar uitgesplitst naar reservoirniveau (stratigrafische eenheid)

In plaats van alleen met HCl wordt soms ook een combinatie van HCl en HF gebruikt (ook wel mud acid genoemd) om de productiviteit van een put te vergroten. Waterstoffluoride waarin ook kwartzand oplost, is een veel agressiever zuur dan HCl. De put DAL-14 heeft in 1986 een acid behandeling ondergaan met een oplossing van 12% HCl en 3% HF. De put COV-47 heeft in 1987 meerdere en vergelijkbare acid stimulations ondergaan, waarbij bijvoorbeeld eerst 3.5 m³ 15% HCl is ingebracht en vervolgens 9,5 m³ 12% HCl/3%HF in de formatie is gepompt.

Aantasting van de put (casing, cement)

Bij een acid frack zal de zure frackvloeistof ter hoogte van het reservoir, daar waar de casing geperforeerd is, ook in contact komen met het cement van de put. Chemische interactie tussen het cement en het zuur zal ook hier plaats kunnen vinden. Als de cementering van de ruimte tussen de casing en het gesteente niet goed afsluit, zou zuur in het cement kunnen dringen en het cement kunnen aantasten in plaats van in het reservoir te stromen. De hoeveelheid mineralen die kan oplossen in een zure frackvloeistof is dan niet verwaarloosbaar ten opzichte van de hoeveelheid aanwezig cement (een cementafsluiting van 100 m lang, rondom een casing heeft een totaal cementvolume van ca. 20 m³). Hier is dus sprake van een potentieel risico. Er zijn op basis van de geraadpleegde documenten geen aanwijzingen gevonden dat dit zich ooit in Nederland heeft voorgedaan. Het risico kan worden verkleind door het gebruik van het juiste cement en het testen van de integriteit van de cement voorafgaande aan de frackoperatie (b.v. cement bond log, inflow test). De standaard meetmethoden zullen echter niet alle mogelijke manieren van lekkage langs of door het cement kunnen detecteren.

Ongewenste aantasting van de casing is niet vermeld in de onderzochte rapporten. Het risico van corrosie kan worden verkleind door de staalkeuze. Bovendien wordt er

ter bescherming van de casing normaal gesproken een corrosie-inhibitor aan de frackvloeistof toegevoegd.

Chemische monitoring tijdens frackoperaties

Ca. 400 analyses van productiewater voor, tijdens en na de frackoperatie voor ruim 60 putten zijn beschikbaar. Het gaat zowel om proppant fracks als acid fracks. De analyses betreffen vooral Cl, Na, K concentraties en ook frequent die van Ca, Mg, HCO₃, Sr en Ba. Soms zijn enkele natuurlijke organische verbindingen geanalyseerd. Hetzelfde geldt voor de sporenelementen Ba, Pb, Li, Hg en Zn. De pH is lang niet altijd gemeten. De pH-waarde was na een acid frack geregeld beneden de 4 met een laagste waarde van 1 en bij de proppant fracks altijd boven 4,5.

Herhaaldelijk waren de Zn- en Pb-concentraties hoog (> 1000 µg/L) maar het is onduidelijk of dit afwijkt van de normale situatie, d.w.z. zonder fracking. Het betreffen hier analyses geassocieerd met proppant fracks, waarbij dus geen pH-verlaging is opgetreden. De hoogste Hg-concentratie van 350 µg/L was wel geassocieerd met een acid frackoperatie.

De documentatie bevat geen analyses van organische verbindingen die typisch gebruikt worden als chemische stof bij frackoperaties.

De aantallen monsters per frackoperatie zijn te gering om inzicht te krijgen in de (geo)chemische interacties tussen de frackvloeistof en het reservoir. De uitgevoerde monitoring geeft enerzijds geen aanwijzing dat ongewenste geochemische interacties zijn opgetreden en is anderzijds te summier om eenduidige conclusies omtrent aantoonbare technische of milieuhygiënische effecten mogelijk te maken.

Oplossen van steenzout

Bij het gebruik van frackvloeistof op waterbasis zou steenzout kunnen oplossen als de frackvloeistof hiermee in aanraking komt. Omdat de frackvloeistof op waterbasis meestal Cl bevatten in hoge concentraties als zoutzuur (10 M HCl geeft 350 g Cl/l, ofwel meer dan wat kan oplossen als haliet en hoger dan de zoutste reservoirs in Nederland (200 g/l) of als toegevoegd zout (NaCl of KCl) is de hoeveelheid steenzout die het op diepte kan oplossen in hoge mate beperkt. De hoeveelheid frackvloeistof bij voorkomende frackoperaties bedroeg ten hoogste enkele honderden m³. Ter vergelijking; met een maximale oplosbaarheid van 200 g Cl/l (Griffioen et al., 2016), kan er bij een volume van 200 m³ zoet water maximaal 40.000 kg Cl oplossen, ofwel 66 ton steenzout met een volume van ruim 30 m³ (uitgaande van 0% porositeit). Omdat in een frackvloeistof zoutzuur of Cl-zouten gebruikt worden zal het maximaal oplosbare hoeveelheid zout wezenlijk minder zijn. Bij acid fracks wordt zoet water geïnjecteerd nadat de zuurbehandeling is beëindigd. Dit zou dus aanleiding kunnen geven tot meer zoutoplossing. De hoeveelheid steenzout die kan oplossen bij een frackoperatie is gering voor de situaties die zich hebben voorgedaan in Nederland. Het is onwaarschijnlijk dat dit de integriteit van een zoutlaag als afsluitende laag kan aantasten.

Mobilisatie van zware metalen en NORM

De lage pH van acid frackvloeistof geeft aanleiding tot het oplossen van mineralen, met name carbonaten bij gebruik van HCl door de relatief snelle oploskinetiek van deze groep mineralen. Bij gebruik van HF gaan ook andere mineralen goed in oplossing waaronder Si-houdende mineralen. Bij het oplossen van carbonaten

kunnen sporenelementen als Sr en Ba vrijkomen en meer algemeen kunnen zware metalen gemobiliseerd worden bij lage pH, waarbij complexatie (het vormen van een chemische verbinding) in oplossing met Cl en opgelost organisch materiaal (DOC) de mobilisatie verhoogt.

Hoge tot zeer hoge concentraties aan Pb, Zn en Cu doen zich van nature voor in formatiewater van Nederlandse olie- en gasreservoirs (Carpenter, 1989; Griffioen et al., 2016). De hoogste concentraties zijn gevonden in de redbed sandstones zoals die ook voorkomen in de Boven-Rotliegend Groep (Carpenter, 1989; Kharaka & Hanor, 2004, <https://www.dinoloket.nl/upper-rotliegend-group-ro>). Hoewel deze reservoirs in Nederland herhaaldelijk zijn gefracked (zie Hoofdstuk 4), betrof dit proppant fracks en geen acid fracks, waardoor hier geen sprake is van ongewenste chemische reacties. In de beschikbare documentatie zijn geen gegevens omtrent de aanwezigheid van zware mineralen in de Carbonaatreservoirs aanwezig. Zodoende is er geen aanwijzing of dit in de Nederlandse ondergrond een probleem vormt.

Bij meerdere olie- en gaswinningen in Nederland komt zogenaamde NORM (naturally occurring radioactive material) vrij, dat als low specific activity afval (LSA-afval) verwerkt wordt. De belangrijkste radio-isotopen van NORM bij Nederlandse olie- en gasvelden zijn lood-210, radium-226 en het gasvormige radon-222 (Schmidt, 2000). Een vergelijking is gemaakt tussen de putten waar frackoperaties hebben plaatsgevonden en de bijbehorende winlocaties waarbij LSA-afval verwerkt wordt: LSA-afval wordt per winlocatie verwerkt en niet per put. Van de 86 mijnbouwlocaties met een LSA kwalificatie zijn er 19 waarop zich in totaal 32 gefrackede putten bevinden waarbij (mogelijk) NORM als LSA-afval vrijkomt. Bij 8 van deze putten is een acid frackoperatie gedaan en bij 27 één of meerdere proppant frackoperaties.

Omdat er LSA locaties zijn met zowel gefrackede als ongefrackede putten blijkt het fracken geen voorwaarde voor het mobiliseren van NORM. Hoewel een acid frack of acid behandeling de kans op het vrijkomen van NORM vergroot is het uit de beschikbare documenten niet op te maken of dit daadwerkelijk het geval is geweest. Het is mogelijk dat de LSA kwalificatie al voor het uitvoeren van de frack aan de betreffende mijnbouwlocatie was toegewezen op basis van reeds bestaande gasproductie, hetgeen plausibel is gezien de 67 LSA locaties waar niet is gefracked. Er zijn geen nulmeting beschikbaar van vóór het fracken.

Circa 250 waarnemingen zijn beschikbaar omtrent metingen van radioactiviteit aan installatieonderdelen in gebruik of aanwezig bij frackoperaties uitgevoerd op NAM-locaties. Het betreft metingen over de periode 1995-2016. Als grenswaarde wordt een gemeten waarde aan een onderdeel gesteld die 2 keer hoger ligt dan de achtergrondwaarde. Als die wordt overschreden, dient in overleg met de stralings-beschermingsdienst bepaald te worden wat met het besmette materiaal moet gebeuren. In 54 gevallen was sprake van een overschrijding van de achtergrondwaarde met een factor tussen 2,1 en 28,6. De aard van de overschrijding is op basis van de beschikbare informatie niet altijd duidelijk: geregeld wordt een overschrijding gerapporteerd voor proppant waarbij het ook gaat om ongebruikte proppant of nulmeting. Dit suggereert dat het hier niet gaat om proppant die geïnjecteerd is geweest, maar dat het om reeds aanwezige NORM uit de ondergrond gaat.

Zeven gammaspectrometrische analyses zijn beschikbaar van sludge of solids (incl. proppant), een modderachtige substantie. Voor 6 van deze monsters zijn de waarden voor de gerapporteerde radio-isotopen (Ra-226, Pb-210, Ra-228, Th-228 en indicatief Pb-214, Bi-214 en eventueel K-40) beneden de vrijstellingwaarde voor de activiteitsconcentratie in matige hoeveelheden van elk materiaal (Staatsblad 404, 2017). Bij één monster ligt de gemeten activiteit voor Ra binnen een factor 2 van deze vrijstellingswaarde en voor Th binnen een factor 10.

De conclusie is dat (laag-)radioactieve besmetting van apparatuur en andere materialen, incl. proppants, is opgetreden door straling afkomstig uit natuurlijk aanwezige materialen in de ondergrond ten tijde dat frackactiviteiten op de locatie werden uitgevoerd. De frequentie waarmee dit is gebeurd is niet te reconstrueren omdat gegevens van voor 1994 ontbreken. Ook dient nader vastgesteld te worden of de radioactiviteit exclusief door het fracken is veroorzaakt of dat dit (mede) het resultaat is van de gasproductie die voor of na het fracken plaatsvond. De ernst van de besmetting is onbekend omdat voor dit onderzoek geen informatie beschikbaar was over wat met de besmette materialen is gebeurd nadat de detectie had plaatsgevonden, maar betreft meest waarschijnlijk LSA-afval (laag-radioactief). In principe wordt mogelijk radioactief besmet fracmaterieel bij terugkomst bij de frac contractor altijd gemeten op radioactiviteit en zonodig afgevoerd naar een erkende verwerker (RIVM, 2017).

Vrijkomen van H₂S

Bij gaswinning in met name noord- en oost-Nederland wordt ook H₂S meegeproduceerd in relatief hoge concentraties. Deze gasvelden worden daarom als zure velden aangeduid. Bij acid fracks zou extra H₂S kunnen vrijkomen als naast met name carbonaten ook sulfides oplossen. Dit is vooral te verwachten als een HCl/HF mengsel gebruikt wordt. In diverse rapportages is te lezen dat men zich bewust was van dit risico en de daarbij behorende veiligheidsmaatregelen, en die ook zou hebben toegepast.

Er is geen concrete informatie gevonden waarin H₂S concentratiemetingen tijdens het fracken staan gerapporteerd en of sprake was van verhoogde concentraties ten opzichte van de gebruikelijke productiesituatie. Wel staat geregeld bij de chemische analyses van het geproduceerde water een opmerking vermeld, dat H₂S on-site gemeten is.

8.3 Conclusies

De informatie die beschikbaar was om opgetreden, ongewenste geochemische gebeurtenissen te kunnen herleiden is beperkt. In algemene zin zijn de geochemische interacties bij acid fracks intenser dan bij proppant fracks, omdat acid fracking een gecombineerde fysisch-chemische methode is om doorlatendheid te verhogen en proppant fracking een fysische methode is.

Voor acid fracken is een massabalans opgesteld van de – theoretisch maximale - hoeveelheid kalk dan wel steenzout die kan oplossen in de frackvloeistof op waterbasis. Het komt voor dat bij de gebruikte volumes aan frackvloeistof, deze hoeveelheden te gering zijn om problemen te veroorzaken met betrekking tot de (mechanische) integriteit van het reservoirgesteente dan wel de afsluitende laag.

Met betrekking tot de aantasting van cement is sprake van een potentieel risico als de put mankementen aan het cement heeft op de diepte van het reservoir en de geperforeerde casing. Er zijn hiervoor in de documenten geen indicaties gevonden.

De enige vorm van ongewenste geochemische gebeurtenissen waarvan melding wordt gemaakt in de brondocumenten van de verrichte frackoperaties is de herhaaldelijk voorkomende (laag-)radioactieve besmetting van instrumenten en materialen, waaronder proppants, door straling afkomstig uit natuurlijk aanwezige materialen in de ondergrond. De ernst hiervan kon niet nader beschouwd worden op basis van de beschikbare informatie. Radioactieve besmetting van deze aard komt ook bij reguliere gasproductie voor, waardoor de invloed van frackoperatie niet duidelijk is.

Er heeft geen of weinig systematische monitoring plaats gevonden aan de hand waarvan het verloop van de samenstelling van het water geproduceerd direct na afloop van de frackoperatie inzichtelijk wordt. De monitoringgegevens die beschikbaar gesteld zijn, zijn hiervoor te gering in frequentie en ook incompleet met betrekking tot de probleemstoffen (zware metalen, NORM, H₂S).

9 Incidenten met blootstelling van het milieu aan gevaarlijke stoffen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de mogelijke blootstelling van het milieu (bodem en grondwater) aan gevaarlijke stoffen als gevolg van frackoperaties. Bronnen van informatie hiervoor zijn de incidenten zoals gerapporteerd aan SodM en monitoringsgegevens van de grondwaterkwaliteit. Hierbij wordt tevens de relatie met kwetsbare gebieden zoals Natura2000- en grondwaterbeschermings-gebieden onderzocht.

9.1 Screeningsmethodiek

Om na te gaan of frackoperaties verontreiniging van bodem of het grondwater kunnen hebben veroorzaakt, zijn de volgende aspecten beschouwd:

- Meldingen van incidenten waarbij vervuiling van de ondergrond is opgetreden
- Monitoring van grondwaterkwaliteit
- De ligging van gefracte putten ten opzichte van kwetsbare gebieden

Deze aspecten worden hieronder verder toegelicht.

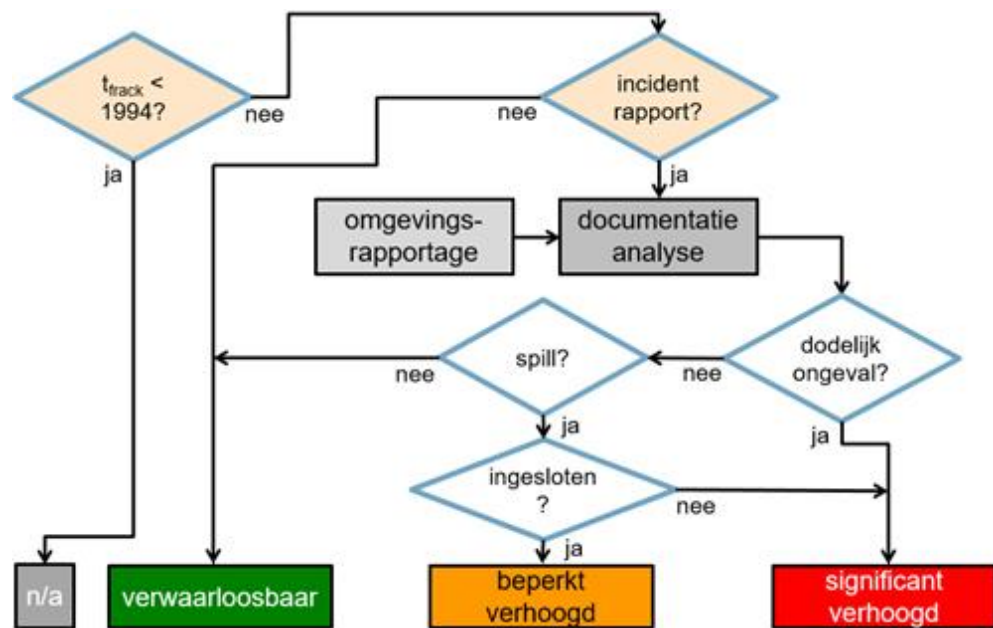
Incidenten

Het digitale overzicht van SodM omvat 237 incidenten (variërend van licht persoonlijk letsel en stankoverlast tot lekkages en brand) die zijn gemeld in de periode vanaf 1994 t/m 2017. Het gaat daarbij om een compleet overzicht van alle incidentmeldingen, dus ook incidenten die hebben plaatsgevonden op putten/velden waar geen frackoperaties zijn uitgevoerd. Per incident is onder andere weergegeven:

- Naam putten/veld
- Datum incident
- Aard van het incident
- Toedracht van het incident

Naast het digitale overzicht zijn ook analoge rapporten beschouwd (SodM archief; thans ter verwerking in Winschoten) waaruit een aanvullend overzicht is afgeleid van incidentmeldingen op acht putten/velden (deels overlappend met de digitaal ontvangen incidentenlijst) waar mogelijk incidenten hebben plaatsgevonden. De rapporten van deze putten/velden zijn kwalitatief doorgenomen om te achterhalen of en wat voor incident heeft plaatsgevonden.

Aan de hand van de datum en locatie is per incidentmelding nagegaan of er een relatie zou kunnen bestaan met een frackoperatie. Waar nodig is daarvoor de documentatie over de geassocieerde frackoperaties geraadpleegd. Om de risico-indicatie te beoordelen van blootstelling aan gevaarlijke stoffen als gevolg van incidenten is het belangrijk te weten of een lekkage heeft plaatsgevonden. De risico-indicatie bij een ingesloten lekkage (ofwel: binnen de voorziening met lekgoet, etc.) is minder hoog (matig) dan bij een niet ingesloten lekkage (hoog) (Figuur 9.1). Een incident waarbij sprake is van een dodelijk ongeval geeft eveneens een hoge risico-indicatie.



Figuur 9.1 Stroomschema voor de beoordeling van incidenten

Monitoring

De kwaliteit van het ondiepe grondwater (tot ca. 25 m onder het maaiveld) wordt gemonitord in het Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit (LMG) en de Provinciale Meetnetten Grondwaterkwaliteit (PMG). Het LMG is ingericht tussen 1978 en 1985 en wordt beheerd door het Rijksinstituut voor Milieu en Volksgezondheid (RIVM) in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW). Op circa 350 locaties wordt op 10 en 25 meter diepte de kwaliteit van het grondwater standaard vastgesteld aan de hand van macrocomponenten (NO_3 , SO_4 , NH_4 , Cl, K, Na, Mg, Ca, Fe, Mn, totaal-fosfor en opgelost organisch koolstof (DOC)) en anorganische microcomponenten (Ba, Sr, Zn, Al, Cd, Ni, Cr, Cu, As en Pb). De provinciale meetnetten dienen ter aanvulling van het LMG en zijn overeenkomstig betreffende ontwerp en bemonstering. De meetnetten hebben samen een totaal aantal van circa 1000 monitoringsputten verspreid over het land (zie Figuur 9.2). Het doel van de grondwatermeetnetten is om aan de hand van individuele meetlocaties tot een regionale beschrijving van de toestand en ontwikkeling van de grondwaterkwaliteit te komen. Het doel van deze monitoringsnetwerken is niet om op basis van kwaliteitsgegevens van individuele putten uitspraken te doen over mogelijke lokale verontreinigingen. Mede hierdoor worden bijvoorbeeld geen organische microverontreinigingen geanalyseerd die een indicatie kunnen zijn van invloed uit olie- en gaswinningen. Dit zijn echter de enige monitoringsgegevens die beschikbaar zijn om mogelijke impact van frackoperaties op de (ondiepe) grondwaterkwaliteit te beoordelen.

De LMG en PMG meetgegevens zijn beschikbaar via het DINO-loket (<https://www.dinoloket.nl/>).



Figuur 9.2 Meetpunten van het Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit (LMG) en de Provinciale Meetnetten Grondwaterkwaliteit (PMG)

Ook is vanaf 2012 in opdracht van NAM op locaties waar fracking plaats heeft gevonden, de kwaliteit van het freatisch grondwater gemonitord. Per locatie zijn meerdere peilbuizen zowel voorafgaand als na afloop van een frackoperatie bemonsterd. De peilbuizen zijn meestal met een wekelijkse frequentie voorafgaand aan de frack bemonsterd. Na afloop van de frack-periode is over het algemeen na twee weken en na drie maanden nogmaals gemonitord. De grondwatermonsters zijn geanalyseerd op minerale olie, BTEX (benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen), chloride, biologisch zuurstofverbruik (BZV,) (soms) chemisch zuurstofverbruik (CZV), elektrisch geleidingsvermogen (EGV/EC) en pH-veld.

Kwetsbare gebieden

Voor de Natura 2000- en grondwaterbeschermingsgebieden is nagegaan hoe ver de gefracte putten van deze kwetsbare gebieden af liggen. Hierbij is niet achterhaald of de productielokatie hydrologisch gezien stroomopwaarts of stroomafwaarts ligt ten opzichte van het beschermde gebied. Een korte afstand betekent dus niet automatisch dat het beschermde gebied een potentieel bedreigd object is vanuit de productielokatie in termen van bron-pad-object. Het geeft wel een eerste indruk van hoeveel productielocaties dicht bij kwetsbare gebieden liggen. Een verdere uitgebreidere analyse kan specifiekere antwoorden geven. Daarvoor was binnen deze opdracht geen mogelijkheid.

Natura 2000 is een Europees netwerk van beschermde natuurgebieden. In Natura 2000-gebieden worden bepaalde diersoorten en hun natuurlijke leefomgeving beschermd om de biodiversiteit te behouden. Grondwaterbeschermingsgebieden liggen als een buffer rondom waterwingebieden. De buitengrens van de grondwaterbeschermingsgebieden is de lijn, van waar het grondwater een periode van 25 jaar nodig heeft om de grondwaterputten te bereiken (de 25-jaars zone). Vanwege de hydrologische kwetsbaarheid gelden in deze gebieden specifieke regels ter bescherming van de kwaliteit van het grondwater.

9.2 Bevindingen

Incidenten

De digitaal aangeleverde incidentmeldingen zijn ingedeeld in verschillende klassen (zie Tabel 9.1). Bijna 50% van de incidenten betreft lekkages. Bij ruim 15% van de incidenten is sprake van menselijk letsel (wisselend in ernst). Van de 237 incidenten hebben 46 incidenten plaats gevonden op putten/velden waar ook frackoperaties zijn uitgevoerd. Deze 46 incidenten blijken echter niet te wijten aan frackoperaties, omdat ze niet in de tijd aan elkaar gecorreleerd kunnen worden. Eén incident heeft plaatsgevonden ten tijde van het aftuigen van apparatuur die is gebruikt voor een frackoperatie en heeft dus een directe relatie met de frackoperatie. Dat incident heeft echter geen verontreiniging van bodem of grondwater veroorzaakt.

In de beschikbaar gestelde documentatie en het analoge archief zijn geen aanwijzingen gevonden dat verontreiniging van ondiep grondwater of bodem heeft plaatsgevonden ten tijde van frackoperaties. Daarbij moet worden opgemerkt dat het voor een deel van de meldingen in het analoge archief minder duidelijk is wat precies heeft plaatsgevonden, met name vanwege de slechte leesbaarheid. Een statistische documentanalyse met de Kibana tool is gebruikt om te kijken welke sleutelwoorden veel voorkomen in de rapporten van de bijbehorende frackoperaties.

Monitoring

Bij de beoordeling van de impact van frackoperaties op de (ondiepe) grondwaterkwaliteit zijn LMG en PMG putten meegenomen die binnen een straal van 500 m van de gefracte putten liggen. Dit levert vijf meetpunten op (zie Tabel 9.2 en Figuur 9.3) die tussen 190 en 384 m afstand van tien gefracte putten liggen. Voor deze meetpunten zijn meetreeksen beschikbaar tussen 1980 en 2012. Bij enkele putten is de datum van de frackoperatie 15-20 jaar voor het begin van de meetreeks. Voor deze locaties is de impact van de frackoperatie(s) op de grondwaterkwaliteit hydrologisch gezien niet met zekerheid te beoordelen, omdat niet is achterhaald of de monitoringslocaties stroomafwaarts staan van de gefracte putten en of de

lokaties binnen de grondwaterstroombanen vanaf deze putten liggen. Het is dus niet bekend of detectie van eventuele verontreiniging van het grondwater door frackoperaties in principe mogelijk is aan de hand van de geselecteerde LMG en PMG putten.

Tabel 9.1 Overzicht van aantal incidenten ingedeeld naar klasse voor 237 digitaal gemelde incidenten over de periode 1994-2017.

Klasse	Aantal
Lekkages (incl. 1 historisch geval)	115
Menselijk letsel	45
LSA besmettingen	5
Asbest aangetroffen	3
Kwik in afvalwater	1
Brandgevallen	3
Gaslekages (incl. freon en ammonia)	34
Technische mankementen	28
Geluids- of stankoverlast	2

Tabel 9.2 Lijst van LMG/PMG putten die binnen een straal van 500 m van één of meerdere gefracte putten liggen.

LMG/PMG put	Meetreks in DINO	Gecorreleerde put	Afstand [m]	Datum frackoperatie
B11A0101	1984-2010	WTN-01-S1	384	april 1997
B18A0100	1994-2012	TAP-02-S1	278	oktober 1983
B22E0087	1980-2007	DAL-06	299	oktober 1981
		DAL-12	321	juni 1986
B37B0229	1989-2010	LIR-39	359	september 1966
		LIR-41-S1	365	augustus 1974
		LIR-42	370	december 1974
		LIR-48	354	februari 1988
		LIR-49	350	juli 1991
B37B0230	1989-2010	LIR-24-S1	190	juni 1959

Voor de vijf locaties zijn de grondwaterkwaliteitsgegevens vergeleken met streef- en interventiewaarden die gesteld worden in de Circulaire Bodemsanering 2013 (Staatscourant 16675, 27 juni 2013). Voor de parameters die binnen de monitoringsnetwerken gemeten worden zijn hierin alleen normen beschikbaar voor de anorganische microcomponenten (metalen), niet voor de macrocomponenten (zie tabel 9.3). Streefwaarden geven het ijkpunt aan voor de milieukwaliteit op de lange termijn, uitgaande van verwaarloosbare risico's voor het ecosysteem. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen ondiep (<10 m onder maaiveld) en diep (>10 m onder maaiveld) grondwater. Een overschrijding van de interventiewaarde geeft aan dat er sprake is van een sterk verhoogde concentratie.

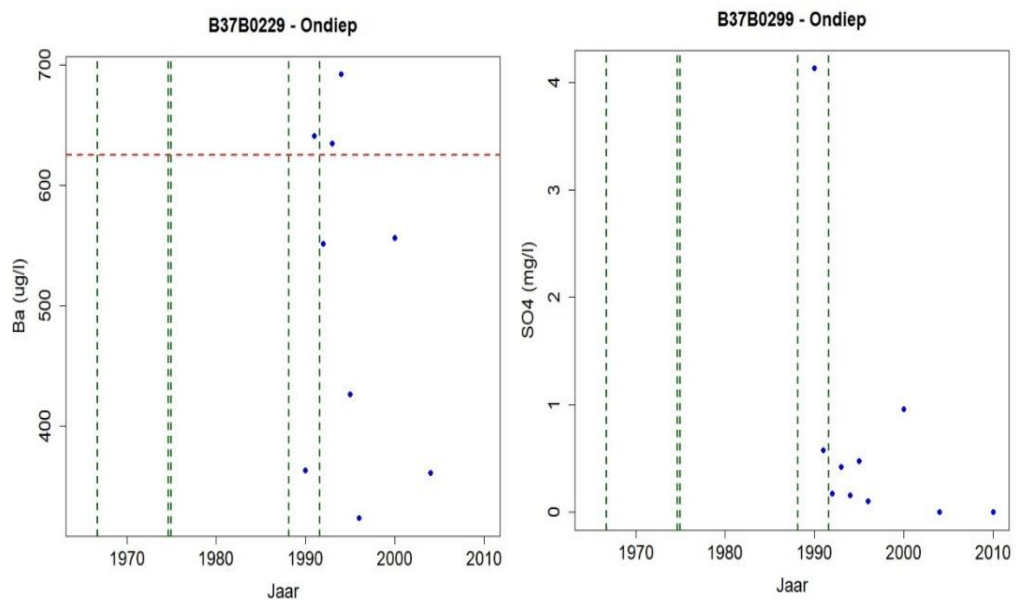


Figuur 9.3 Vijf LMG/PMG putten die binnen een straal van 500 m van een van de gefracte putten liggen.

Behalve voor cadmium worden voor alle metalen streefwaarden overschreden bij één of meerdere locaties. Dit zijn licht verhoogde concentraties die in alle redelijkheid geen verband houden met mijnbouwactiviteiten: oorzaak door natuurlijke variatie of diffuse landbouwverontreiniging is veel waarschijnlijker. Er zijn geen stijgende of dalende trends te zien na frackoperaties. De enige parameter waarvan de interventiewaarde wordt overschreden is barium: bij twee van de vijf putten (B37B0229 en B37B0230) in zowel het diepe als het ondiepe filter (als voorbeeld zie Figuur 9.4).

Tabel 9.3 Streef- en interventiewaarden voor metalen zoals gemeten in de LMG/PMG volgens de Circulaire Bodemsanering 2013.

Metalen	Streefwaarde		Interventiewaarde [µg/l]
	Ondiep (<10 m) [µg/l]	Diep (>10 m) [µg/l]	
Arseen (As)	10	7,2	60
Barium (Ba)	50	200	625
Cadmium (Cd)	0,4	0,06	6
Chroom (Cr)	1	2,5	30
Koper (Cu)	15	1,3	75
Nikkel (Ni)	15	2,1	75
Lood (Pb)	15	1,7	75
Zink (Zn)	65	24	800

**Figuur 9.4** Plots voor barium en sulfaat voor het ondiepe filter van put B37B0229. De verticale groene lijnen geven de data van de frackoperatie van de vijf nabijgefrackte putten weer. De horizontale rode lijn geeft de interventiewaarde voor barium weer (=625 µg/l).

Barium zou mogelijk een indicatie van olie- of gaswinning kunnen zijn; bariet (BaSO_4) wordt bij het boren van een put gebruikt als verzwaringsmiddel in de boorspoeling maar wordt niet gebruikt tijdens het fracken. In de twee putten waar hoge bariumconcentraties worden gevonden zijn de concentraties van sulfaat (SO_4) echter laag (zie als voorbeeld Figuur 9.4). Dit duidt er mogelijk op dat de Ba concentraties bepaald worden door de oplosbaarheid van het slecht oplosbare bariet: als SO_4 laag is in het grondwater door sulfaat-reductie, kan de Ba-concentratie hoger worden:



met

$$K_{\text{bariet}} = [\text{Ba}^{2+}] \cdot [\text{SO}_4^{2-}] = \text{constant}$$

waarbij K_{bariet} verwijst naar het oplosbaarheidsproduct van bariet en [i] betrekking heeft op de actieve concentratie (activiteit) van component i. Meer algemeen is de herkomst van (hoge concentraties aan) barium in het grondwater niet duidelijk (zie

bijvoorbeeld Van der Donk, 2012). Fraters et al. (2001) vonden bij het afleiden van achtergrondconcentraties van sporenelementen in grondwater dat in klei- en veengebied 10% van de analyses van grondwater dieper dan 5 m een Ba-concentratie hoger dan 585 µg/l heeft. Het gaat hierbij om een studie op basis van het LMG en LMB (Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit): Ba concentraties boven de interventiewaarde zijn dus niet ongewoon voor locaties die als onverdacht, niet lokaal belast worden beschouwd.

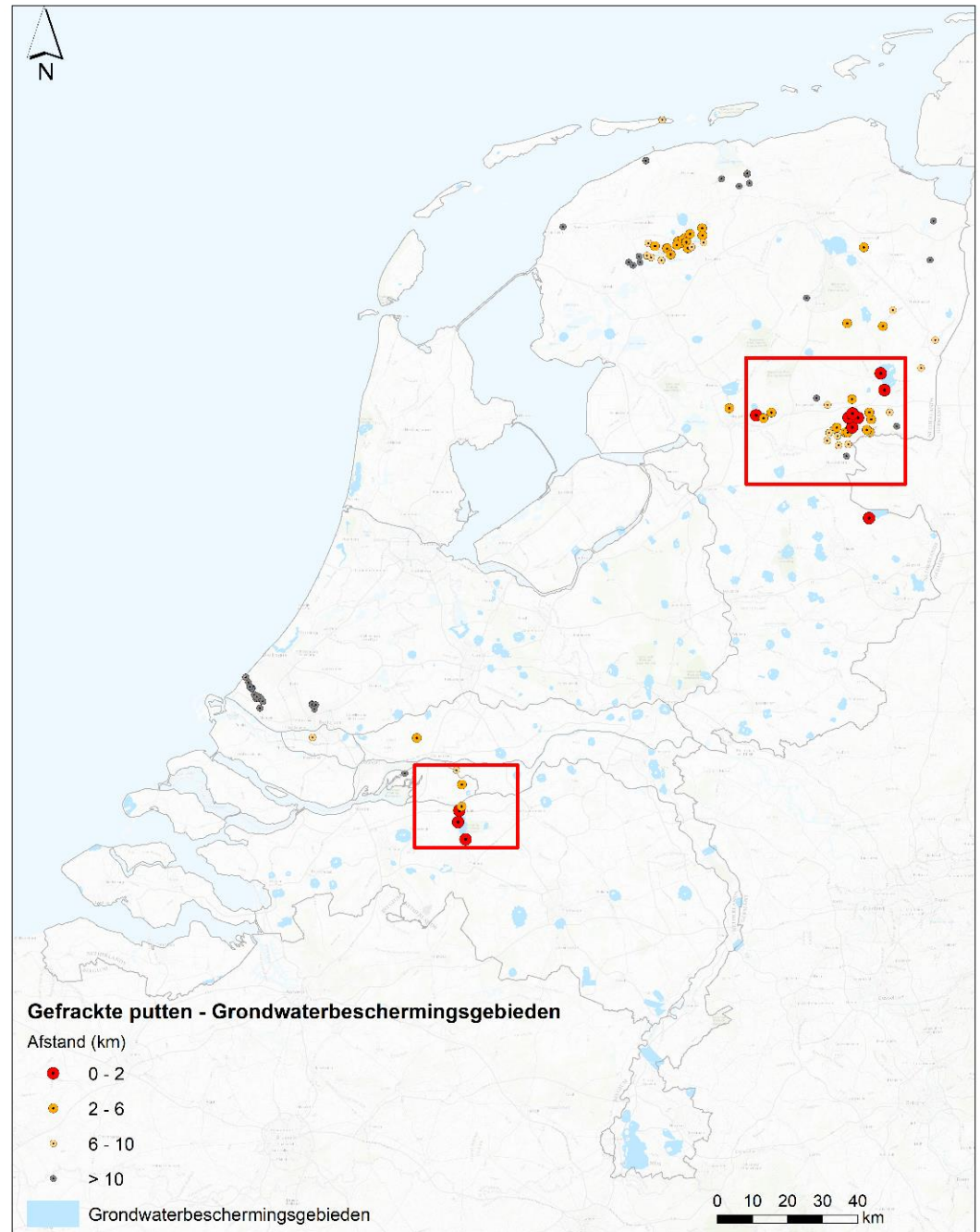
De beschouwde meetnetgegevens geven geen aanwijzingen dat frackoperaties een negatieve impact hebben gehad op het ondiepe grondwater met betrekking tot de anorganische, opgeloste stoffen. Twee belangrijke opmerkingen moeten hierbij geplaatst worden: Ten eerste dient er opgemerkt te worden dat het doel van de monitoringsnetwerken niet is om op basis van kwaliteitsgegevens van individuele putten uitspraken te doen over mogelijke lokale verontreinigingen. Dat geldt des te meer voor het potentiële effect van incidentele gebeurtenissen als een frackoperatie op het grondwater naast of in plaats van langjarige effecten van antropogene activiteiten op het grondwater (zoals landbouw). Ten tweede zijn de parameters die standaard gemeten worden in het LMG en PMG beperkt; er zijn bijvoorbeeld geen organische microverontreinigingen beschouwd die een indicatie kunnen zijn van invloed uit olie- en gaswinningen.

Deze beperkte inventarisatie toont aan dat het niet aanwijsbaar is dat er impact is geweest van frackoperaties op de kwaliteit van het ondiepe grondwater in de buurt van gefracte putten. Hiervoor is een uitgebreidere data-inventarisatie nodig waarbij ook wordt gekeken naar organische verbindingen die typisch bij het fracken gebruikt worden. In Dinoloket zijn grondwateranalyses van organische microverontreinigingen beschikbaar waarbij het vaak gaat om eenmalige meetcampagnes op LMG- of PMG-putten en andere grondwaterputten. Daarnaast beschikken derden (waaronder de drinkwaterbedrijven) over vergelijkbare grondwateranalyses die niet beschikbaar zijn gesteld aan de Dino-database. Mogelijk is daar op stoffen geanalyseerd die verband kunnen houden met frackactiviteiten (naast eventuele andere antropogene activiteiten).

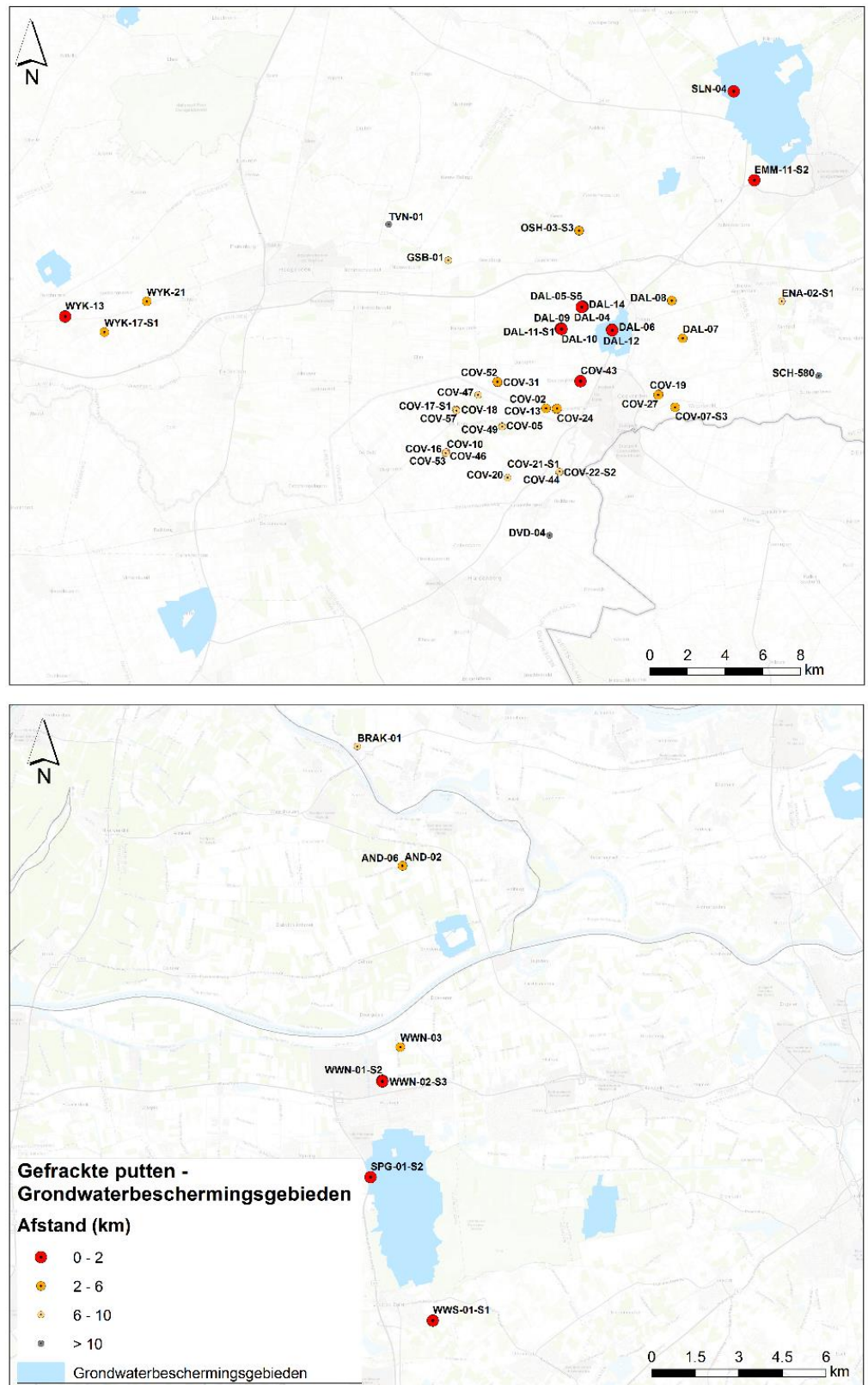
Vanaf 2012 is op NAM-locaties waar fracken plaats heeft gevonden de kwaliteit van het freatisch grondwater gemonitord en gerapporteerd. Ook deze rapportages geven geen aanwijzing van impact van frackoperaties op ondiep grondwater of bodem. Hierbij dient echter te worden opgemerkt dat het grondwater in deze onderzoeken slechts op een beperkt aantal stoffen is onderzocht. Er zijn op deze locaties geen stoffen onderzocht die typisch geassocieerd worden met de frackoperaties, maar op stoffen die algemeen verband houden met verontreiniging van olie-achtige koolwaterstoffen. Om wel uitspraken te kunnen doen omtrent het effect van frackoperaties zou het monitoringsplan beter moeten worden afgesteld op dit doel. Een ander aandachtspunt is dat bij een aantal frackoperaties de eerste monitoringsronde na afloop van de werkzaamheden pas plaatsvond, na circa een maand. Hierdoor zou mogelijk grondwaterverontreiniging kunnen worden gemist. Op een meer theoretische grondslag verdient de vraag aandacht welke omvang van een lekkage gedetecteerd kan worden met het geïnstalleerde meetnet of dat een verontreiniging zich beweegt tussen de waarnemingsputten.

Kwetsbare gebieden

Figuur 9.5 t/m Figuur 9.8 tonen de ligging en de afstand van de gefracte putten tot respectievelijk de grondwaterbeschermingsgebieden en de Natura2000-gebieden.



Figuur 9.5 Classificatie van de afstand van de gefracte putten tot de grondwaterbeschermingsgebieden. Voor detail zie Figuur 9.6.



Figuur 9.6 Detailkaarten van Figuur 9.5.



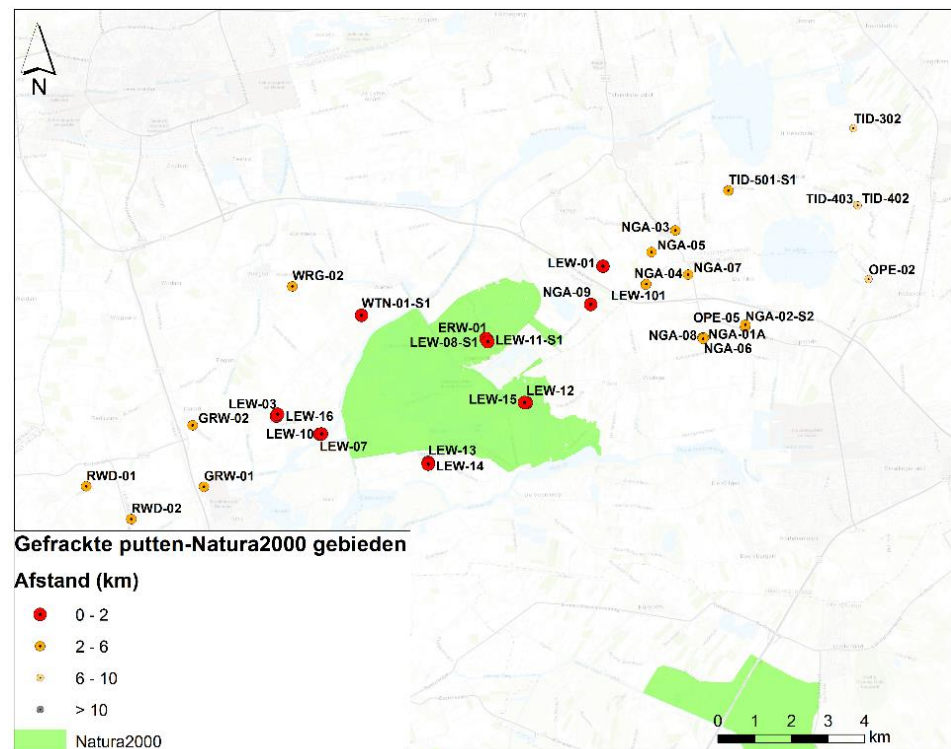
Figuur 9.7 Classificatie van de afstand van de gefracte putten tot de Natura 2000-gebieden. Voor detaillering van het Natura 2000-gebied 'Alde Feanen' in de provincie Friesland zie Figuur 9.8.

Voor zowel de Natura 2000-gebieden als voor de grondwaterbeschermingsgebieden geldt dat de afstand van de gefracte putten tot deze gebieden geregeld minder dan twee km bedraagt (Tabel 9.4). De putten op korte afstand van de kwetsbare gebieden vormen niet automatisch een risico voor bodem- en grondwaterkwaliteit in deze gebieden. Per put zou moeten worden nagegaan of de put hydrologisch stroomopwaarts of stroomafwaarts gelegen is ten opzichte van het beschermde gebied. Vervolgens kan nagegaan worden wat de reistijd is om een inschatting van het risico op verontreiniging te maken in geval van lekkage.

Tabel 9.4 Aantallen gefracte putten per afstand tot aan Natura 2000-gebied en grondwater-beschermingsgebied.

Afstand [km]	Aantal putten tot aan Natura 2000-gebied	Aantal putten tot aan grondwater-beschermingsgebied
0-2	37	17
2-6	66	43
6-10	11	34
>10	47	67

Nabij Natura 2000-gebied 'Alde Feanen' in de provincie Friesland liggen veertien putten op korte afstand (0 tot 2 km) (zie Figuur 9.8). Een vergelijkbare situatie doet zich voor bij acht putten nabij Waalwijk in Noord-Brabant. De 36 putten op korte afstand van de Natura 2000-gebieden zijn in totaal 52 keer gefract, verdeeld over de jaren 1954 t/m 2014.

**Figuur 9.8** Detailkaart van de gefracte putten rondom Natura 2000-gebied "Alde Feanen".

Er zijn zeventien gefracte putten op korte afstand van grondwaterbeschermingsgebieden. Deze putten zijn tussen 1974 en 2001 twintig keer gefract. Drie putten liggen nabij het grondwaterbeschermingsgebied Waalwijk (Figuur 9.6). De overige putten liggen nabij vier grondwaterbeschermingsgebieden in noordoost Nederland (Manderheide en Manderveen, Ruinerwold, Dalen en Valtherbos).

9.4 Conclusies

Op basis van de beschouwde gegevens kan een aantal conclusies worden getrokken die echter in grote mate worden gestuurd door de beperkte hoeveelheid beschikbare gegevens. De invloed van deze beperking wordt in de onderstaande kanttekeningen nader verwoord.

Op basis van de beschikbare gegevens worden de volgende conclusies getrokken:

- De beschikbare gegevens over incidenten bij mijnbouwlocaties (vanaf 1994) en grondwatermonitoring geven geen aanwijzing dat verontreiniging van ondiep grondwater of de bodem heeft plaatsgevonden als gevolg van frackoperaties;
- Het analoge archief bevat ook geen aanwijzingen dat frackoperatie's impact hebben gehad op de kwaliteit van ondiep grondwater of bodem;
- Het is onbekend of frackoperatie's van voor 1994 effect hebben gehad op de kwaliteit van ondiep grondwater of bodem;
- De afstand van gefrackte putten tot kwetsbare gebieden is geregeld gering (<2 km);

Kanttekeningen bij bovenstaande conclusies zijn dat:

- Een beperkte grondwaterkwaliteitsdataset van LMG/PMG en NAM-monitoringsopdrachten is beschouwd;
- Organische stoffen, die typisch gerelateerd zijn aan fracken, waren niet geanalyseerd in LMG en PMG;
- Niet is achterhaald of de LMG/PMG monitoringslocaties stroomafwaarts staan van de gefrackte putten;
- Sinds 2012 vindt monitoring van het freatisch grondwater plaats bij frack werkzaamheden, waarbij op een beperkt analysepakket wordt aangewend en waarbij organische stoffen gerelateerd aan frackoperaties niet mee worden genomen;
- Niet is achterhaald of de productielokatie hydrologisch gezien stroomopwaarts of stroomafwaarts ligt ten opzichte van kwetsbare gebieden.

10 Blootstelling van de mens aan gevaarlijke stoffen

Bij de blootstelling van de mens aan gevaarlijke stoffen als gevolg van een frackoperatie wordt met name gedoeld op de bevolking in de omgeving van de putlocatie. Voor het personeel dat werkzaam is op de locatie zijn wettelijke regels, voorschriften en procedures die de veiligheid moeten waarborgen. Bovendien is het personeel speciaal getraind en moet de gebruikte apparatuur voldoen aan de gestelde voorschriften.

Blootstelling van de bevolking in de omgeving van de putlocatie kan voorkomen bij transport, opslag en verwerking van bijvoorbeeld componenten van de frackvloeistof. De bevolking mag zich tijdens de frackoperaties niet binnen de mijnbouwlocatie ophouden.

Op de mijnbouwlocatie zijn preventieve maatregelen genomen om in het geval van incidenten de veiligheid zoveel mogelijk te waarborgen en de gevolgen te mitigeren. Voorzieningen bestaan onder meer uit een ondoorlatende vloer, lekgoten, opvangputten, etc. Eventueel kunnen er detectoren voor bepaalde stoffen (bijvoorbeeld voor H₂S) worden geïnstalleerd. Dit hoofdstuk betreft met name blootstelling aan gevaarlijke stoffen als gevolg van frackactiviteiten via de lucht. Eventuele blootstelling via bodem of grondwater is in het voorgaande hoofdstuk behandeld.

10.1 Screeningsmethodiek

TNO heeft een beperkt onderzoek uitgevoerd op dit onderwerp. De focus lag daarbij op de gerapporteerde incidenten op de mijnbouwlocatie. Het transport van stoffen van en naar de locatie behoort niet tot de scope van dit onderzoek. Dit onderzoek gaat ook niet in op de vervolgvraag, welke effecten een incident heeft op de mens. Het onderzoek is gebaseerd op de registraties in de archieven en databestanden van SodM (zowel bij SodM in Den Haag als in het fysieke archief in Winschoten), de bedrijfsrapportages zoals beschikbaar gesteld door NAM en Vermilion en resultaten van het huidige onderzoek zoals gepresenteerd in de voorgaande hoofdstukken. De fysieke archieven in Winschoten omvatten alleen een selectie van de documenten uit de periode 1994 tot 2016. De overige rapporten zijn op basis van de Archiefwet vernietigd. Voor dit onderzoek zijn alle digitale documenten gescreend op basis van sleutelwoorden (Bijlage B), terwijl de fysieke documenten handmatig zijn doorgenomen.

10.2 Bevindingen

Op basis van de beschikbare rapportages is niet gebleken dat zich bij een frackoperatie een gebeurtenis met nadelige effecten heeft voorgedaan, waarbij de mens is blootgesteld aan gevaarlijke stoffen (Bijlage E). Hierbij dient te worden opgemerkt dat het niet mogelijk is om te bepalen of de registratie van deze gegevens compleet is en goed is gearchiveerd. Er is geen aanwijzing dat er specifieke monitoringsactiviteiten zijn uitgevoerd om dit onderwerp te volgen. Daarnaast maken eventuele lange termijneffecten van blootstelling geen deel uit van deze rapportages.

In overleg met SodM is besloten dit onderwerp binnen dit onderzoek niet verder uit te werken.

10.3 Conclusies

Het onderdeel blootstelling van de mens aan gevaarlijke stoffen als gevolg van frackactiviteiten valt goeddeels buiten de scope van deze inventarisatie. Het is daarom niet mogelijk een sluitende conclusie te verbinden aan de bevindingen van dit deel van het onderzoek.

11 Conclusies

In onderstaand overzicht wordt met name ingegaan op de beschikbare gegevens waarop het onderzoek is gebaseerd en op de algemene uitkomst per potentieel risico. Per hoofdstuk zijn de bevindingen per onderdeel weergegeven.

Algemene conclusies

1. Er zijn op basis van dit onderzoek geen aanwijzingen voor aan frackoperaties gerelateerde in-/accidenten binnen de vijf door SodM gedefinieerde risico elementen:
 - a. Geïnduceerde seismiciteit
 - b. Verlies van integriteit van afsluitende lagen
 - c. Verlies van integriteit van de put
 - d. Ongewenste geochemische interacties
 - e. Blootstelling van mens en milieu aan gevaarlijke stoffenDeze bevinding berust op de onderstaande gegevensbronnen met elk hun eigen volledigheid en informatiewaarde.
2. Dit onderzoek komt, ook op basis van de additionele gegevens, tot een vergelijkbaar resultaat als van SodM heeft gerapporteerde als resultaat van de inventarisatie in 2016 (SodM, 2016).
3. Uit de evaluatie van de gegevens blijkt dat niet alle in dit onderzoek behandelde potentiële risico's systematisch worden gemonitord. De rapportage richt zich met name op de technische voorbereiding en het verloop van de frackoperatie. In dit onderzoek is noodgedwongen gebruik gemaakt van bestaande monitoring meetnetten die niet specifiek zijn ingericht voor het volgen van (de gevolgen van) de frackoperaties. Dit betreft het landelijk seismometernetwerk KNMI, grondwaterkwaliteitsmeetnetten (LGM/DGM) en in enkele gevallen ook lokale meetnetten voor grondwaterkwaliteit. Voor een specifieke inzet van meetgegevens om de mogelijke risico's van frackoperaties goed in beeld te brengen zouden aanpassingen nodig zijn in de locatie en dichtheid van monitoringspunten, meetfrequenties, gemeten parameters/monsternamen en analyse daarvan. Recentelijk is een start gemaakt om de potentiële risico's bij het fracken expliciet te behandelen in de plannen van de frackoperaties, evaluaties daarvan, na afloop van de frackoperaties, komen nog niet voor in de beschikbare documenten.

Brongegevens

Het onderzoek betreft 161 putten en 245 frackoperaties. Het is primair gebaseerd op rapporten, plannen en verslagen over de voorbereiding en uitvoering van de frackoperaties (ca. 2500 documenten). Daarnaast is secundaire informatie gebruikt om eventuele effecten van de frackoperaties te toetsen.

- Maatschappij rapporten (voornamelijk technisch)
 - NAM en Vermilion
- SodM archief (technisch, inspectie- en incidentrapportages)
 - database van putproblemen (vanaf 2005) met een omschrijving van het probleem en de getroffen maatregelen

- database van incidentrapportages (vanaf 1994) met een omschrijving van het incident en de getroffen maatregelen
- registraties van natuurlijk voorkomend radioactief materiaal (NORM) en lage radioactiviteit (LSA)
- alle aanwezige (papieren) documentatie gerelateerd aan de gestimuleerde putten
- Secundaire gegevens uit verschillende databases
 - KNMI (seismische data)
- beschikbaar vanaf 1986; de helft van de frackoperaties is gemonitord
 - DINO database
- putlocaties, putstatus en reservoir gegevens
 - Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit (LMG) en de Provinciale Meetnetten Grondwaterkwaliteit (PMG).
- Het LMG is ingericht tussen 1978 en 1985, circa 350 locaties op 10 en 25 meter diepte.

Volledigheid en informatiewaarde van de bovenstaande gegevensbronnen

- Geïnduceerde seismiciteit
 - Goed gedocumenteerd vanaf de introductie van het landelijke meetnet, duidelijke conclusie in die periode mogelijk.
- Verlies van integriteit van afsluitende lagen
 - Redelijk goed gedocumenteerd voor zover detectie mogelijk is, aangevuld met secundaire data, duidelijke conclusie mogelijk.
- Verlies van integriteit van de put
 - Redelijk gedocumenteerd, aangevuld met secundaire data, redelijk duidelijke conclusie mogelijk.
- Ongewenste geochemische interacties
 - Beperkt gedocumenteerd, meer gebaseerd op geochemische/fysische wetten, matig onderbouwde conclusie mogelijk.
- Blootstelling van mens en milieu aan gevaarlijke stoffen
 - (Zeer) Beperkt gedocumenteerd, meldingen komen alleen voor in beperkte incidentrapportage. Geen incidenten gerelateerd aan frackoperaties, geen onderbouwde conclusie mogelijk
 - Milieu (grondwater en bodem), risico afhankelijk van integriteit afsluitende laag en/of put
 - Grondwater monitoring niet opgezet voor monitoring effecten frackoperaties (locatie en analyse)
 - Menselijke blootstelling, geen incidenten gerapporteerd, geen conclusies omtrent risico mogelijk.

12 Literatuurlijst

Carpenter, A.B. (1989) Occurrence of lead- and zinc-rich brine in the Rotliegendes Formation, the Netherlands. *Abstr. Prog. Geological Society of America* 21/6: A315.
Economides, M.J., Nolte, K.G. (2000). *Reservoir Stimulation*. John Wiley & Sons, 3rd edition.

Chuprakov, D., Prioul, R. (2015) Hydraulic fracture height containment by weak horizontal interfaces. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, The Woodlands, Texas, USA, 3-5 February 2015, SPE-173337.

Davies, R.J., Almond, S., Ward, R.S., Jackson, R.B., Adams, C., Worrall, F., Herringshaw, L.G., Gluyas, J.G., Whitehead, M.A. (2014) Oil and gas wells and their integrity: implications for shale and unconventional resource exploitation. *Marine and Petroleum Geology* 56, 239-254.

DHAIS (2004) Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit. TNO rapport NITG 04-171-C.

Dost, B., Goutbeek, F., van Eck, T., Kraaijpoel, D. (2012) Monitoring induced seismicity in the North of the Netherlands: status report 2010. *KNMI scientific report WR 2012-03*, 46 pp.

Fisher, K., Warpinski, N. (2012) Hydraulic -fracture-height growth: real data. *SPE Production & Operations*, SPE-145949, 8-19.

Fokker, P.A. (1995). *The behaviour of salt and salt caverns*. PhD thesis, Delft University of Technology.

Fraters, B., Boumans, L.J.M. & Prins, H.P. (2001) *Achtergrondconcentraties van 17 sporenmetalen in het grondwater van Nederland*. RIVM rapport 711701017/2001.

Griffioen, J., Verweij, H. & Stuurman, R.J. (2016) *The composition of groundwater in Palaeogene and older formations in the Netherlands. A synthesis*. *Neth. J. Geosci.* 95, 349-372.

Hofstee, C., Seeberger, F., Orlic, B., Mulders, F., van Bergen, F., Bisschop, R. (2008). *The feasibility of effective and safe carbon dioxide storage in the De Lier gas field*. *First Break* 26, 53-57.

IF Technology (2016). *Well stimulation techniques for geothermal projects in sedimentary basins*. IF Technology, report dated 31-10-2016.

Ingraffea, A.R., Wells, M.T., Santoro, R.L., Shonkoff, S.B.C. (2014) *Assessment and risk analysis of casing and cement impairment in oil and gas wells in Pennsylvania, 2000-2012*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 10955-10960.

Kharaka, Y.K. & Hanor, J.S. (2004) *Deep fluids in the continents: I. Sedimentary basins*. In: J.I. Drever (ed.): *Treatise on geochemistry*. Vol. 5. *Surface and ground water, weathering, and soils*. Elsevier, Amsterdam, 499-540.

King, G.E., King, D.E. (2013) Environmental risk arising from well construction failure: difference between barrier and well failure, and estimates of failure frequency across common well types, locations and well age. Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, USA. SPE 166142, 29 pp.

Lele, S.P., Garzon, J.L., Hsu, S.-Y., DeDontney, N.L., Searles, K.H., Sanz, P.F. (2015) Groningen 2015 geomechanical analysis. Exxon Mobil Upstream Research Company, Spring, TX, USA, Final Report. Nederlandse Aardolie Maatschappij (Assen).

MFrac Suite 12 (2018) Program and Users documentation. Baker Hughes. Technical investigations supporting the feasibility of effective and safe storage of CO₂ in the De Lier gas field. TNO rapport U-R0761, 2007.

RIVM (2017) Processen met natuurlijke radioactiviteit in de niet-nucleaire industrie in Nederland – geactualiseerde basisinformatie. Onderzoek voor de implementatie van Richtlijn 2013/59/Euratom. RIVM, briefrapport 2017-0042.

Schmidt, A.P. (2000) Naturally occurring radioactive materials in the gas and oil industry. Origin, transport and deposition of stable lead and ²¹⁰Pb from Dutch gas reservoirs. PhD thesis, Utrecht University, the Netherlands, 144 pp.

SodM (2016) Resultaten inventarisatie naar het inzichtelijk maken van de toepassing van fracking, de mogelijke consequenties en de gevolgen daarvan. Brief aan MinEZK, kenmerk 16031641, 20 pp.

Staatsblad (2017) Besluit van 23 oktober 2017, houdende vaststelling van regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming). Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden 404, 416 pp.

TNO (2016) Seismiciteit onshore gasvelden Nederland. TNO rapport R10164, 302 pp.

Vignes, B., Aadnøy, B.S. (2008) Well-integrity issues offshore Norway, Proceedings of the IADC/SPE Drilling Conference, Orlando, USA. 8 pp.

Van der Donk (2012). Nieuwe beren op de weg: Barium in grondwater. BODEM 2, april 2012.

13 Bijlagen

A. Overzicht en risico-indicatiematrix van frackoperaties

De onderstaande tabel bevat basisgegevens voor alle frackoperaties die binnen de strekking van dit onderzoek zijn geëvalueerd. Daarnaast wordt voor elk van de vijf door SodM gespecificeerde risico-elementen een risico-indicatie en (on)zekerheid gespecificeerd (conform Figuur A.1).

Ten opzichte van het eerder door SodM gepubliceerde overzicht (SodM, 2016) is voor een aantal putten de daadwerkelijk met (een) frackoperatie(s) gestimuleerde 'sidetrack' gespecificeerd (gemarkeerd met een asterisk). Daarnaast is de lijst aangevuld met ontbrekende frackoperaties, waarbij moet worden opgemerkt dat in het huidige overzicht mogelijk nog frackactiviteiten ontbreken. Put De Lier-26-sidetrack-2 (LIR-26-S2) heeft in tegenstelling tot hetgeen eerder gepubliceerd is niet drie maar twee keer een frackoperatie ondergaan (gestaafd door de beschikbare documentatie en de pteigenaar). Een aanzienlijk deel van de eerder als zuurfrack ('acid frack') aangeduide frackactiviteiten betreffen in werkelijkheid zuurstimulaties ('matrix acidizing') waarbij de druk niet dusdanig hoog is dat het gesteente breekt.

		RISICO-INDICATIE			
		significant verhoogd	beperkt verhoogd	verwaarloosbaar	
ZEKERHED	hoog				<i>afdoende gedocumenteerd</i>
	matig				<i>deels gedocumenteerd</i>
	laag				<i>indirecte aanwijzingen</i>
	g.g.				<i>geen gegevens</i>
		<i>significant effect; hoge impact*</i>	<i>beperkt effect; lage (of geen) impact*</i>	<i>geen significant effect*</i>	<i>* gedefiniëerd per categorie</i>

Figuur A.1 Legenda bij risico-indicatiematrix.

Blootstelling van mens en milieu aan gevaarlijke stoffen								
Verlies van integriteit van de put								
Ongewenste geochemische interacties								
Verlies van integriteit van afsluitende lagen								
Geïnduceerde seismiciteit								
Putcode	Eigenaar	#	Datum	Type	Doel			
AME-107-S1	NAM	1	1998/02/20	proppant	ROSLU			
AME-107-S1	NAM	2	1998/02/28	proppant	ROSLU			
AND-02	NAM	1	1954/09/02	proppant	ATWDM			
AND-02	NAM	2	1954/11/06	proppant	ATWDM			
AND-02	NAM	3	1985/03/12	proppant & acid	ATWDM			
AND-06	VERMILION	1	2008/11/26	proppant	RNROF			
ASN-01	NAM	1	1990/06/26	proppant	ROSLU			
BHM-03	NAM	1	1983/01/27	acid	ZEZ2C			
BLF-103	NAM	1	1996/07/19	proppant	ROSLU			
BLF-104-S1*	NAM	1	1996/07/25	proppant	ROSLU			
BLF-105	NAM	1	1995/11/29	proppant	ROSLU			
BLF-106-S2*	NAM	1	1998/08/25	proppant	ROSLU			
BLF-106-S2*	NAM	2	1998/09/01	proppant	ROSLU			
BLF-106-S2*	NAM	3	1998/09/07	proppant	ROSLU			
BLF-106-S2*	NAM	4	1998/09/14	proppant	ROSLU			
BLF-108	NAM	1	2012/08/22	proppant	ROSLU			
BLF-108	NAM	2	2012/08/26	proppant	ROSLU			
BRAK-01	VERMILION	1	2008/12/03	proppant	RNROF			
BRK-01-S1*	NAM	1	1961/10/30	proppant	SLDNA			
BRK-02	NAM	1	1954/07	proppant	KNNSL			
BRK-02	NAM	2	1954/09	proppant	KNNSL			
BRK-02	NAM	3	1954/11	proppant	KNNSL			
BRK-03	NAM	1	1955/12	proppant	KNNSL			
BRK-11	NAM	1	1993/07/16	proppant	KNNSL			
BUI-01	NAM	1	1982/11/18	acid	ZEZ2C			
COV-02	NAM	1	1977/10	acid	ZEZ2C			
COV-02	NAM	2	1984/01	acid	ZEZ2C			
COV-05	NAM	1	1987/01	acid	ZEZ2C			
COV-07-S3*	NAM	1	1971/06/10	acid	DCDT			
COV-10	NAM	1	1976/03/05	acid	ZEZ2C			
COV-10	NAM	2	1976/05/17	acid	DCDT			
COV-13	NAM	1	1980/06/11	proppant	DCDT			
COV-13	NAM	2	1980/06/17	proppant	DCDT			
COV-13	NAM	3	1980/06/23	proppant	DCDT			
COV-16	NAM	1	1997/05/02	proppant	DCDTH			
COV-16	NAM	2	1998/12/18	acid	ZEZ2C			
COV-16	NAM	3	1998/12	acid	ZEZ2C			
COV-17-S1*	NAM	1	1981/02/19	proppant	DCDT			
COV-17-S1*	NAM	2	1981/04/02	proppant	DCDT			
COV-17-S1*	NAM	3	1984/07/23	acid	ZEZ2C			
COV-18	NAM	1	1984/06/07	proppant	DCDT			
COV-19	NAM	1	1983/05/07	proppant	DCDT			
COV-19	NAM	2	1984/12/07	proppant	DCDT			
COV-20	NAM	1	1981/10/13	proppant	DCDT			
COV-20	NAM	2	1982/05/15	proppant	DCDT			
COV-20	NAM	3	1990/08/28	acid	ZEZ2C			
COV-21-S1*	NAM	1	1984/01/10	acid	ZEZ2C			
COV-21-S1*	NAM	2	1984/02/16	acid	ZEZ2C			
COV-22-S2*	NAM	1	1984/04/09	proppant	DCDT			
COV-24	NAM	1	1983/01/05	proppant	DCDT			

Blootstelling van mens en milieu aan gevaarlijke stoffen								
Verlies van integriteit van de put								
Ongewenste geochemische interacties								
Verlies van integriteit van afsluitende lagen								
Geïnduceerde seismiciteit								
Putcode	Eigenaar	#	Datum	Type	Doel			
COV-24	NAM	2	1983/07/15	proppant	DCDT			
COV-24	NAM	3	1985/09/11	acid	ZEZ2C			
COV-27	NAM	1	1984/09/27	proppant	DCHL			
COV-27	NAM	2	1984/10/29	proppant	DCHL			
COV-30-S3*	NAM	1	1984/05/07	proppant	DCDT			
COV-31	NAM	1	1984/03/05	proppant	DCDT			
COV-32-S1*	NAM	1	1984/03/26	proppant	DCDT			
COV-35	NAM	1	1986/05	acid	ZEZ2C			
COV-40	NAM	1	1996/10/02	proppant	DCDT			
COV-43	NAM	1	1985/11/22	acid	ZEZ2C			
COV-44	NAM	1	1996/04/23	proppant	DCDT			
COV-46	NAM	1	1986/08	acid	ZEZ2C			
COV-47	NAM	1	1987/06/23	acid	DCDT			
COV-47	NAM	2	1987/07/01	acid	DCDT			
COV-47	NAM	3	1987/07/09	acid	DCDT			
COV-47	NAM	4	1988/12/01	acid	DCDT			
COV-47	NAM	5	1988/12/08	acid	DCDT			
COV-47	NAM	6	1988/12/20	acid	DCDT			
COV-47	NAM	7	1988/12/22	acid	DCDT			
COV-47	NAM	8	2003/01/27	acid	ZEZ2C			
COV-49	NAM	1	1988/07/12	acid	ZEZ2C			
COV-49	NAM	2	1988/09/20	acid	ZEZ2C			
COV-49	NAM	3	1988/09/23	acid	ZEZ2C			
COV-49	NAM	4	1988/09/27	acid	ZEZ2C			
COV-49	NAM	5	1988/09/29	acid	ZEZ2C			
COV-49	NAM	6	1988/10/10	acid	ZEZ2C			
COV-52	NAM	1	1998/05/06	acid	ZEZ2C			
COV-53	NAM	1	1992/08	acid	ZEZ2C			
COV-57	NAM	1	2002/02/26	proppant	DC			
COV-57	NAM	2	2002/03/13	proppant	DC			
DAL-04	NAM	1	1980/08/15	proppant	DCDT			
DAL-05-S5*	NAM	1	1980/09/04	proppant	DCDT			
DAL-05-S5*	NAM	2	1981/05/07	acid	ZEZ2C			
DAL-06	NAM	1	1981/10	acid	ZEZ2C			
DAL-07	NAM	1	1981/12	acid	ZEZ2C			
DAL-08	NAM	1	1984/09	acid	ZEZ2C			
DAL-08	NAM	2	1992/08/10	acid	ZEZ2C			
DAL-08	NAM	3	2008/02/28	acid	ZEZ2C			
DAL-09	NAM	1	1982/11	acid	ZEZ2C			
DAL-10	NAM	1	1985/08/15	proppant	DCDT			
DAL-11-S1*	NAM	1	1986/06/19	acid	ZEZ2C			
DAL-12	NAM	1	1986/06	acid	ZEZ2C			
DAL-14	NAM	1	1987/09/10	acid	DCHL			
DAL-14	NAM	2	1990/08/24	acid	ZEZ2C			
DRM-01-S1*	NAM	1	1983/09	acid	ZEZ2C			
DVD-04	NAM	1	2015/10	proppant	DC			
DVD-04	NAM	2	2016/01/03	proppant	DC			
EMM-11-S2*	NAM	1	1981/05	proppant	ZEZ2C			
ENA-02-S1*	NAM	1	1983/07	acid	ZEZ2C			
ERW-01	VERMILION	1	1969/09/01	proppant	KNNSF			
ERW-01	VERMILION	2	1979/12/17	proppant	KNNSF			

Blootstelling van mens en milieu aan gevaarlijke stoffen									
Verlies van integriteit van de put									
Ongewenste geochemische interacties									
Verlies van integriteit van afsluitende lagen									
Geïnduceerde seismiciteit									
Putcode	Eigenaar	#	Datum	Type	Doel				
FRA-01-S1*	VERMILION	1	1997/01/14	proppant	CKGR				
GAG-05	NAM	1	1999/06/09	proppant	RBMH				
GAG-06-S1*	NAM	1	2015/02/22	proppant	RBMH				
GLH-01	NAM	1	1982/04	acid	ZEZ2C				
GRL-01	VERMILION	1	2009/06/10	proppant	DCHL				
GRW-01	VERMILION	1	1990/05/28	proppant	KNNSF				
GRW-01	VERMILION	2	1997/01	proppant	KNNSF				
GRW-02	VERMILION	1	1990/08/05	proppant	KNNSF				
GSB-01	VERMILION	1	2009/09/03	proppant	ROSL				
GSB-01	VERMILION	2	2009/09/03	proppant	DCDT				
KBB-02	NAM	1	2001/09/04	proppant	ROSLU				
KBB-02	NAM	2	2001/09/19	proppant	ROSLU				
KBB-04	NAM	1	2013/11/22	proppant	ROSLU				
KMP-03	NAM	1	2001/06/26	proppant	ROSLU				
KMP-03	NAM	2	2012/10/03	proppant	ROSLU				
KMP-04	NAM	1	2014/05/02	proppant	ROSLU				
KWR-01-S1	NAM	1	2012/11/01	proppant	ROSLU				
LEW-01	VERMILION	1	1968/08/21	proppant	KNNSF				
LEW-01	VERMILION	2	1980/04/24	proppant	KNNSF				
LEW-01	VERMILION	3	1991/05/08	proppant	KNNSF				
LEW-03	VERMILION	1	1969/03/19	proppant & acid	KNNSF				
LEW-03	VERMILION	2	1990/05	proppant	KNNSF				
LEW-07	VERMILION	1	1987/12/10	proppant	KNNSF				
LEW-08-S1*	VERMILION	1	1991/07/30	proppant	KNNSF				
LEW-10	VERMILION	1	1990/08/02	proppant	KNNSF				
LEW-11-S1*	VERMILION	1	1989/03/07	proppant	KNNSF				
LEW-12	VERMILION	1	1991/05/14	proppant	KNNSF				
LEW-13	VERMILION	1	1990/05/22	proppant	KNNSF				
LEW-14	VERMILION	1	1990/05/24	proppant	KNNSF				
LEW-15	VERMILION	1	1989/09/25	proppant	KNNSF				
LEW-16	VERMILION	1	1991/05/17	proppant	KNNSF				
LEW-101	VERMILION	1	1992/06/03	proppant	KNGLU				
LIR-01-S3*	NAM	1	1962/03/31	proppant	KNNSL				
LIR-02-S1*	NAM	1	1965/09/29	proppant	KNNSL				
LIR-04	NAM	1	1961/10/01	proppant	KNNSL				
LIR-04	NAM	2	1965/09	proppant	KNNSL				
LIR-05	NAM	1	1963/08/25	proppant	KNNSL				
LIR-05	NAM	2	1963/08/26	proppant	KNNSL				
LIR-06	NAM	1	1962/09/10	proppant	KNNSL				
LIR-06	NAM	2	1962/09/11	proppant	KNNSL				
LIR-06	NAM	3	1962/09/12	proppant	KNNSL				
LIR-07	NAM	1	1961/12/28	proppant	KNNSL				
LIR-09	NAM	1	1962/04/05	proppant	KNNSL				
LIR-09	NAM	2	1962/04/06	proppant	KNNSL				
LIR-09	NAM	3	1962/04/07	proppant	KNNSL				
LIR-10-S1*	NAM	1	1961/09/24	proppant	KNNSL				
LIR-11	NAM	1	1963/03/24	proppant	KNNSL				
LIR-11	NAM	2	1963/03/30	proppant	KNNSL				
LIR-12	NAM	1	1962/09/01	proppant	KNNSL				
LIR-12	NAM	2	1962/09/03	proppant	KNNSL				
LIR-12	NAM	3	1962/09/04	proppant	KNNSL				

Blootstelling van mens en milieu aan gevaarlijke stoffen								
Verlies van integriteit van de put								
Ongewenste geochemische interacties								
Verlies van integriteit van afsluitende lagen								
Geïnduceerde seismiteit								
Putcode	Eigenaar	#	Datum	Type	Doel			
LIR-13	NAM	1	1962/01/25	proppant	KNNSL			
LIR-13	NAM	2	1964/09	proppant	KNNSL			
LIR-16	NAM	1	1964/12	proppant	KNNSL			
LIR-19	NAM	1	1962/03	proppant	KNNSL			
LIR-20	NAM	1	1961/11/13	proppant	KNGLG			
LIR-20	NAM	2	1964/10	proppant	KNGLG			
LIR-20	NAM	3	1964/10	proppant	KNGLG			
LIR-21-S2*	NAM	1	1962/03	proppant	KNNC			
LIR-22	NAM	1	1963/10/24	proppant	KNNSL			
LIR-24-S1	NAM	1	1959/06/15	proppant	KNGLG			
LIR-25	NAM	1	1964/09	proppant	KNNSL			
LIR-26-S2*	NAM	1	1962/04/16	proppant	KNNSL			
LIR-26-S2*	NAM	2	1962/04/18	proppant	KNNSL			
LIR-27	NAM	1	1962/10/11	proppant	KNNSL			
LIR-27	NAM	2	1962/10/12	proppant	KNNSL			
LIR-27	NAM	3	1962/10/14	proppant	KNNSL			
LIR-28	NAM	1	1962/10/22	proppant	KNNSL			
LIR-28	NAM	2	1962/10/23	proppant	KNNSL			
LIR-31	NAM	1	1963/05/07	proppant	KNNSL			
LIR-32	NAM	1	1963/05	proppant	KNNSL			
LIR-33	NAM	1	1963/06	proppant	KNNSL			
LIR-34	NAM	1	1963/07/24	proppant	KNNSL			
LIR-36-S1*	NAM	1	1963/10/05	proppant	KNNSL			
LIR-38	NAM	1	1965/10	proppant	KNNSL			
LIR-38	NAM	2	1966/10	proppant	KNNSL			
LIR-39	NAM	1	1966/09	proppant	KNNSL			
LIR-40	NAM	1	1967/05	proppant	KNNSL			
LIR-41-S1*	NAM	1	1974/08	proppant	KNNSL			
LIR-42	NAM	1	1974/12	proppant	KNNSL			
LIR-43	NAM	1	1979/05	proppant	KNNSL			
LIR-44	NAM	1	1981/01	proppant	KNNSL			
LIR-48	NAM	1	1988/02	proppant	KNNSL			
LIR-49	NAM	1	1991/07	proppant	KNNSL			
LWZ-03-S1	NAM	1	2012/11/30	proppant	ROSLU			
MKZ-03	NAM	1	1997/02/07	proppant	ROSLU			
MKZ-03	NAM	2	1997/02/12	proppant	ROSLU			
MON-01	NAM	1	1957/07	proppant	KNNC			
MON-01	NAM	2	1961/12/10	proppant	KNNC			
NGA-01A	VERMILION	1	1992/06/05	proppant	KNNSF			
NGA-02-S2*	VERMILION	1	1989/09/16	proppant	KNNSF			
NGA-03	VERMILION	1	1977/05/27	proppant	KNNSF			
NGA-03	VERMILION	2	1991/05	proppant	KNNSF			
NGA-04	VERMILION	1	1978/11/29	proppant	KNNC			
NGA-04	VERMILION	2	1989/03/02	proppant	KNNC			
NGA-05	VERMILION	1	1989/09/22	proppant	KNNSF			
NGA-06	VERMILION	1	1990/08/08	proppant	KNNSF			
NGA-07	VERMILION	1	1978/11/27	proppant	KNNSF			
NGA-07	VERMILION	2	1992/06/08	proppant	KNNSF			
NGA-08	VERMILION	1	1992/06/08	proppant	KNNSF			
NGA-09	VERMILION	1	1989/02	proppant	KNNSF			
OPE-02	VERMILION	1	1990/08/11	proppant	KNNSF			

Blootstelling van mens en milieu aan gevaarlijke stoffen									
Verlies van integriteit van de put									
Ongewenste geochemische interacties									
Verlies van integriteit van afsluitende lagen									
Geïnduceerde seismiciteit									
Putcode	Eigenaar	#	Datum	Type	Doel				
OPE-05	VERMILION	1	1982/11/04	proppant	KNNSF				
OPE-05	VERMILION	2	1989/09	proppant	KNNSF				
OSH-03-S3*	NAM	1	2007/03/30	acid	ZEZ2C				
OSH-03-S3*	NAM	2	2007/05/30	acid	ZEZ2C				
OTL-01-S2*	VERMILION	1	2009/03/25	proppant	RNRO				
RSW-08	NAM	1	1985/06	acid	ZEZ2C				
RTD-10	NAM	1	1994/05/10	proppant	KNNSL				
RTD-11	NAM	1	1994/12/08	proppant	KNNSL				
RWD-01	VERMILION	1	1991/05/25	proppant	KNNSF				
RWD-02	VERMILION	1	1989/08/05	proppant	KNNSF				
SCH-580	NAM	1	1983/09	acid	ZEZ2C				
SCH-580	NAM	2	2008/10	acid	ZEZ2C				
SCH-580	NAM	3	2010/12	acid	ZEZ2C				
SCH-580	NAM	4	2011/08/03	acid	ZEZ2C				
SLN-04	NAM	1	1978/11/14	proppant	DCHL				
SLN-04	NAM	2	1981/02/11	acid	ZEZ2C				
SPG-01-S2*	VERMILION	1	1999/03/19	proppant	RNROF				
TAP-02-S1*	NAM	1	1983/10	acid	ZEZ2C				
TID-302	NAM	1	1997/12/10	proppant	ROSLU				
TID-402	NAM	1	1984/01/24	proppant	KNNSF				
TID-403	NAM	1	1982/02/16	acid	KNNSF				
TID-403	NAM	2	1983/12/15	proppant	KNNSF				
TID-501-S1*	NAM	1	1980/01/15	proppant	KNNSF				
TUM-03-S2*	NAM	1	1979/10	acid	ZEZ2C				
TVN-01	VERMILION	1	2010/12/09	proppant	RO				
WAV-08	NAM	1	1982/09	acid	ZEZ2C				
WAV-08	NAM	2	1982/11	acid	ZEZ3C				
WED-01	NAM	1	1958/08	proppant	ATWDM				
WED-01	NAM	2	1959/01	proppant	ATWDM				
WED-01	NAM	3	1962/12/04	proppant	ATWDM				
WFM-02	NAM	1	2014/03/28	proppant	ROSLU				
WRG-02	VERMILION	1	1979/12/19	proppant	KNNSF				
WRG-02	VERMILION	2	1991/05/22	proppant	KNNSF				
WTN-01-S1*	VERMILION	1	1985/05/30	proppant	KNNSF				
WTN-01-S1*	VERMILION	2	1997/03/19	proppant	KNNSF				
WWN-01-S2*	VERMILION	1	2001/08/29	proppant	RBMH				
WWN-02-S3*	VERMILION	1	2000/07/27	proppant	RNROF				
WWN-03	VERMILION	1	1999/07/16	proppant	RNROF				
WWS-01-S1*	VERMILION	1	1999/07/12	proppant	RNROF				
WYK-13	NAM	1	1974/03	acid	ZEZ2C				
WYK-17-S1*	NAM	1	1985/05/22	proppant	KNNSF				
WYK-21	NAM	1	1984/10	acid	ZEZ2C				

B. Verzoek om data over uitgevoerde fracks in putten

Ten behoeve van dit project vraagt SodM informatie op bij de huidige puteigenaars. TNO heeft op onderstaand overzicht de gewenste data opgesomd alsmede een aantal vereisten benoemd. De gewenste dataset zal lang niet bij elk boorgat in zijn geheel voorhanden zijn; de operator wordt verzocht al die documenten te leveren die de dataset zo compleet mogelijk maakt. Het betreft minimaal de gefracte putten die op de overzichtslijst worden genoemd.

Vereisten

- Voor alle verstrekte informatie moet aangegeven zijn bij welke put het hoort.
- Gegevens kunnen in originele documenten (in digitale vorm) worden verstrekt. Het is niet nodig dat de operator onderstaande gegevens uit rapporten gaat destilleren; dat doet TNO.
- Datasets die specifieke software vereisen graag vermelden.
- Bij metingen altijd relevante corresponderende gegevens vermelden (zoals tijdstip, datum, druk, temperatuur, diepte, etc).

Data

- Boorgat naam
- Periode van uitvoering
 - Tijdstip/-duur fracking
- Werkprogramma (pre-frack rapporten)
 - Frack model
 - Diepte frack-interval
 - Formatie en lithologie
 - Mechanische eigenschappen gesteente (rapport/logs)
 - Drukken (verloop)
 - Injectie rates
 - Geïnjecteerde volumes
 - Gebruikte chemicaliën (samenstelling en volumes/concentraties)
 - Proppants (volumes/weights/size)
 - Mud weights/losses
 - Completion reports
 - Milieumonitoring lucht, water, bodem
 - Humane blootstelling stoffen
- Dagelijkse frack-operatierapporten (Digital Fracture Treatment Data)
- Evaluatierapporten (post-frack rapporten) incl.
 - Meetgegevens frackoperatie (drukverloop , pump rates, etc.)
 - Samenstelling/analyses frackwater, productiewater voor en na afloop
 - Putintegriteit
 - Caprock integriteit
 - Seismische monitoring
 - Frack dimensies
 - Verwerken van naturally occurring radioactive material (NORM)
- Incidentrapporten over ongewenste en/of onverwachte gebeurtenissen (betreft alle frackgerelateerde gebeurtenissen tijdens en na afloop van de operaties)
 - Calamiteiten
 - Spills

- Gevallen van bodemverontreiniging
 - Arbeidsongevallen
- Uitgevoerde herstelwerkzaamheden
 - Herstel integriteit putten
 - Bodemsanering

C. Zoektermen gebruikt in documentanalyse

acid	fracture test	micro seismic
acid frac	gas tight	micro-annulus
annul	gas-oil	micro-seismic
annulus leaking	gas-tight	microannulus
annulus plugging	gasdicht	microseismiek
barrier	gelifie	mini frac
barriere	gelled oil	mini-frac
barst	gevaar	minifrac
benzine	giftig	monitor
beving	grondwater	mors
blootstelling	groundwater	nearby fault
breuk	groundwater monitoring	noodgeval
burst	h2s	olie
casing burst	hazard	onbeperkt
cement damage	hcl	ongecementeerd
concern	herstel	ongecontroleerd
corrosie	hf	ontruim
corrosion	high fluid loss	onverwacht
corrosive damage	high h2s	open-hole completion
cross contamination	imperfect cement	opgelost
crude oil	incident	out of zone
damage	increase annular pressure	overdruk
datafrac	increasing annulus pressure	overschrijding
dfit	injuries	plug
diesel	injury	plugged with
early screenout	integri	plugging
emergency	integrity	pollution
emergency shutdown	joint failure	poor cement
emulsie	kcl	probleem
emulsion	kerosene emulsion	problem
equipment failure	kerosine	radio active
erosie	leak	radio-active
erosion	leaking casing	radioactief
excess	leakoff test	radioactive
excessive erosion	lek	rechtgezet
excessive pressure	letsel	release
excessive proppant	loss	repair
excessive water	loss control	reparatie
excursion	loss of containment	risico
exposure	maasp excursion	risk
failure	malfunctie	risque
fault	mechanical problem	rupture
foamed	micro	sand catcher

schade	toxic	unexpected
scheur	tracer	unexpected pressure increase
schuim	tree saver	unexpected screen out
seal failure	tree-saver	verlies
seismic event	treesaver	verontrein
seismic fault	tremor	vervuil
seismic monitoring	uncemented liner	verwonding
seismisch	unconfined	vrijgekomen
severe erosion	uncontained	vroege
sour	uncontrolled	water contamination
spill	uncontrolled frac	watergel
storing	uncontrolled fracture growth	zuur
sudden pressure drop		

D. Verlies van integriteit van afsluitende lagen

De simulaties zijn uitgevoerd met de 'engineering tool' MFrac, een '*hydraulic fracturing simulator*' voor het ontwerp, analyse en monitoren van een frack operatie.

De volgende beschrijving van MFrac is gebaseerd op de gebruikersdocumentatie (MFrac Suite 12, 2018) en de TNO ervaring met het softwarepakket. In MFrac kunnen verschillende (gekoppelde) parameters, die van invloed zijn op frack propagatie en proppanttransport gemodelleerd worden. De belangrijkste frack, gesteente- en vloeistofmechanische processen die gesimuleerd worden in MFrac zijn:

- *multilayer unsymmetrical confining stress contrast;*
- *multilayer leakoff;*
- *fracture toughness and dilatancy (tip effects);*
- *variable injection rate and time dependent fluid rheology;*
- *vertical and lateral rock deformation;*
- *wall roughness and coupled proppant transport,*
- *heat transfer and fracture propagation.*

De tekortkomingen van Mfrac zijn het gevolg van de volgende aannames:

- alleen horizontale gelaagdheid,
- homogene gesteente-eigenschappen per model laag,
- van te voren gedefinieerde en simpele geometrie van het discrete fracture netwerk en
- simpele criteria voor frack initiatie en propagatie.

Het doel van de generieke simulaties is om een inschatting te maken van de mogelijke frack propagatie in de seal voor elk type gefrackte reservoir-seal combinatie in Nederland. Er is gekozen om naar conservatieve, d.w.z. 'worst-case' scenario's te kijken. Als in een worst-case scenario geen frack propagatie in de seal plaats vindt, zal dat ook niet in een ander scenario gebeuren. De aannames die van toepassing zijn op de generieke modellering simulaties zijn als volgt:

- Fracken vindt plaats bij initiële reservoirdruk.
- De frack wordt geïnitieerd in het bovenste deel van het reservoir, vlak onder de seal
- De hoogste injectie volumes en injectie snelheden per reservoir type zoals gevonden in de gescreende rapporten.
- Conservatieve (kleine) waarden voor de leakoff

Putparameters en gesteente-eigenschappen worden bepaald op basis van frack rapporten en gangbare literatuur.

De resultaten van de verschillende simulaties worden in de volgende pagina's gevisualiseerd. Er wordt per reservoir eenheid eerst een overzicht gegeven van de hoeveelheid en locatie van de fracks. Hierna volgt een overzicht van de typische karakteristieken van het reservoir en de seal en de invoer parameters gebruikt voor de simulatie. Per simulatie wordt de eventuele verticale propagatie in de seal gerapporteerd en een conclusie gegeven m.b.t. de sealintegriteit.

Tabel D3 Input data voor MFrac simulatie.

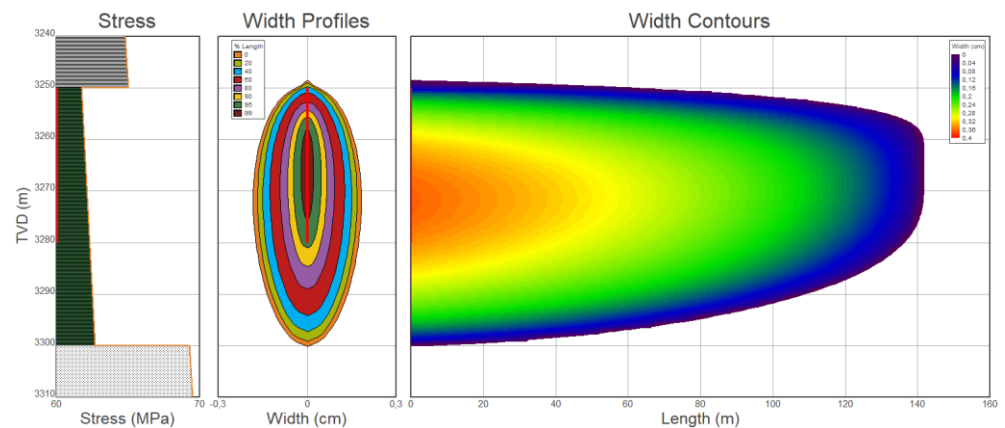
	Reservoir	Seal
Dikte (m)	50	70
Young's modulus (GPa)	19*	25*
Poisson's ratio (-)	0,28*	0,12*
Stress gradiënt (kPa/m)	19**	20**
Leak off coefficient (mm/s^{0.5})	0,05	0,01
Injectie snelheid (m³/min)	3,2	
Injectie volume (m³)	350	

* Young's modulus en Poisson's coëfficiënt voor reservoir en seal zijn representatief voor de velden Dalen en Coevorden (DHAIS, 2004)

** Stress gradiënt is verondersteld.

Tabel D4 Resultaten MFrac simulaties.

Verticale groei frac in seal (m)	1-1,5
Lengte frack (m)	140
Opmerking	Boven De Lutte Kleisteen seal ligt nog Zechstein steenzout seal van tientallen tot honderden meters dik.
Conclusie	Het risico op verlies van seal integriteit is verwaarloosbaar door de grote dikte van De Lutte Kleisteen seal en de daarboven liggende Zechstein evaporieten.

**Figuur D2** Resultaten MFrac simulatie. De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts) in het gefracte generieke Limburg Tubbergen reservoir.

2) Rotliegend (reservoir) – Ten Boer Claystone en Zechstein (seal)

Tabel D5 Gefracte velden en aantal frack operaties in Rotliegend sandstone reservoirs.

Aantal frack operaties	21* + 3**
Karakteristieke velden	Blija-Ferwerdeladeel

* Seal bestaat uit Ten Boer claystone en Zechstein evaporieten.

** Seal bestaat uit 1m-dik Coppershale en Zechstein evaporieten.



Figuur D3 Overzichtskartaal met locaties van fracks in Rotliegend reservoir.

Tabel D6 Karakteristieken van seal en reservoir.

	Lithologie	Gemiddelde dikte (m)	Dikte, min - max (m)	Diepte res. top, min – max (mTVD)	Vert. afstand res.- aquifer, minimaal (m)
Seal	Zechstein ZE Ten Boer ROCLT	> 100 72	> 100 19 - 98	n.v.t.	n.v.t.
Reservoir	Rotliegend sandstone ROSLU	87	32 - 195	2069 - 3587	1750

Tabel D7 Input data voor MFrac simulatie.

	Reservoir	Seal (Ten Boer)
Dikte (m)	80	65
Young's modulus (GPa)	19*	25*
Poisson's ratio (-)	0,23*	0,25*
Stress gradiënt (kPa/m)	16** / 17 ^{S1}	19** / 19 ^{S1}
Leak off coefficient (mm/s^{0.5})	0,05	0,01
Injectie snelheid (m³/min)	4,7	
Injectie volume (m³)	380	

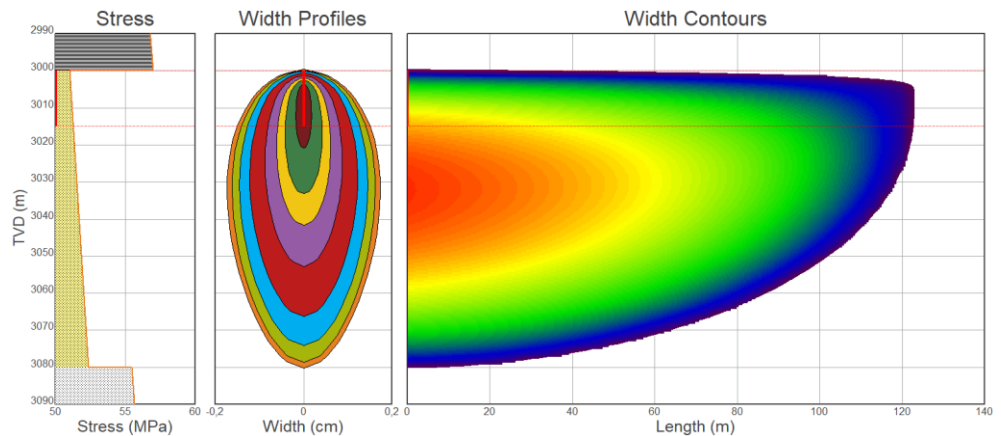
* Young's modulus en Poisson's coëfficiënt volgens DHAIS studie (DHAIS,2004). De waarde van E-Rotliegend is afhankelijk van de porositeit (E=10-20 GPa voor n=0.1-0.2) en E-Ten Boer kan ook hoger zijn (40 GPa) (Lele et al., 2015).

** De stress gradiënt voor Rotliegend reservoirs is 11-17 kPa/m, en voor Ten Boer en Zechstein is 19-22 kPa/m volgens NAM data.

^{S1} Stress gradiënt sensitiviteit analyse met hoogste gerapporteerde waarde Shmin gradient voor reservoir.

Tabel D8 Resultaten MFrac simulaties.

Verticale groei frack in seal (m)	Refentie model: 0 S1: 0.2 - 0.3
Lengte frack (m)	Refentie model: ~120 S1: ~120
Opmerking	Boven Ten Boer seal ligt nog Zechstein seal van tientallen tot honderden meters dik.
Conclusie	Risico op verlies van seal integriteit is verwaarloosbaar door de aanwezigheid van een dikke sealende laag van schalies overdekt door Zechstein evaporieten.

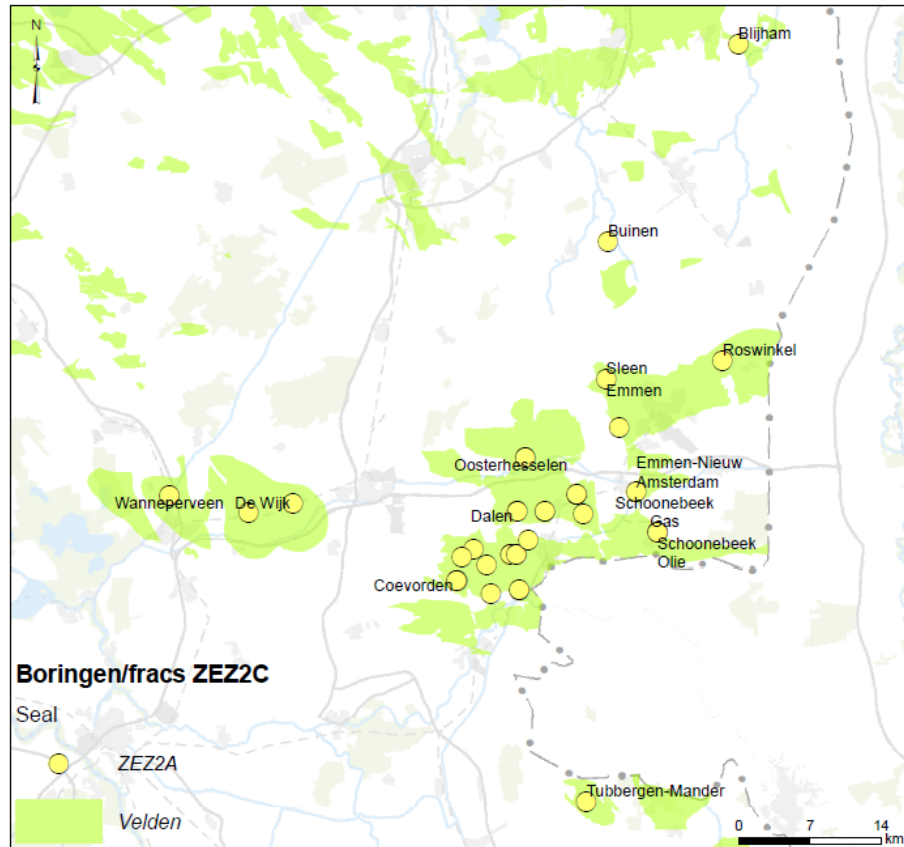
**Figuur D4** Resultaten MFrac simulatie. De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts) in het gefrackte generieke Rotliegend reservoir.

3) Zechstein Carbonaat (reservoir) – Zechstein Anhydriet (seal)

Tabel D9 Gefracte velden en aantal frack operaties in Zechstein carbonaat reservoirs.

Aantal frack operaties	53*
Karakteristieke velden	Dalen, Coevorden

* Seal bestaat uit Zechstein anhydriet en Zechstein steenzout.



Figuur D5 Overzichtskaart met locaties van fracks in Zechstein carbonaat reservoir.

Tabel D10 Karakteristieken van seal en reservoir.

	Lithologie	Gemiddelde dikte (m)	Dikte, min -max (m)	Diepte res. top, min – max (mTVD)	Vert. afstand res.- aquifer, Minimaal (m)
Seal	ZE Salt ZE Anhydriet	> 10 -100 8	> 10 -100 1 - 72	Nvt	Nvt
Reservoir	Ze Carbonaat	48	5 - 120	1710 - 3949	~1250

Tabel D11 Input data voor MFrack simulatie.

	Reservoir	Seal Anhydriet	Seal Halite (ligt boven Anhydriet)
Dikte (m)	48	8	100
Young's modulus (GPa)	30* / 45 ^{S2}	50* / 75 ^{S2}	30***
Poisson's ratio (-)	0,27*	0,29*	0,3***
Stress gradiënt (kPa/m)	19** / 20 ^{S1}	20 / 20 ^{S1}	21*** / 21 ^{S1}
Leak off coefficient (mm/s^{0.5})	0,05	0,01	0
Injectie snelheid (m³/min)	5		
Injectie volume (m³)	350		

* Young's modulus en Poisson's coëfficiënt voor reservoir en seal zijn representatief voor de velden Dalen en Coevorden (DHAI, 2004).

** Stress gradiënt in Zechstein carbonaat en anhydriet is soortgelijk 19-20 kPa/m (NAM data) en in het steenzout is iets hoger door de isotrope spanningstoestand in steenzout (~21 kPa/m).

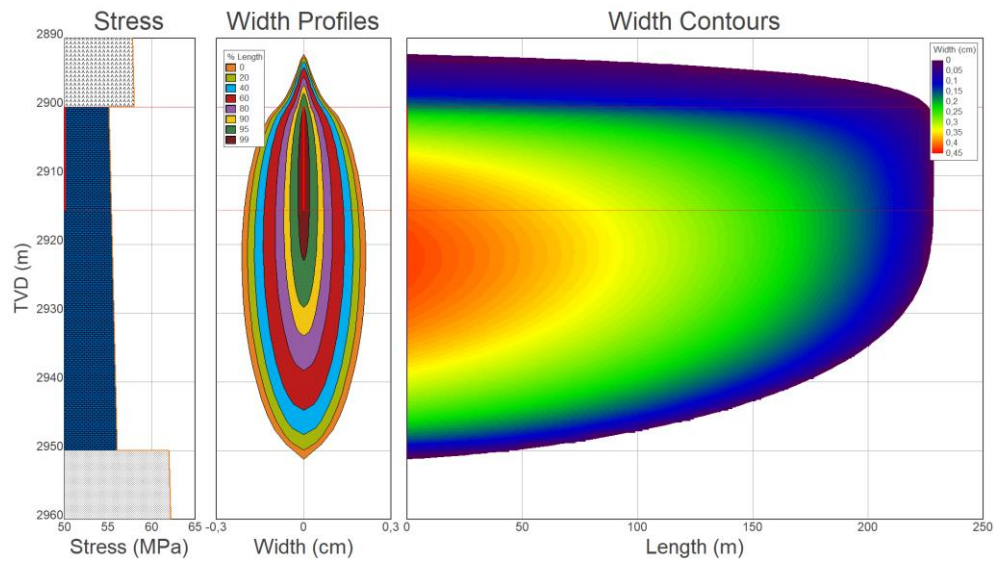
*** Young's modulus, Poisson's coëfficiënt en stress gradiënt in het steenzout (haliet) zijn goed bekend en laten weinig variatie zien (Fokker, 1995)

^{S1} Stress gradiënt sensitiviteit analyse.

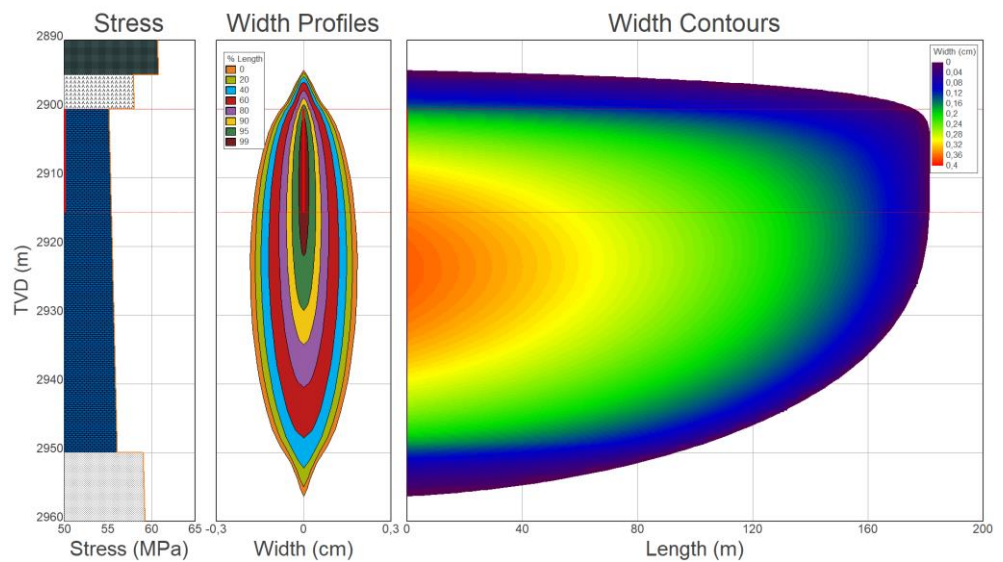
^{S2} Dynamisch modulus sensitiviteit analyse (Edyn=1.5xEstat)

Tabel D12 Resultaten MFrack simulaties.

Verticale groei frack in seal (m)	Reference case = 7 S1=12 (8 m door anhydriet + 4 m in zout) / S2= 8 (door anhydriet)
Lengte frack (m)	Reference case = ~225 S1 = ~ 250 m S2= ~175
Opmerking	Frack groeit door anhydriet laag en stopt na max enkele meters in de overliggende steenzout laag.
Conclusie	Risico op verlies van seal integriteit is zeer laag door de aanwezigheid van een dikke sealende laag van Zechstein evaporieten met steenzout.



Figuur D6 Resultaten MFrac simulatie. De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts) in het gefracte generieke Zechstein carbonaat reservoir.



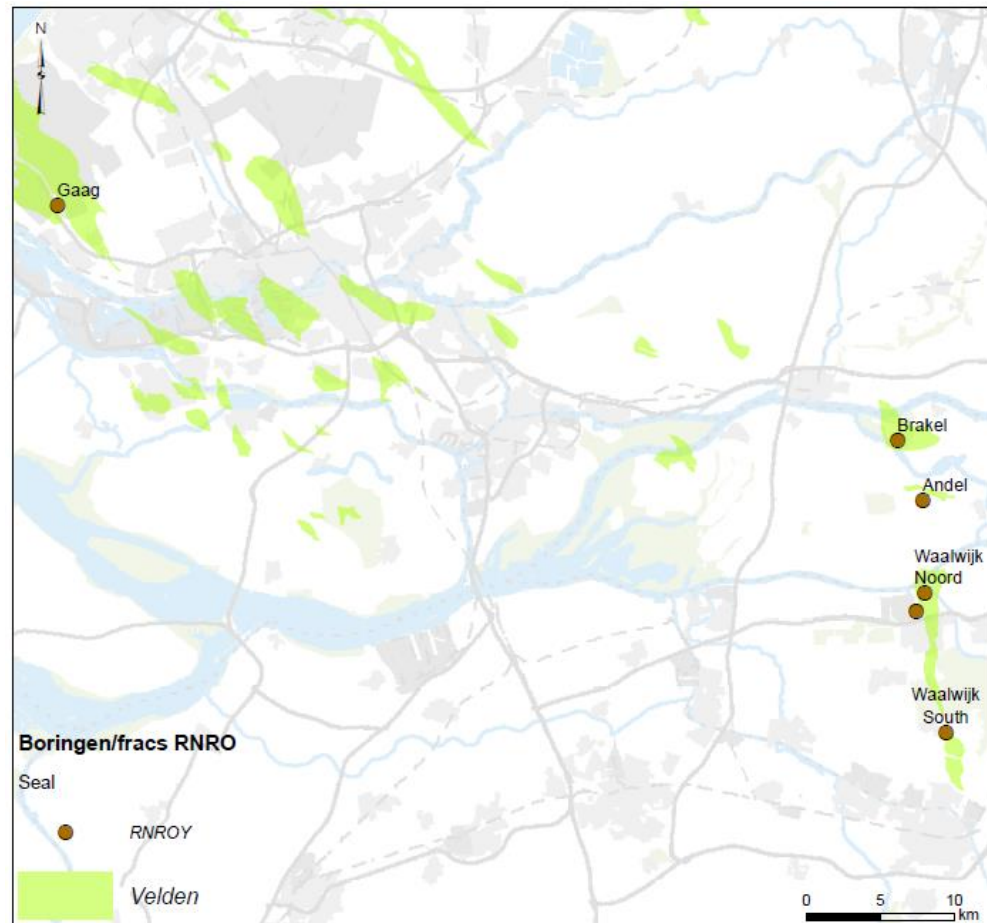
Figuur D7 Resultaten MFrac simulatie - dynamisch modulus sensitiviteit analyse S2. De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts) in het gefracte generieke Zechstein carbonaat reservoir.

4) Bunter Sandstone (reservoir) – Röt Claystone (seal)

Tabel D13 Gefrackte velden en aantal frack operaties in Bunter sandstone reservoirs.

Aantal frack operaties	11*
Karakteristieke velden	Gaag, Waalwijk Noord

* Seal bestaat uit Upper Röt Claystone.



Figuur D8 Overzichtskaart met locaties van fracks in Bunter sandstone reservoir.

Tabel D14 Karakteristieken van seal en reservoir.

	Lithologie	Gemiddelde dikte (m)	Dikte, min -max (m)	Diepte res. top, min – max (mTVD)	Vert. afstand res.- aquifer, minimaal (m)
Seal	Upper Röt Claystone	21	10-31	Nvt	Nvt
Reservoir	Röt Fringe Sand	40	24-56	2240-3700	1750

Tabel D15 Input data voor MFrac simulatie.

	Reservoir	Seal (claystone)
Dikte (m)	35	15
Young's modulus (GPa)	25*	27*
Poisson's ratio (-)	0,23*	0,25*
Stress gradiënt (kPa/m)	13** / 15 ^{S1}	16** / 16 ^{S1}
Leak off coefficient (mm/s ^{0.5})	0,05	0,01
Injectie snelheid (m ³ /min)	4	
Injectie volume (m ³)	350	

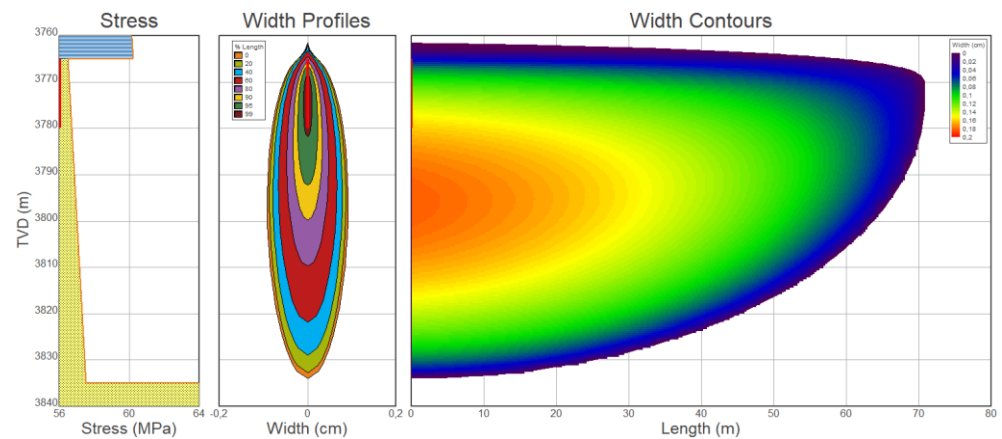
* Young's modulus en Poisson's coefficient voor reservoir en seal zijn representatief voor veld Gaag (DHAIS, 2004).

** Stress gradiënt volgens GAG-6 Post job report (NAM).

^{S1} Stress gradiënt sensitiviteit analyse met een kleiner stress contrast.

Tabel D16 Resultaten MFrac simulaties.

Verticale groei frac in seal (m)	~ 0 / 5
Lengte frac (m)	~ 70 / 120
Opmerkingen	Frack groeit in seal ~5 m maar niet door seal heen. Minimale dikte seal in gefracte putten is 10 m. Boven Röt claysone seal ligt nog Muschelkalk/Keuper seal van tientalen meters dik.
Conclusie	Risico op verlies van seal integriteit is zeer laag door de aanwezigheid van meerdere seals die op elkaar gestapeld liggen. De onderste ~5 m van de seal kan aangetast worden door een frack.



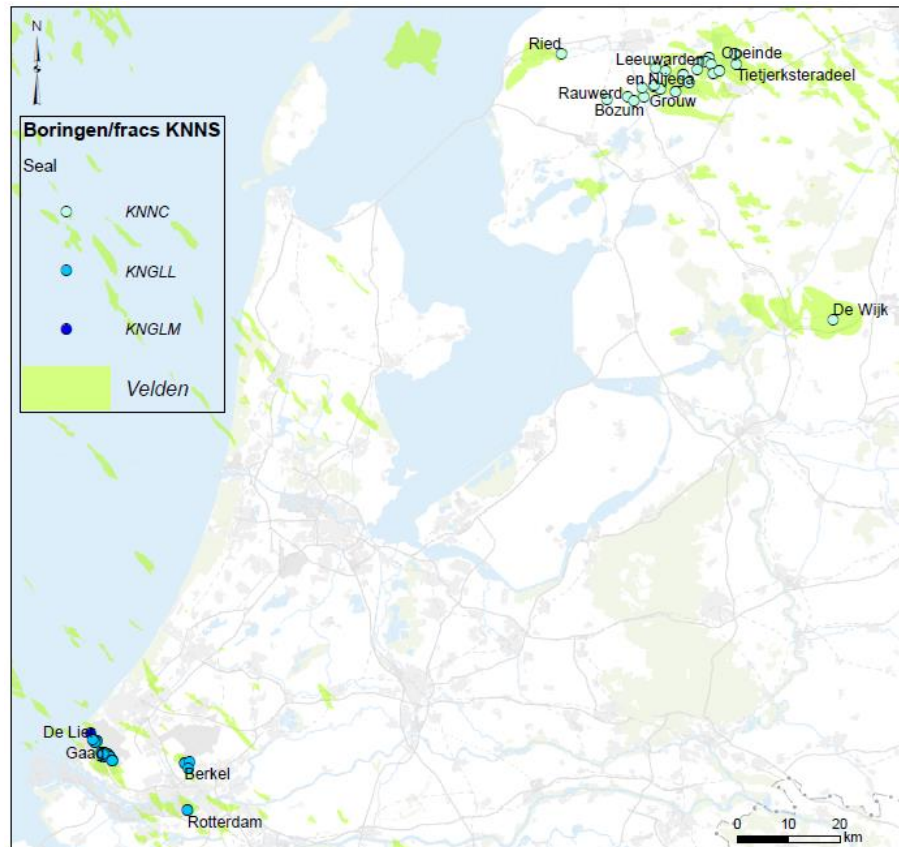
Figuur D9 Resultaten MFrac simulatie. De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts) in het gefracte generieke Bunter sandstone reservoir.

5A) Vlieland: De Lier Member (reservoir) – Marl (seal)

Tabel D17 Gefracte velden en aantal frack operaties in De Lier Mb sandstone reservoirs.

Aantal frack operaties	60*
Karakteristieke velden	De Lier, Brakel

* Seal bestaat uit Marl.



Figuur D10 Overzichtsk kaart met locaties van fracks in De Lier Sand-Shale reservoir.

Tabel D18 Karakteristieken van seal en reservoir. Stacked De Lier reservoir. Dieper De Lier Sand-Shale oil reservoir is gefract

	Lithologie	Gemiddelde dikte (m)	Dikte, min - max (m)	Diepte res. top, min – max (mTVD)	Vert. afstand res.- aquifer, mn-max (m)
Seal	Holland Marl Mb (KNGLU, KNGLM)	100	100 – 130	n.v.t.	n.v.t..
Reservoir (gas)	Holland Green-sand KNGLG	46	43-28	830-1950	~750 m
Seal	Holland Marl KNGLL	70	25-221	n.v.t.	n.v.t.
Reservoir (olie)	De Lier Sand-Shale Mb KNNSL	60	25-115	950-2100	~750 m

Tabel D19 Input data voor MFrac simulatie.

	Reservoir	Seal
Dikte (m)	60	70
Young's modulus (GPa)	19*	12*
Poisson's ratio (-)	0.25*	0.25*
Stress gradiënt (kPa/m)	16** / 17 ^S	18** / 18 ^S
Leak off coefficient (mm/s^{0.5})	0,05	0,01
Injectie snelheid (m³/min)	3.5	
Injectie volume (m³)	200	

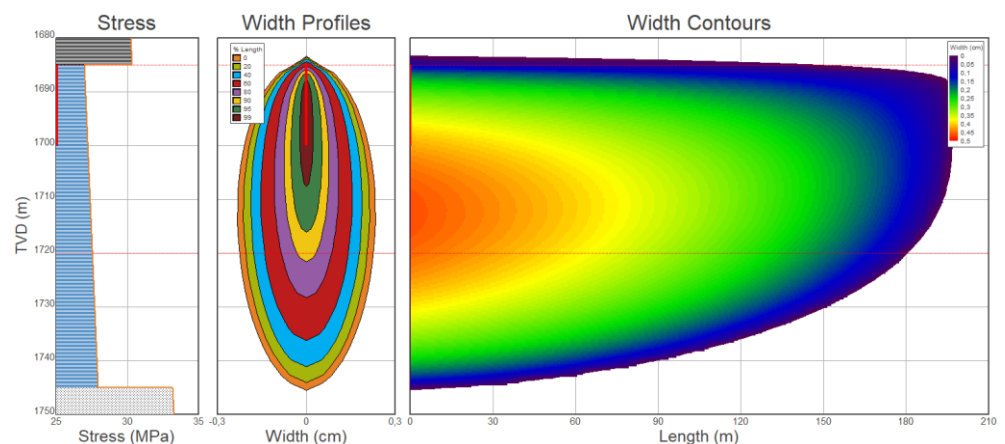
* Young's modulus en Poisson's coëfficiënt voor reservoir en seal zijn representatief voor veld Barendrecht en De Lier (DHAIS, 2004).

** Stress gradiënt volgens De Lier CO₂ storage feasibility study (TNO 2007-U-R0761, 2007; Hofstee et al, 2008).

^S Stress gradiënt sensitiviteit met een kleiner contrast in Shmin-gradiënt.

Tabel D20 Resultaten MFrac simulaties.

Verticale groei frack in seal (m)	Referentie model:~ 2 S1: ~ 6
Lengte frack (m)	Referentie model ~ 100 S1: ~160
Opmerking	Verticale propagatie in de seal is ~2 m tot 6 m, maar niet door seal heen. Minimale dikte van de Holland marl seal is 25 m en gemiddelde dikte 70 m..
Conclusie	Risico op verlies van integriteit van de Holland marl seal, tussen het diepere gefracte oil reservoir en het ondiepere gas reservoir, is laag. De onderste enkele meters van de seal kunnen aangetast worden door een frack.

**Figuur D11** Resultaten MFrac simulatie. De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts) in het gefracte generieke De Lier Sand-Shale reservoir.

5B) Vlieland: Friesland Member (reservoir) – Vlieland Claystone (seal)

Tabel D21 Gefracte velden en aantal frack operaties in Friesland Mb sandstone reservoirs.

Aantal frack operaties	51*
Karakteristieke velden	Leeuwarden, Nijega

* Seal bestaat uit Vlieland Claystone.

Tabel D22 Karakteristieken van seal en reservoir.

	Lithologie	Gemiddelde dikte (m)	Dikte, min -max (m)	Diepte res. top, min – max (mTVD)	Vert. afstand res.- aquifer, mn-max (m)
Seal	Vlieland Claystone KNNNC	127	25 - 237	Nvt	Nvt
Reservoir	Friesland Mb KNSNF	58	7 - 115	947 - 2112	700

Tabel D23 Input data voor MFrac simulatie.

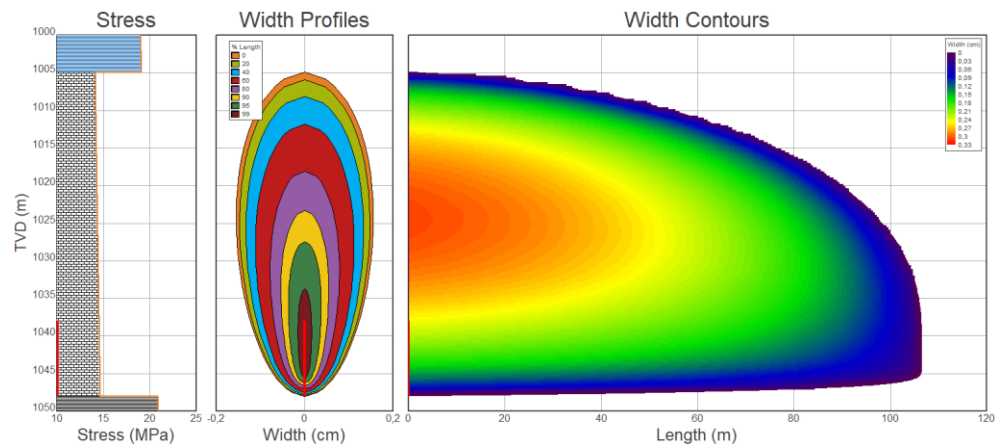
	Reservoir	Seal (claystone)
Dikte (m)	20	30
Young's modulus (GPa)	19*	12*
Poisson's ratio (-)	0,25*	0,35*
Stress gradiënt (kPa/m)	16**	17**
Leak off coefficient (mm/s^{0.5})	0,05	0,01
Injectie snelheid (m³/min)	3.5	
Injectie volume (m³)	200	

* Young's modulus en Poisson's coefficient voor reservoir en seal zijn representatief voor veld Leeuwarden (DHAIS, 2004).

** Stress gradiënt volgens NAM data.

Tabel D24 Resultaten MFrac simulaties.

Verticale groei frack in seal (m)	~ 15
Lengte frack (m)	~ 150
Opmerking	Verticale propagatie in seal van max ~15 m, maar niet door seal heen. Minimale dikte seal is 25 m en gemiddelde dikte ~75 m.. Boven Vlieland seal ligt nog Holland Marl seal.
Conclusie	Risico op verlies van seal integriteit is laag door de aanwezigheid van meerdere seals die liggen op elkaar gestapeld. De onderste ~15 m van de seal kan aangetast worden door een frack.



Figuur D12 Resultaten MFract simulatie. De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts) in het gefracte generieke Bunter sandstone reservoir.

6) Ommeland Chalk reservoir: Franeker field

Tabel D25 Gefracte velden en aantal frack operaties in Ommeland Chalk reservoirs.

Aantal frack operaties	1
Karakteristieke velden	Franeker

Tabel D26 Karakteristieken van seal en reservoir.

	Lithologie	Gemiddelde dikte (m)	Dikte, min -max (m)	Diepte res. top, min – max (mTVD)	Vert. afstand res.- aquifer, mn-max (m)
Seal	Noordzee fm. claystone	~30	n.v.t.	n.v.t	n.v.t
Reservoir	Ommeland Chalk CKGR	30	n.v.t	1030	750

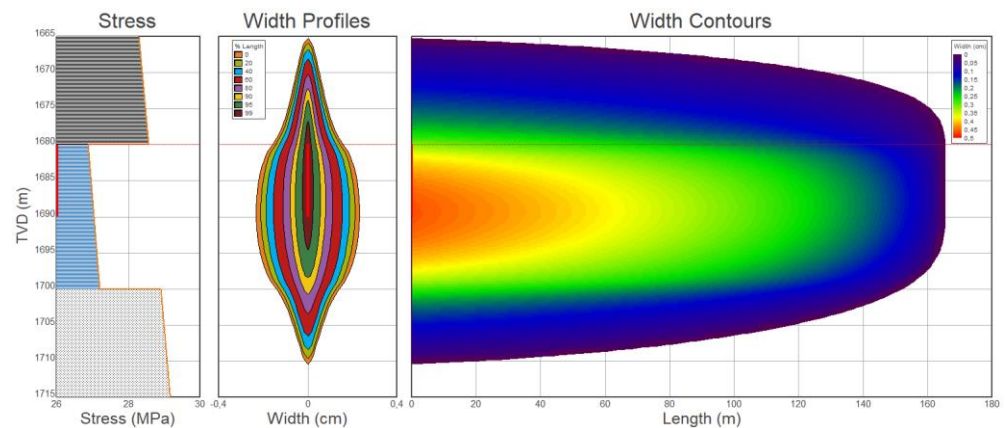
Tabel D27 Input data voor MFract simulatie.

	Reservoir	Seal (claystone)
Dikte (m)	30	30
Young's modulus (GPa)	15*	10*
Poisson's ratio (-)	0.25*	0.35*
Stress gradiënt (kPa/m)	14*	19**
Leak off coefficient (mm/s ^{0.5})	0,05	0,01
Injectie snelheid (m ³ /min)	0.79	
Injectie volume (m ³)	105	

* Young's modulus, Poisson's coefficient en stress gradient voor reservoir en seal zijn representatief voor Franeker veld, gebaseerd op post-frack analyse operator.

Tabel D28 Resultaten MFrac simulaties.

Verticale groei frack in seal (m)	~ 0,1
Lengte frack (m)	~ 105
Opmerking	Verticale frack groei in de seal in minimaal. Er zijn in geen andere chalk reservoirs een frack job gezet.
Conclusie	Risico op verlies van seal integriteit is laag gezien de minimale verticale propagatie van de frack in de seal

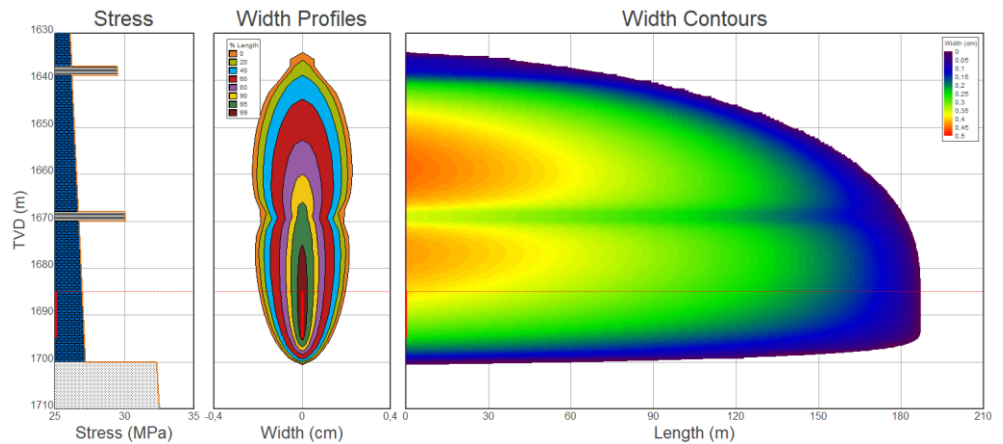
**Figuur D13** Resultaten MFrac simulatie. De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts) in het gefracte generieke Vlieland reservoir.

7) Sensitiviteitsanalyse

Hieronder wordt de input-data en resultaten gegeven van enkele simulaties die gedaan zijn om de sensitiviteit van enkele input parameters te analyseren. De resultaten worden besproken in de hoofdttekst.

Tabel D29 Input data voor MFrac simulatie.

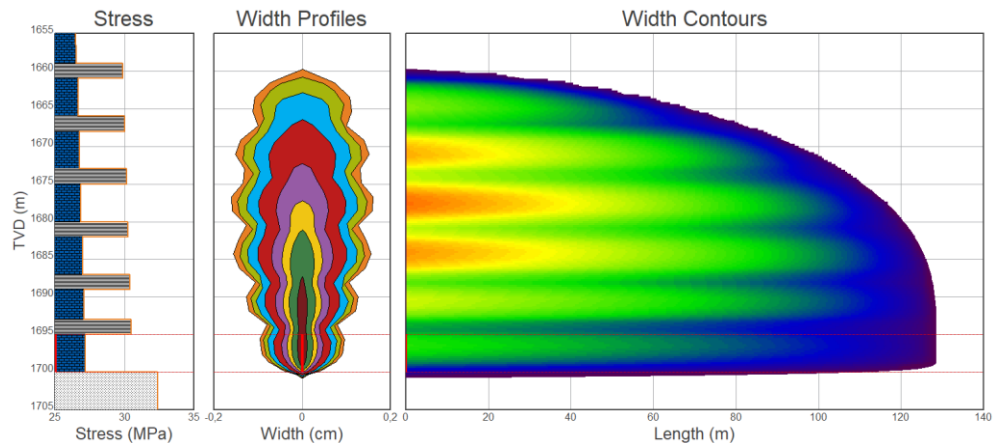
	Reservoir	Seal (schalie)
Dikte (m)	30	2
Young's modulus (GPa)	15	18
Poisson's ratio (-)	0,25	0,30
Stress gradiënt (kPa/m)	16	18
Leak off coefficient (mm/s^{0.5})	0,05	0,01
Injectie snelheid (m³/min)	2.9	
Injectie volume (m³)	150	



Figuur D14 Resultaten MFrac simulatie - Stress gradiënt variabiliteit sensitiviteit S1. De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts) in het gefracte generieke reservoir met intra-reservoir schalies.

Tabel D30 Input data voor MFrac simulatie.

	Reservoir	Seal (schalie)
Dikte (m)	5	2
Young's modulus (GPa)	15	18
Poisson's ratio (-)	0.25	0.30
Stress gradiënt (kPa/m)	16	18
Leak off coefficient (mm/s^{0.5})	0.05	0.01
Injectie snelheid (m³/min)	2.9	
Injectie volume (m³)	150	



Figuur D15 Resultaten MFrac simulatie voor het scenario met afwisselend dunne 2 meter dikke seals (stress gradiënt 18 kPa/m) en 5 meter dunne reservoir gesteente (stress gradiënt 16 kPa/m). De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts).

Minimale dikte zout

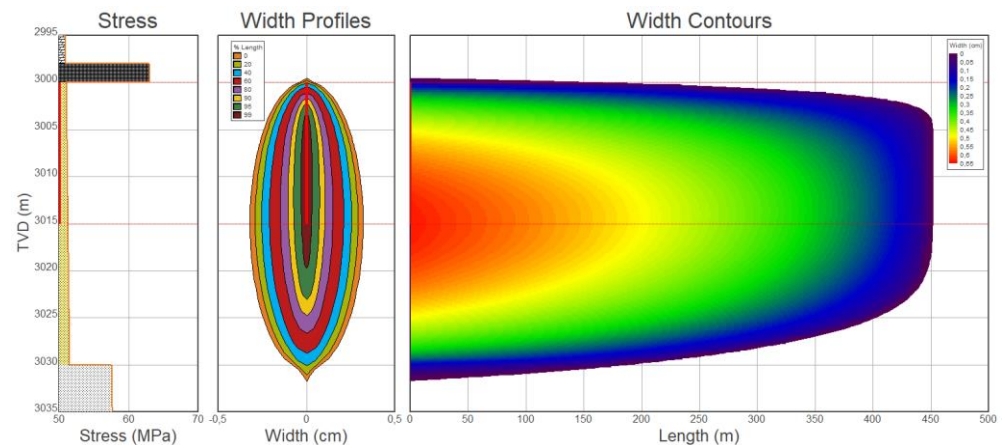
Tabel D31 Input data voor MFrac simulatie

	Reservoir (ROSL)	Seal Haliel
Dikte (m)	80	2m
Young's modulus (GPa)	19*	30***
Poisson's ratio (-)	0.23*	0.3***
Stress gradiënt (kPa/m)	17 ^{S1}	21 ^{S1}
Leak off coefficient (mm/s ^{0.5})	0.05	0
Injectie snelheid (m ³ /min)	4.7	
Injectie volume (m ³)	380	

* Young's modulus en Poisson's coëfficiënt volgens DHAIS studie (DHAIS, 2004). De waarde van E-Rotliegend is afhankelijk van de porositeit (E=10-20 GPa voor n= 0.1-0.2) en E-Ten Boer kan ook hoger zijn (40 GPa) (Lele et al., 2015).

** De stress gradiënt voor Rotliegend reservoirs is 11-17 kPa/m

*** Young's modulus, Poisson's coëfficiënt en stress gradiënt in het steenzout (haliel) zijn goed bekend en laten weinig variatie zien (Fokker, 1995)



Figuur D16 Resultaten MFrac simulatie voor het scenario met dik zandsteen reservoir (80 meter) met daarboven een 2 meter dikke zoutlaag. De minimale spanningen met de diepte (links), frack dikte (midden) en frack lengte en hoogte (rechts).

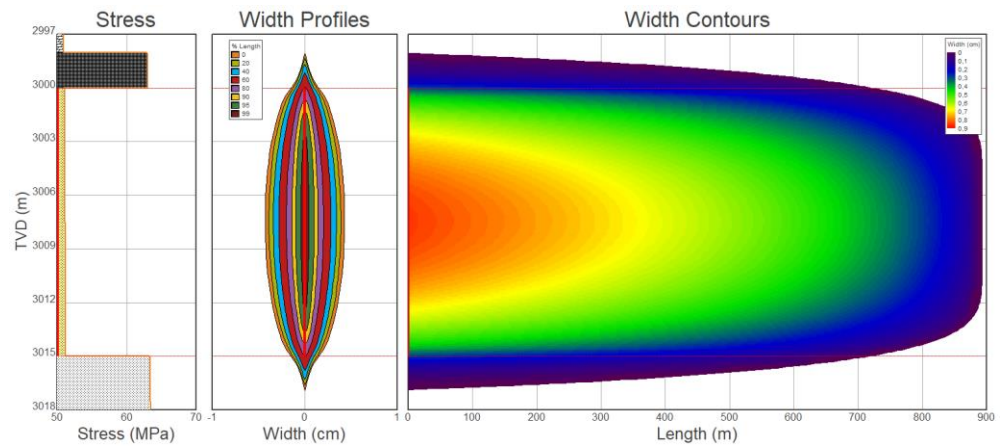
Tabel D31 Input data voor MFrac simulatie

	Reservoir (ROSL)	Seal Haliel
Dikte (m)	15	2m
Young's modulus (GPa)	19*	30***
Poisson's ratio (-)	0.23*	0.3***
Stress gradiënt (kPa/m)	17 ^{S1}	21 ^{S1}
Leak off coefficient (mm/s ^{0.5})	0.05	0
Injectie snelheid (m ³ /min)	4.7	
Injectie volume (m ³)	380	

* Young's modulus en Poisson's coëfficiënt volgens DHAIS studie (DHAIS,2004). De waarde van E-Rotliegend is afhankelijk van de porositeit (E=10-20 GPa voor n= 0.1-0.2) en E-Ten Boer kan ook hoger zijn (40 GPa) (Lele et al., 2015).

** De stress gradiënt voor Rotliegend reservoirs is 11-17 kPa/m,

*** Young's modulus, Poisson's coëfficiënt en stress gradiënt in het steenzout (haliel) zijn goed bekend en laten weinig variatie zien (Fokker, 1995)



E. Chemische additieven bij frackoperaties

Hulpstoffen in de vorm van chemicaliën die het frackproces efficiënt maken. Het onderstaand overzicht bevat een karakterisering, hun functie en geeft voorbeelden van de toegepaste chemicaliën (SodM, 2016):

Karakterisering	Voorbeelden van toegepaste chemische stoffen	Functie
Opvulmiddel	Zand (proppant)	Houdt verbeterde olie en/of gas toestroom in stand
Gel-polymeren	Natuurlijke organische macromoleculen (Guar Gum)	Voor een goed transport van het opvulmiddel zand; de vloeistof gaat als drager fungeren voor het te plaatsen zand
Gel stabilisatoren	Natriumchloride	Houdt de gel in stand
Biociden	Glutaraldehyde	Voorkomt groei van bacteriën
Gel brekers	Zuren en/of oxidatie- middelen	Verlaagt de viscositeit van de vloeistoffen zodat deze, na afzetting van het opvulmiddel zand, terug geproduceerd kunnen worden
Cross-linkers	Boraatzouten	Verhoogt de viscositeit zodat meer opvulmiddel in de scheuren gevoerd kan worden
Zuren	Citroenzuur of mierenzuur Azijnzuur Zoutzuur	Voorkomt neerslagen (metaaloxiden) en het oplossen van mineralen
Fluid-Loss-Additieven	Zand/ leem	Voorkomt eventuele verliezen naar het formatie gesteente
Smeermiddelen	Polymeren, poly-acryl- amiden	Verlaagt de wrijving tijdens het pompen van de vloeistoffen
Surfactant / Oppervlakte-spanningsverlagers	Alcoholethoxylaten	Zorgt voor een zo laag mogelijke oppervlaktetensioning tussen het gesteente en de vloeistof, zorgt ervoor dat de weerstand voor het inpompen en weer uitstromen zo gunstig mogelijk is
Zuurgraad (pH) stabilisatoren	Natriumcarbonaat / Kaliumcarbonaat	Houdt een juiste zuurgraad in stand (buffering)

14 Ondertekening

Utrecht, 11 september 2018

TNO-AGE

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J.A.J. Zegwaard', written over a light blue rectangular background.

Drs. J.A.J. Zegwaard
Hoofd Adviesgroep Economische Zaken