

Evaluatiemethodiek voor geothermie projecten

# Bepaling integriteit afdichtende gesteentepakketten voor geothermieprojecten in Nederland

### Alle rechten voorbehouden

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

© 2023 TNO

Auteurs	Harmen Mijnlief (TNO-AGE) Chris Maaijwee (TNO-AGE)
Rubricering rapport	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Aantal pagina's	28 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0

# Inhoudsopgave

Inhoudsopgave .....	3
1 Inleiding.....	4
1.1 Aanleiding.....	5
1.2 Leeswijzer .....	6
1.3 Begrippen, Definities en Uitleg.....	6
2 Kaders .....	10
2.1 Juridisch- en beleidskader .....	10
2.1.1 Vergunningskader .....	11
2.1.2 Voorgaande procedures.....	11
2.1.3 Normstelling .....	12
2.2 Dreiging, kans en risico.....	12
2.2.1 Dreiging integriteitsverlies .....	12
2.2.2 Kans integriteitsverlies van afsluitende gesteentepakketten .....	12
2.2.3 Risico integriteitsverlies van afsluitende gesteentepakketten.....	13
2.3 Technisch kader .....	13
2.3.1 Bepalen van integriteitsverlies bij geothermie.....	13
3 Implementatie TAS-procedure.....	18
3.1 Methodiek.....	18
3.1.1 Niveau 1: Generieke screening.....	19
3.1.2 Niveau 2: Generieke evaluatie .....	20
3.2 Niveau 3: Detail evaluatie.....	27
3.2.1 Evaluatie met analytische scheurgroei simulatiesoftware.....	27
3.2.2 Evaluatie met een numeriek model.....	28
4 Referenties .....	29

# 1 Inleiding

Geothermie, of aardwarmtewinning, is de winning van warmte die is opgeslagen in de gesteentepakketten in de ondergrond. Aan geothermie zijn wettelijke eisen verbonden die gezamenlijk staan beschreven in de Mijnbouwwet (Mbw), het Mijnbouwbesluit (Mbb) en de Mijnbouwregeling (Mbr). Deze eisen moeten de veiligheid van geothermie waarborgen. Het gesteentepakket waaruit warmte wordt gewonnen bevat over het algemeen formatiewater. Een typisch Nederlands geothermiesysteem haalt warmte uit een gesteentepakket door het formatiewater op te pompen, af te koelen en vervolgens weer in het gesteentepakket te injecteren. De wet vereist dat formatiewater uitsluitend in het gesteentepakket terechtkomt van waaruit het geproduceerd is. Als het gesteentepakket poreus en doorlatend is, kan het formatiewater zich binnen dat pakket verplaatsen. Boven- en onderliggende afdichtende gesteentepakketten zorgen ervoor dat het formatiewater niet door deze pakketten naar andere reservoirs kan verplaatsen.

Onder invloed van geothermie veranderen lokaal de temperatuur en druk van de gesteentepakketten. Deze veranderingen kunnen ervoor zorgen dat de integriteit van het gesteente wordt aangetast. Het verlies van integriteit wordt veroorzaakt door scheurvorming of bewegingen langs bestaande breuken. Als afdichtende gesteentepakketten hun integriteit verliezen, kan formatiewater zich verplaatsen naar diepere- of ondiepere lagen. Daar kan het schade aanrichten aan milieu en drinkwatervoorraden, of kan het de huidige en toekomstige winning van delfstoffen of geothermie negatief beïnvloeden.

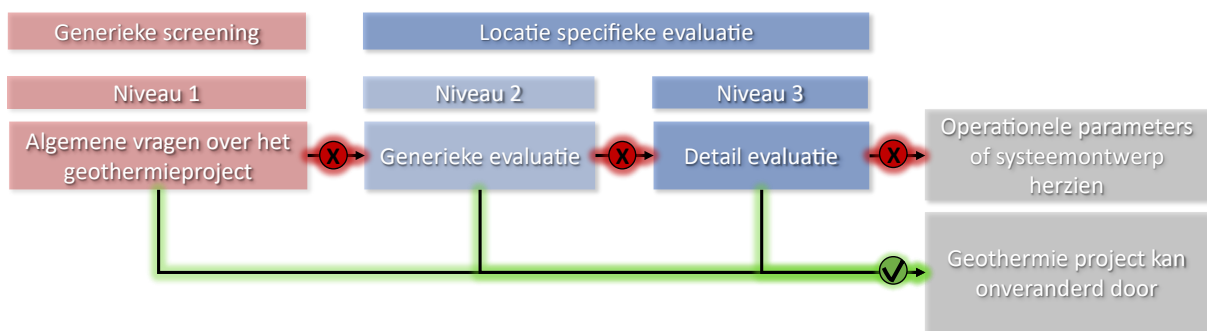
In het Mbb staat dat de minister vergunningen mag afwijzen als “*de integriteit van de afsluitende aardlagen niet voldoende is geborgd*” (Mbb artikel 29q lid 1c en 29t lid 1c). In de brief van EZK aan TNO-AGE dd. 18 september 2023 staat de norm voor integriteit afdichtend pakket verwoord (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2023).

De rapportage hieronder beschrijft de procedure die gevolgd kan worden om de dreiging op integriteitsverlies van de afdichtende gesteentepakketten als gevolg van geothermie te kwantificeren. De procedure heeft de naam TAS, dat staat voor de Engelse termen Tensile failure Assessment of the Seal. De TAS-procedure geeft invulling aan de vereisten die de Mbw, Mbb en Mbr aan geothermie stellen; als na de TAS-procedure blijkt dat geothermie binnen de normstelling blijft, wordt aan de wettelijke vereisten voldaan.

De TAS-procedure bestaat uit een aantal stappen, of niveaus, die worden doorlopen voor elk geothermieproject. Afhankelijk van de toepassing en de lokale situatie moeten meer niveaus worden doorlopen, maar een generieke screening vindt altijd plaats. Als hieruit blijkt dat gedetailleerd onderzoek nodig is, volgt een locatie-specifieke evaluatie. De gehele TAS-procedure bestaat uit drie niveaus (zie Figuur 1-1). Als de uitkomst van een niveau positief is, hoeft het daaropvolgende niveau niet uitgevoerd te worden en is de integriteit van de seal gewaarborgd.

In dit document ligt de nadruk op de beschrijving van niveau-1 en -2 van de TAS-procedure. TNO-AGE heeft voor niveau-2 een software tool ontwikkeld met de naam SRIMA (wat in het Engels staat voor Seal and Reservoir Integrity through Mechanical Analysis). Aan de hand van kansberekening berekent SRIMA of de integriteit van de afdichtende gesteentepakketten voldoende gewaarborgd blijft onder opgelegde operationele condities. De tool toetst daartoe de uitkomsten van de berekeningen aan een opgegeven norm voor integriteit van de afdichtende gesteentepakketten.

Als de TAS-procedure is doorlopen en het geothermieproject aan de norm voldoet, volgt de procedure Seismische Dreiging en Risico Analyse (SDRA)<sup>1</sup>. Deze procedure wordt gedetailleerd beschreven in het rapport Seismische Dreigings- en Risicoanalyse voor geothermieprojecten in Nederland (TNO-AGE & EBN, 2023c). De SRIMA-tool wordt ook voor deze procedure toegepast.



Figuur 1-1: Beschrijving van de drie niveaus van de TAS-procedure. Als een van de drie niveaus een negatieve uitkomst geeft hoeft de procedure niet in zijn geheel uitgevoerd te worden. Een geothermiesysteem kan dan met andere operationele parameters de procedure opnieuw in.

## 1.1 Aanleiding

Om de integriteit afdichtende gesteentepakketten te waarborgen kan het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) voorwaarden opleggen die de operationele parameters van een geothermiesysteem (o.a. injectiedruk en -temperatuur) limiteren. Dit gebeurt door voorschriften op te nemen in de besluiten en vergunningen.

In 2013 is een injectieprotocol (SodM & TNO-AGE, 2013) opgesteld. Aan de hand van dit injectieprotocol kon de integriteit afdichtende gesteentepakketten worden gewaarborgd. Zolang de opgelegde druk op het reservoir beneden een bepaald niveau bleef, zou er geen scheurvorming plaatsvinden in de afsluitende lagen. Hierbij werd de voorwaarde opgenomen dat het temperatuurverschil tussen de originele reservoirtemperatuur bij de injectieput en de temperatuur van het injectiewater niet meer dan 40 °C mocht zijn. Bij hogere temperatuurverschillen moest de uitvoerder van een geothermiesysteem extra onderbouwing aanleveren over de integriteit van de afsluitende laag. EZK heeft dit injectieprotocol gebruikt als leidende maatstaf voor zijn besluiten.

Destijds lag het temperatuurverschil tussen de productie- en injectieput bij de meeste geothermiesystemen veel lager dan 40 °C. De laatste jaren zijn bestaande en nieuwe systemen veel effectiever en doelmatiger en is het temperatuurverschil vaak hoger. Hierdoor bleek het protocol vaker niet meer toepasbaar. Nieuwe geothermiesystemen liggen steeds meer in gebieden met een relatief lage reservoirkwaliteit. Om met deze systemen voldoende warmte te produceren, zijn ook hogere injectiedrukken nodig; vaak hoger dan het maximum van het injectieprotocol. Volgens het injectieprotocol moest in al deze gevallen extra onderbouwing worden aangeleverd, maar hiervoor waren geen richtlijnen voor de aanpak, inhoud en uitkomsten beschreven. De resulterende onduidelijkheid vormde de aanleiding om het injectieprotocol uit 2013 te herzien.

Het doel van de herziening was de ontwikkeling van nieuwe software die aansluit op de operationele eigenschappen van huidige en toekomstige geothermiesystemen. Deze

<sup>1</sup> SDRA is in het Engels SHRA, Seismic Hazard and Risk Analysis

software moet een maximale injectiedruk geven die getoetst kan worden aan een nieuwe norm. Hierdoor kan geothermiewinning plaatsvinden op een veilige en verantwoorde wijze voor mens, natuur en milieu.

## 1.2 Leeswijzer

Dit document beschrijft de achtergrond en toepassing van de TAS-procedure. De kaders vanuit het juridische- en beleidsdomein worden ook belicht. Daarnaast wordt de wetenschappelijke basis uitgelegd. Hiervoor moeten verschillende geologische processen beschreven worden en is het gebruik van specifieke terminologie nodig. Daarom worden eerst enkele abstracte begrippen verklaard en gedefinieerd.

## 1.3 Begrippen, Definities en Uitleg

### Afdichtend gesteentepakket

Synoniemen voor een afdichtend gesteentepakket zijn aquitard of deklaag. De Engelse term “seal” wordt ook vaak gebruikt. In dit document is een afdichtend gesteentepakket ondoorlatend voor water. Dit pakket vormt als zodanig een barrière voor stroming naar boven- of onderliggende gesteentepakketten. De samenstelling van het pakket kan variëren, maar doorgaans bestaat deze hoofdzakelijk uit klei, steenzout, of fijnkorrelige kalksteen. SodM heeft een opsomming gemaakt over hoe een afdichtend gesteentepakket adequaat beschreven kan worden (SodM, 2020).

### Reservoir

De term reservoir kan op ten minste twee verschillende manieren worden omschreven. Hieronder volgen de omschrijvingen die van toepassing zijn op een geothermisch reservoir.

Omschrijving 1: Een watervoerend gesteentepakket waaruit formatiewater geproduceerd kan worden.

Omschrijving 2: De combinatie van een watervoerend gesteentepakket met de onder- en bovenliggende afsluitende gesteentepakketten. Het reservoir is volgens deze omschrijving als een vat: de ruimte waarin het water is opgeslagen en de wand van het vat die ervoor zorgt dat het water in het vat blijft.

Beide omschrijvingen zijn correct, maar in dit document wordt de term reservoir gebruikt volgens omschrijving 1.

### Formatiewater

Formatiewater is het water dat van nature aanwezig is in de poriën van een gesteentepakket. Formatiewater wordt ook wel geothermisch water genoemd. Als formatiewater zich in een reservoir bevindt kan het ook aangeduid worden als reservoirvloeistof. In de diepe ondergrond heeft dit water typisch een hoog zoutgehalte.

In dit document wordt de term formatiewater gebruikt in referentie naar het water dat zich in de poriën van een reservoir bevindt.

## Koudwaterbel

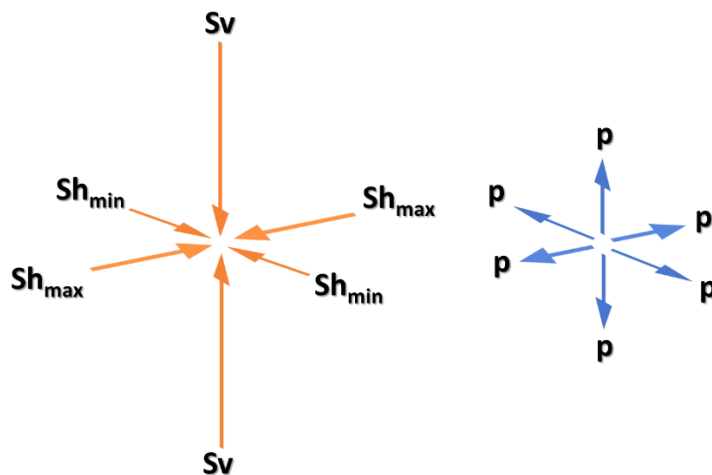
Een koudwaterbel is het gesteentevolume waarbinnen het formatiewater is afgekoeld als gevolg van koudwaterinjectie. Dit volume beperkt zich in de hoogte tot de dikte van het geothermisch reservoir.

## Ondergrondse mechanische spanningen

In de ondergrond wordt vanuit verschillende richtingen kracht uitgeoefend op gesteentepakketten. Deze kracht resulteert in mechanische spanningen (in het Engels *stresses*), ook wel spanningsregime of spanningstoestand genoemd. Dit regime is het makkelijkst te beschrijven met drie loodrecht op elkaar staande hoofdspansingen: De verticale spanning ( $S_v$ ), de minimale horizontale spanning ( $S_{h_{min}}$ ) en de maximale horizontale spanning ( $S_{h_{max}}$ ) (zie Figuur 1-2).

Geologen omschrijven het spanningsregime van de Nederlandse regionale ondergrond als normaal (zie bijvoorbeeld (Worum & Michon, 2005), (Mechelse, 2017) en (De Jager, 2007)). In een normaal spanningsregime is de verticale spanning het grootst. Voor een dieper gelegen gesteentepakket is deze spanning het directe gevolg van het gewicht van alle bovenliggende gesteentelagen. De minimale- en maximale horizontale spanning zijn, in de Nederlandse situatie dus doorgaans kleiner en hun oriëntatie wordt bepaald door regionale grootschalige bewegingen van de aardkorst. De richting van de maximale horizontale spanning is in Nederland gemiddeld genomen NW-ZO (een strekking van  $135^\circ$  (Mechelse, 2017)). Omdat de hoofdspansingen loodrecht op elkaar staan, is daarmee ook de gemiddelde richting van de minimale horizontale spanning bekend. Lokaal kan de richting van de horizontale spanningen variëren.

De grootte van de spanningen neemt toe met de diepte. Deze toename kan worden beschreven met spanningsgradiënten. De grootte kan ook verschillen per regio. De Roerdalslenk is bijvoorbeeld een regio met relatief grote ondergrondse spanningen.



Figuur 1-2: Links) De drie hoofdcomponenten van ondergrondse spanning op een willekeurig referentiepunt in de ondergrond: De verticale spanning,  $S_v$ , de minimale horizontale spanning,  $S_{h_{min}}$  en de maximale horizontale spanning  $S_{h_{max}}$ . De lengte van de pijlen geven het onderlinge verschil aan in spanningsgrootte zoals deze in de Nederlandse ondergrond heerst. Deze specifieke situatie wordt door geologen omschreven als een normaal spanningsregime. Rechts) De poriëndruk,  $p$ , op een willekeurig referentiepunt in de ondergrond wordt in een goed doorlatend gesteentepakket bepaald door de bovenliggende waterkolom. De grootte van deze spanning is gelijk in alle richtingen.

## Poriënwaterspanning of poriëndruk

De poriëndruk is de druk die uitgeoefend wordt door de vloeistoffen in de poriën van een gesteentepakket. In een goed doorlatend gesteentepakket is de poriëndruk van nature ongeveer gelijk aan de hydrostatische druk en op het referentiepunt is de poriëndruk,  $p$ , in alle richtingen gelijk. De druk wordt veroorzaakt door de massa van de bovenliggende waterkolom (de verticale afstand tussen het referentiepunt tot de grondwaterspiegel). Injectie van formatiewater zorgt ervoor dat de poriëndruk rondom het punt van injectie hoger wordt, productie zorgt omgekeerd voor een verlaging van de poriëndruk.

## Schuifspanning

Schuifspanning is een spanning die het gesteente vervormt zonder het volume te veranderen. De schuifspanningsvector staat parallel aan het breukvlak.

## Integriteitsverlies afdichtend gesteentepakket

Een afdichtend gesteentepakket kan als gevolg van geothermie zijn integriteit verliezen. Dit kan op twee manieren gebeuren:

1. Spanningsveranderingen treden op als gevolg van afkoeling van het reservoir en verhoogde poriëndruk. Door convectie verplaatst deze afkoeling en verhoogde poriëndruk zich naar de afdichtende gesteentepakketten en treden ook hier spanningsveranderingen op. Afkoeling en verhoogde poriëndruk leiden tot rekspanningen en als deze groot genoeg zijn, kan scheurvorming optreden. Een scheur met een hoogte die groter of gelijk is aan de dikte van het afdichtende gesteentepakket kan ervoor zorgen dat formatiewater uit het reservoir kan ontsnappen naar boven- of onderliggende reservoirs.
2. De spanningsveranderingen als gevolg van afkoeling en verhoogde poriëndruk kunnen er ook voor zorgen dat bestaande breuken actief worden en het gesteente langs het breukvlak gaat bewegen. Als die beweging zich uitstrekt over de gehele dikte van de afdichtende gesteentepakketten zou er sprake kunnen zijn van integriteitsverlies. Mogelijk kan er op het moment dat de gesteenten aan weerszijde van de breuk bewegen, in ieder geval tijdelijk, formatiewater door het bewegende breuksegment stromen en ontsnappen naar boven- of onderliggende watervoerende gesteentepakketten.

## Convectie

Convectie is de verplaatsing van warmte door stroming van een gas of vloeistof door een poreus en permeabel medium. In het geval van geothermie is de vloeistof formatiewater. Convectie is een combinatie van de processen advectie en diffusie.

## Diffusie

Met de term diffusie wordt gerefereerd naar de verplaatsing van deeltjes van een gas, vloeistof of vaste stof van een regio naar een andere. Diffusie treedt op als er een verschil is tussen bijvoorbeeld de druk of de temperatuur in verschillende regio's.

## (Warmte) conductie

Conductie is het proces waarbij warmte zich verplaatst van een hetere naar een koelere regio zonder stroming van formatiewater. Diffusie is een component van conductie.



## (Warmte) Advectie

In de geothermische context is advectie het verplaatsen van warmte door de stroming van een formatiewater. Advectie vanuit het reservoir naar de afdichtende gesteentepakketten is nagenoeg niet mogelijk, diffusie daarentegen wel.

## Deterministische uitkomst

De deterministische uitkomst is de uitkomst die volgt uit de berekening met constante (in deze definitie de meest waarschijnlijke) invoerparameters. De uitkomst van de deterministische berekening hoeft echter niet de meest waarschijnlijke uitkomst te zijn. De meest waarschijnlijke uitkomst moet bepaald worden aan de hand van een stochastische berekening.

## Stochastisch model

Een stochastisch model is een middel om de waarschijnlijkheid van mogelijke uitkomsten van een of meerdere berekeningen te bepalen. Een stochastisch model voert dezelfde berekening meerdere keren uit, maar gebruikt hiervoor invoer die willekeurig varieert binnen opgegeven onzekerheidsbandbreedtes. Elke individuele berekening wordt een realisatie genoemd. Het resultaat is een kansdichtheidsfunctie.

## Matrix-permeabele reservoirs

Matrix-permeabele reservoirs zijn doorlatend omdat de poriën tussen de korrels waaruit het reservoir is opgebouwd met elkaar verbonden zijn en een groot netwerk vormen waar formatiewater doorheen kan stromen. Dit wordt matrix permeabiliteit, of primaire permeabiliteit, genoemd. Secundaire permeabiliteit is de doorlatendheid die gerelateerd is aan verbreking of karstificatie en kan dus niet gezien worden als matrix permeabiliteit. De term permeabiliteit kan in geologische zin zowel primaire- als secundaire permeabiliteit omvatten.

## Breuk/verwering-permeabele reservoirs

Breuk-permeabele reservoirs zijn doorlatend omdat het gesteentepakket is doorsneden met scheuren en of breuken. Die scheuren en breuken kunnen met elkaar verbonden zijn in een netwerk. Als ze een beetje open staan kan formatiewater door het netwerk stromen. Dit wordt breukpermeabiliteit genoemd. Het gesteente waarin breukpermeabiliteit prominent is, is van zichzelf (dus buiten de breuken of scheuren) vaak niet tot slecht doorlatend.

Oplossing van gesteente, karstificatie, kan de permeabiliteit ook vergroten. Onder invloed van bijvoorbeeld zoet regenwater, dat indringt in de ondergrond, wordt het gesteente aldaar opgelost. Holtes, heel soms zo groot als grotten, die hierbij kunnen ontstaan resulteren in permeabiliteit. Karst- en breukpermeabiliteit kunnen worden aangeduid als secundaire permeabiliteit.

## 2 Kaders

In de Mbw, het onderliggend Mbb en de Mbr worden randvoorwaarden en rapportageverplichtingen bij het aanvragen van vergunningen gedefinieerd. Hieronder valt ook borging van de integriteit van de afdichtende gesteentepakketten met behulp van een analyse van de integriteit. De uitkomst van de analyse heeft directe gevolgen voor de operationele condities voor het geothermieproject. Zo kunnen door de minister bijvoorbeeld beperkingen worden opgelegd aan injectiedruk, debiet en injectietemperatuur.

De analyse van de integriteit van de afdichtende gesteentepakketten is daarnaast belangrijk in de communicatie met andere betrokken partijen zoals decentrale overheden en de lokale bewoners.

Tenslotte heeft de integriteitsanalyse ook een algemeen belang. Over de onderliggende processen en de beïnvloedende factoren is nog relatief weinig bekend. Dergelijke analyses vergroten de kennis en begrip van de ondergrond. Om de analyse goed uit te kunnen voeren, is het nodig nieuwe gegevens te verzamelen. Hoe meer gegevens van de ondergrond beschikbaar zijn, hoe beter het begrip van de ondergrond. Met dat begrip kunnen betere modellen van de ondergrond gemaakt worden en kan beter voorspeld worden hoe de ondergrond reageert op menselijk handelen.

### 2.1 Juridisch- en beleidskader

In het Mbb staat in artikel 29q, lid 1c en 29t, lid 1c dat de integriteit van het afdichtende gesteentepakket zowel aan de boven- als onderzijde van het reservoir voldoende gewaarborgd moet worden en dat onze Minister een aanvraag voor een start- en vervolgv vergunning in ieder geval geheel of gedeeltelijk kan afwijzen indien de integriteit van de afsluitende lagen niet voldoende is geborgd.

In de memorie van toelichting (§2.4, p20) is het volgende gesteld over de Integriteit van de afdichtende gesteentepakketten:

*“Een van de uitgangspunten bij het veilig en verantwoord terugvoeren van formatiewater in het geothermie reservoirinterval is de integriteit van de afsluitende aardlagen. Dat houdt in dat scheurvorming zodanig beperkt blijft dat de afsluitende werking van de zich onder en boven het reservoirinterval bevindende afsluitende pakketten integer blijft. Hiermee wordt in principe voorkomen dat, tijdens en na warmtewinning, geïnjecteerd formatiewater in andere reservoirs terecht komt. De achterliggende gedachte is tweeledig. Ten eerste wordt voorkomen dat zout formatie-water door bovenliggende afsluitende lagen heen de grondwaterwater-kwaliteit negatief zou kunnen beïnvloeden. De reservoirs waaruit aardwarmte wordt gewonnen liggen weliswaar op grote verticale afstand van grondwaterreservoirs, maar het is vanzelfsprekend voor het milieu van belang om de kans op deze beïnvloeding te minimaliseren. Daarnaast is het vanuit een doelmatigheidsperspectief in het kader van planmatige ontwikkeling en beheer van belang dat productie en injectie in hetzelfde reservoir plaatsvindt, omdat het teruggevoerde water zo opnieuw kan opwarmen en bij blijft dragen aan de winning. In het besluit is hiertoe opgenomen dat de winning van aardwarmte niet tot aantasting van de integriteit van de afsluitende lagen mag leiden. Een afsluitend lagenpakket vormt de barrière voor stroming tussen verschillende ondergrondse laagpakketten. Het afsluitende pakket bestaat uit één of meerdere ondoorlatende, zijdelings ononderbroken laagpakketten die het geothermische reservoir scheiden van het eerstvolgende boven- of onderliggende reservoir. Door het temperatuurverschil tussen het*

*geïnjecteerde koude water en het reservoir in combinatie met de injectiedruk is er een kans dat in de loop der jaren scheurvorming optreedt in het reservoir en in de lagen van het afsluitende pakket. Dat laatste is relevant voor de integriteit. Als het afsluitend pakket significant wordt aangetast door scheurvorming, kan lekkage van formatiewater naar andere reservoirs plaatsvinden.”*

Vervolgens is in de Mijnbouwregeling genoemd in art 1.3b.2 lid 2b en 2h: *“b. een beschrijving van de verwachte temperatuur, druk, porositeit, mate van doorlaatbaarheid, het zoutgehalte en de afsluitende aardlagen van het beoogde reservoirinterval en h. een op een geomechanische analyse gebaseerde onderbouwing waaruit blijkt of de integriteit van de afsluitende aardlagen is gewaarborgd aan de hand van de uiterste waarden van de productieparameters;”*

In de toelichting van de mijnbouwregeling wordt verder gemeld dat (§ 2.2, p13):

*“De aanvrager dient ook aan te tonen dat de voorgenomen operationele instellingen zodanig zijn dat de integriteit van de afsluitende lagen, ook wel deklaag of seal, van het beoogde reservoirinterval gewaarborgd blijft, zodat het formatiewater niet in ondiepere aardlagen terecht kan komen. Een te hoge injectiedruk in combinatie met afkoeling kan leiden tot scheurvorming in het afsluitende gesteente. Het is daarom wenselijk om een goede inschatting te maken van het maximale debiet en de maximale injectiedruk in combinatie met de uitkoeling waarbij de integriteit van de afsluitende lagen gewaarborgd blijft. De aanvrager onderbouwt op basis van de opbouw en aard van het beoogde reservoir en afsluitende lagen daarvan, alsmede een geomechanische beschrijving van het reservoir en de afsluitende lagen dat de integriteit van de afsluitende lagen geborgd is. Deze onderbouwing bevat een conclusie of de maximaal mogelijke scheurvorming kan leiden tot aantasting van de integriteit van de afsluitende lagen. Bij deze analyse geeft de aanvrager de uiterste waarden van de parameters, marges en onzekerheden aan en welke methode is gebruikt om tot deze beschrijving te komen.”*

In hoofdstuk 4 van de toelichting wordt de methodiek genoemd die in dit rapport is beschreven.

## 2.1.1 Vergunningskader

In de Mbw, Mbb en Mbr is eenduidig en expliciet beschreven dat een integriteitsanalyse uitgevoerd en gerapporteerd moet worden voor de afdichtende gesteentepakketten. Deze analyse maakt deel uit van de aan te leveren documenten bij een aanvraag startvergunning of vervolgvergunning. Deze verplichting wordt niet gegeven voor een aanvraag ‘toewijzing zoekgebied’.

## 2.1.2 Voorgaande procedures

In het verleden gold het Protocol bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning (SodM & TNO-AGE, 2013). Dit protocol bevat richtlijnen voor het bepalen van de maximale injectiedruk bij een geothermie injectieput. Dit protocol is van toepassing bij een temperatuurverschil van maximaal 40 °C tussen de originele reservoirtemperatuur bij de injectieput en de temperatuur van het injectiewater. Als het temperatuurverschil groter is moet de uitvoerder een extra onderbouwing aanleveren met een beschrijving de integriteit van de afsluitende laag gedurende de looptijd van het project. Hierin moeten de gezamenlijke invloed van de opgelegde injectiedruk en thermische effecten aan bod komen.

Als toevoeging op dit protocol heeft SodM in 2020 een toezichtsignaal gepubliceerd. Hierin staat hoe de maximale injectiedruk volgens het injectieprotocol kan worden bijgesteld bij temperatuurverschillen hoger dan 40°C (SodM, 2020). Dit toezichtsignaal verwoordt de wijze waarop SodM de maximale injectiedruk bepaalt bij hun advisering voor vergunnings-

aanvragen. Dit is een tijdelijke oplossing die is gegeven vanuit SodM om de tijd te overbruggen totdat EZK een screening tool en normstelling implementeert volgens de nieuwe Mbw.

### 2.1.3 Normstelling

In de Mbw, Mbb of Mbr staat geen richtinggevende indicatie of norm die bepaalt wat “voldoende gewaarborgd” inhoud in kwantitatieve zin. De norm is beschreven in de beleidsbrief 18 september 2023 (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2023). Deze norm is geformuleerd op basis van een inventarisatiestudie, uitgevoerd in opdracht van EZK, naar wat een adequate norm voor “voldoende gewaarborgd” kan zijn. Door de uitvoerder van de inventarisatie wordt gesteld dat ten minste 50% van de afdichtende gesteentepakketten, met een minimale dikte van 30 meter, onaangetast moet blijven (Fenix, 2022). Ongestoord betekent, dat hier geen nieuwe scheurvorming mag plaatsvinden.

De opbouw van de ondergrond en de kwaliteit van reservoir en afdichtend pakket is met onzekerheden omgeven, zeker bij de aanvraag van een startvergunning. Deze onzekerheden dienen meegenomen te worden in de integriteitsevaluatie. Dit kan met behulp van een stochastisch model.

De voorgestelde norm is als volgt: de drempelwaarde in termen van overschrijdingskans is 95% (P95-waarde). Dit betekent dat de drempelwaarde (50% en 30 meter van het afdichtende gesteentepakket intact) in slechts 5% van de stochastische berekeningen overschreden mag worden.

## 2.2 Dreiging, kans en risico

### 2.2.1 Dreiging integriteitsverlies

De dreiging van integriteitsverlies refereert naar de mogelijke schade die aangericht kan worden aan het milieu en drinkwatervoorraden wanneer formatiewater vanuit het reservoir naar boven- of onderliggende watervoerende reservoirs stroomt. Het zoutgehalte van formatiewater is relatief hoog vergeleken met formatiewater van ondiepere watervoerende gesteentepakketten en kan daardoor schade aanrichten. Voor het bepalen van de dreiging is het nodig om twee evaluatiestappen uit te voeren:

1. Het vaststellen van de mogelijkheid en waarschijnlijkheid dat het afdichtende pakket zijn integriteit verliest en;
2. Het vaststellen van de mogelijkheid en waarschijnlijkheid dat zout geothermisch water naar een gesteentepakket migreert waar het schade kan veroorzaken.

### 2.2.2 Kans integriteitsverlies van afsluitende gesteentepakketten

Tot op heden is er voor de Nederlandse situatie geen voorval bekend waarbij de afdichtende gesteentepakketten hun integriteit zijn verloren als gevolg van geothermie. Het is belangrijk hierbij op te merken dat integriteitsverlies langs de put door slechte putafwerking buiten beschouwing wordt gelaten.

Er is geen set historische gegevens van gebeurtenissen waaruit op voorhand de kans van integriteitsverlies kan worden bepaald of gekalibreerd. Daarom moet deze kans vooralsnog theoretisch worden bepaald aan de hand van modelberekeningen.

## 2.2.3 Risico integriteitsverlies van afsluitende gesteentepakketten

Het risico van integriteitsverlies van afsluitende gesteentepakketten is gedefinieerd als de ernst van de schade en de kwantificatie van de waarschijnlijkheid van verschillende schadeniveaus. Omdat er geen praktijkvoorbeelden zijn van integriteitsverlies, kan het risico alleen op theoretische basis worden bepaald. Geothermie vindt al meerdere jaren plaats in Nederland zonder aantoonbaar voorval. Het theoretische risico geeft daarom voorsnog een conservatief beeld.

## 2.3 Technisch kader

In Nederland wordt geothermie in drie diepteafhankelijke categorieën verdeeld. De drie dieptedomeinen zijn: ondiepe geothermie vanaf een diepte van 500 tot 1,500 meter onder maaiveld, diepe geothermie van 1,500 tot 4,000 meter onder maaiveld en ultra-diepe geothermie dieper dan 4,000 meter onder maaiveld. Het dieptebereik van 0 tot 500 meter valt momenteel buiten de Mbw en is te classificeren als bodemenergie. Deze categorie valt daarom buiten de scope van de TAS-procedure.

Voor geothermie is een warmtedrager nodig. In reguliere geothermiesystemen is dit het (zoute) formatiewater dat van nature in de gesteentepakketten voorkomt. De temperatuur van het gesteente en het formatiewater neemt in de ondergrond toe met de diepte. Reguliere geothermiesystemen onttrekken warmte uit het formatiewater. Bij de winning wordt warm formatiewater via de productieput opgepompt uit het reservoir. Vervolgens onttrekt bovengronds een warmtewisselaar de warmte uit het formatiewater en waarna het afgekoelde water via de injectieput terug in het reservoir komt. Hiervoor moet het formatiewater ondergronds door het gesteente kunnen stromen. Dit vereist een gesteentepakket met specifieke eigenschappen, met name voldoende porositeit en doorlatendheid (permeabiliteit). Zo'n laag wordt een reservoir of aquifer genoemd. Het teruggepompte, afgekoelde water creëert een zone rond de injectieput waar het gesteente afkoelt door het geïnjecteerde water. De ontstane koudwaterbel groeit van bovenaf gezien tot een druppelvorm, waarbij de buik zich rond de injectieput vormt en de punt op de positie van de productieput ligt. De afgekoelde zone rond de injectieput wordt het geothermisch invloedsgebied genoemd.

In Nederland vindt warmtewinning voorsnog alleen plaats vanuit afzettingsgesteenten. De reservoirs van dit soort gesteente worden ook wel aangeduid als "Hot Sedimentary Aquifers". In de Nederlandse situatie kunnen geothermiesystemen vanuit afzettingsgesteenten verdeeld worden in twee dominante types op basis van de aard van de dominante doorlatendheid:

1. Geothermiesystemen op basis van matrix permeabele reservoirs. Op twee na benutten alle huidige geothermie projecten matrix permeabele reservoirs (status datum 1-1-2023).
2. Geothermiesystemen op basis van breuk permeabele reservoirs. Er zijn in Nederland twee geothermische systemen die uit een dergelijk reservoir type hebben geproduceerd (status datum 1-1-2023).

### 2.3.1 Bepalen van integriteitsverlies bij geothermie

Voor matrix permeabele reservoirs kan de uitbreiding van de koudwaterbel in de diepe ondergrond bij benadering bepaald worden. De spanningsveranderingen in en rondom de koudwaterbel als gevolg van de afkoeling kunnen worden berekend. Op een soortgelijke

manier kan de verandering van de poriëndruk worden berekend die het gevolg is van injectie bij de injectieput.

Op het moment dat de poriëndruk groter wordt dan de minimale horizontale spanning ontstaat een kritische situatie. In het gesteente kan dan een scheur ontstaan die zich opent in de richting van de minimale horizontale spanning. Een dergelijke scheur heet een rekscheur. Het bereiken van een kritische spanningssituatie betekent alleen niet altijd dat een rekscheur zich vormt. In de meeste gevallen moet eerst een drempel van verhoogde druk (scheurinitiatiedruk) overschreden worden vóór de rekscheur kan ontstaan. De spanningsveranderingen van de gesteentepakketten en de vorming en dimensies van een rekscheur kunnen bepaald worden met rekenkundige modellen.

Het verlies van de integriteit van de afsluitende gesteentepakketten kan ook worden veroorzaakt door bewegingen langs bestaande breuken die door deze pakketten lopen. Als een bestaande breuk binnen het invloedsgebied van de koudwaterbel komt te liggen, verandert de spanningssituatie langs het breukvlak. Afkoeling van het gesteente, gecombineerd met een toename van de poriëndruk zorgen ervoor dat de schuifspanning langs het breukvlak toeneemt. Als deze spanning hoger is dan de kritische schuifspanning, kan de breuk in beweging komen. De hoogte en lengte van het totale breukvlak dat in beweging komt is afhankelijk van de mate van afkoeling en de toename van de poriëndruk en kan ook berekend worden met rekenkundige modellen.

Omdat de situatie in de ondergrond zo complex is en er nog veel onzekerheden bestaan, blijven alle rekenkundige modellen een versimpeling van de werkelijkheid. Niet alle processen in de ondergrond zijn momenteel te vangen in modellen. Een goed model vangt wel de meest belangrijke elementen en geeft voldoende basis om een uitspraak te kunnen doen over, in dit geval, het überhaupt optreden van een scheur en de implicaties voor de integriteit van gesteentepakketten. De onzekerheden kunnen meegenomen worden door gebruik te maken van stochastische modellen.

### 2.3.1.1 Analytische modellen

Complexe geologische processen kunnen gemodelleerd worden aan de hand van vergelijkingen. Veel van deze vergelijkingen zijn moeilijk om direct op te lossen, zoals complexe differentiaalvergelijkingen, omdat ze vaak meerdere oplossingen hebben. Analytische modellen benaderen het probleem met een set aannames en randvoorwaarden waardoor met simpelere vergelijkingen een enkele oplossing gegeven kan worden.

Analytische modellen zijn over het algemeen sneller uit te voeren dan numerieke modellen (zie paragraaf 2.3.1.3) en vereisen minder specifieke kennis. Analytische modellen zijn daarentegen vaak beperkter in de mogelijkheden; niet alle problemen kunnen geanalyseerd worden met analytische modellen.

Er bestaan meerdere softwareprogramma's die gebaseerd zijn op analytische modellen waarmee rekscheurhoogte berekend kan worden. Deze software is voornamelijk afkomstig uit de olie- en gasindustrie en kan 2- of 3-dimensionaal modeleren. De aannames en beperkingen van deze programma's zijn onderling verschillend. De paragraaf hieronder beschrijft een aantal aannames waarmee rekening gehouden moet worden bij het gebruik van het analytische SRIMA-model.

### 2.3.1.2 SRIMA

SRIMA is een generieke analytische tool die specifiek is ontworpen voor de beoordeling van geothermische systemen. SRIMA kan toegepast worden bij niveau 2 van de locatie specifieke evaluatie in de TAS-procedure (zie Figuur 1-1). Een evaluatie met SRIMA met een positief



resultaat betekent dat de reservoirintegriteit voldoende geborgd is, en dat het geothermieproject door kan richting de SDRA-procedure (TNO-AGE & EBN, 2023c).

De analytische vergelijkingen van SRIMA die druk, spanning en temperatuur beschrijven in het reservoir en aansluitende afdichtende gesteentepakketten zijn gebenchmarkt tegen numerieke modellen (DIANA en Eclipse) (zie (TNO-AGE, Fokker, Buijze, & Pluymaekers, 2023a)). Uit de benchmark is gebleken dat de uitkomsten analytische vergelijkingen goed overeenkomen met die van de numerieke modellen.

Ook de berekening van de rekscheurhoogte door SRIMA is vergeleken met een numeriek scheurgroeimodel (Fenix, 2022). SRIMA berekent een maximaal rekscheurhoogtepotentieel in de afsluitende gesteentepakketten. Hiervoor meet het de hoogte binnen het afsluitende gesteentepakket waar de minimale horizontale spanning lager is dan de poriëndruk. Het neemt daarbij aan dat rekscheurvorming op geen enkele wijze gehinderd wordt. In werkelijkheid zijn er meerdere processen die rekscheurvorming en -groei tegenhouden (zoals scheurinitiatiedruk en gelaagdheid van het gesteente), daarom kan deze aanname als conservatief worden beschouwd. Er wordt aangenomen dat de opening van rekscheuren relatief klein blijft en dat koud formatiewater uit het reservoir niet effectief van en naar de breuk kan circuleren, door advection.

In het numerieke scheurgroeimodel dat gebruikt is voor de vergelijking van de rekscheurhoogte is advection in de rekscheur wél meegenomen (Fenix, 2022). Dit model neemt aan dat scheurvorming zich uit in slechts één discrete scheur. De opening van deze scheur is relatief groot; bij vorming van meerdere scheuren zouden de individuele scheuropeningen kleiner zijn. Hierdoor is de gemodelleerde breuk zeer doorlatend, is advection dominant en ontstaat een zichzelf versterkend effect. Door advection circuleert het relatief koude geothermische formatiewater uit het reservoir tot het uiteinde van de scheur en kan de scheur verder groeien.

Uit het vergelijk bleek dat SRIMA desondanks altijd een grotere rekscheurhoogte berekent, maar alleen als de stijfheid van de afdichtende gesteentepakketten niet boven een bepaalde waarde komt. Deze stijfheid, uitgedrukt als de Young's modulus of elasticiteitsmodulus, is relatief hoog en is karakteristiek voor gesteentes zoals anhydriet en niet representatief voor de meeste afdichtende gesteentepakketten van de bestaande geothermiesystemen in Nederland. In de TAS-procedure is in de generieke screening van niveau 1 een aparte vraag opgenomen die zorg draagt dat situaties met afdichtende gesteentepakketten met een te hoge stijfheid niet geëvalueerd worden met SRIMA maar direct doorverwezen worden naar een locatie specifieke detailevaluatie.

Hierbij moet worden opgemerkt dat het optreden van effectieve advection afhankelijk is van hoe ver de rekscheur zich opent. Het is aannemelijk dat de typische stresssituatie in de Nederlandse ondergrond de opening van rekscheuren en daarmee advection beperkt. Het verschil tussen de minimale- en maximale horizontale spanning is over het algemeen klein waardoor er een scheurnetwerk ontstaat in plaats van een enkele grote scheur. Het grotere aantal kleine scheuren van een scheurnetwerk zal per scheur een kleinere opening hebben. Het numerieke scheurgroeimodel dat gebruikt is in de vergelijking resulteerde in één enkele breuk en is daarmee conservatief.

Daarnaast moet ook opgemerkt worden dat de bovenstaande vergelijking van rekscheurhoogte gebaseerd is op de deterministische uitkomsten van SRIMA en het numerieke model. De TAS-procedure schrijft het gebruik voor van de door SRIMA stochastische bepaalde P95-waarde van de rekscheurhoogte. De P95-waarde is in de meeste gevallen veel hoger dan de deterministische waarde.

In de opsomming hieronder staan de belangrijkste overige aannames die in acht genomen moeten worden bij het gebruik van de SRIMA-tool voor de TAS-procedure. Een groot aantal van deze aannames is ook van toepassing op andere analytische of numerieke modellen.

1. De vergelijkingen van de analytische oplossing die SRIMA gebruikt, gaan uit van een matrix permeabel reservoir. Daarom is de SRIMA-tool enkel van toepassing in matrix permeabele systemen. Voor alle andere systemen, zoals breuk permeabele systemen, zal een locatie specifiek numeriek model moeten worden opgesteld (niveau 3 in de TAS-procedure).
2. De SRIMA-tool gebruikt een 3-lagen architectuur; in het midden het reservoir met boven en onder een afsluitend gesteentepakket. Elke laag wordt gekarakteriseerd door één enkele set invoerparameters. De lagen in het model zijn homogeen in verticale en horizontale richting. In werkelijkheid is dat niet het geval. Gesteentepakketten hebben gelaagdheid en veranderen in laterale richting. Over het algemeen kan gesteld worden dat gelaagdheid scheurgroei hindert. Laterale verschillen kunnen worden ondervangen door een adequate onzekerheidsbandbreedte toe te passen op de invoerparameters.
3. Lokale verstoringen van het spanningsveld direct tegen de injectieput die het gevolg zijn van de boring en putarchitectuur worden niet in acht genomen door SRIMA.
4. SRIMA neemt aan dat de put verticaal door het reservoir loopt. De effecten van een gedeveerde put op de spanningssituatie worden niet meegenomen.
5. De analytische benadering van SRIMA gaat er van uit dat de boven- en onderliggende afsluitende gesteentepakketten zeer lage permeabiliteit hebben. Als gevolg is conductie de bepalende factor voor de temperatuurverstoring in de afsluitende gesteentepakketten.
6. SRIMA gaat uit van constante operationele systeeminstellingen. Periodieke veranderingen of stilstand en hun effect op de spanningssituatie kunnen niet worden geëvalueerd. Ook kunnen de veranderingen in het spanningsveld als gevolg van eventuele scheurvorming in het reservoir niet worden meegenomen. Om te garanderen dat SRIMA een conservatieve uitkomst geeft, moeten representatieve gemiddelde operationele systeeminstellingen worden toegepast in SRIMA.
7. Het maximale scheurhoogtepotentieel dat SRIMA uitrekent is niet gebaseerd op een scheurgroei-simulatie. Aangenomen wordt, dat de opening van eventuele rekscheuren niet groot genoeg is om effectieve circulatie van koud geothermisch water vanuit het reservoir door de breuk toe te laten, via advectie. Benchmarking tegen een numeriek model mét advectie heeft aangetoond dat SRIMA de scheurhoogte kan onderschatten in gevallen waar het afdichtende gesteentepakket grote stijfheid heeft. Als de stijfheid van het afdichtende gesteentepakket, uitgedrukt in de Young's modulus, hoger is dan 35 Gigapascal (GPa) kan SRIMA niet meer gebruikt worden binnen het TAS-protocol. De stresssituatie van de Nederlandse ondergrond is echter bevorderlijk voor de vorming van een scheurnetwerk. Dit heeft ermee te maken dat de absolute waarde van  $Sh_{\min}$  en  $Sh_{\max}$  over het algemeen niet heel sterk verschillen (Fenix, 2022). Als de spanningsverstoring veroorzaakt door geothermie resulteert in een scheurnetwerk, zullen de scheuropeningen klein blijven.
8. De geomechanische eigenschappen van de gesteentepakketten in de Nederlandse ondergrond, zoals de sterkte van het gesteente, zijn belangrijke invoer voor de evaluatie met SRIMA. Veel waarden die bij deze eigenschappen horen zijn onzeker. De onzekerheidsbandbreedte is echter vaak wel bekend. SRIMA past een stochastisch model toe om deze onzekerheden te ondervangen. De aanname is dat de uitkomst van SRIMA met behulp van deze stochastische aanpak adequaat is om te voldoen aan de vereisten van de wet.



### 2.3.1.3 Numerieke modellen

Numerieke modellen gaan uit van een andere manier om de complexe differentiaalvergelijken op te lossen. Bij numerieke modellen worden de oplossingen benaderd door gebruik te maken van kleine tijdstappen en volumes (in geval van een 3D model). Het complexe probleem kan binnen die kleine stukjes, worden beschreven met simpele formules. Hoe kleiner de stukjes, hoe nauwkeuriger de numerieke benadering.

Numerieke modellen zijn vaak in staat om complexe vraagstukken op te lossen waarvoor geen analytische modellen bestaan. Ten aanzien van integriteitsverlies zijn numerieke modellen zeer geschikt om de 3-dimensionale processen te beschrijven. Om een numeriek model op te zetten en uit te voeren is alleen wel meer specifieke kennis nodig. Daarnaast is numeriek modelleren over het algemeen tijds- en kostenintensiever en is de software relatief duur. Daarbij moet worden opgemerkt dat de onzekerheid van de invoerparameters niet anders is bij numerieke modellen en de uitkomsten alsnog een relatief hoge onzekerheid hebben.

Er bestaan verschillende softwarepakketten gebaseerd om numerieke modellen waarmee integriteitsverlies van de afdichtende gesteentelagen kan worden geëvalueerd. Een voorbeeld hiervan is het eindige elementenanalyse pakket DIANA FEA.

## 3 Implementatie TAS-procedure

De TAS-procedure is opgezet zodat voor elk geothermie project de dreiging van rekscheurvorming in de afsluitende gesteentepakketten is te toetsen. In paragraaf 1.3, “Begrippen Definities en Uitleg”, is uitgelegd dat integriteitsverlies in de afsluitende gesteentepakketten op twee manieren kan optreden; door de vorming van rekscheuren of door reactivatie van bestaande breuken. De TAS-procedure evalueert alleen de eerste manier. Reactivatie van bestaande breuken is ook gekoppeld aan de dreiging van seismiciteit en zal daarom aansluitend op de SDR-procedure geëvalueerd worden. Ook hiervoor wordt de SRIMA-tool gebruikt.

Een rapportage met een goede beschrijving van de architectuur van de ondergrond, de aard van het reservoir en de afdichtende gesteentepakketten en de lokale structurele geologie zijn nodig om TAS-procedure succesvol te doorlopen. Daarnaast is het belangrijk dat de relevante onzekerheden beschreven zijn. Bijlage 2 van het toezichtsignaal dat gepubliceerd is door SodM in 2020 (SodM, 2020) geeft een overzicht van hoe een dergelijke beschrijving er uit kan zien. Op basis daarvan kunnen gedegen evaluaties worden uitgevoerd die getoetst kunnen worden aan de norm. De voorgestelde methodiek van de procedure wordt voor dit moment adequaat geacht om te voldoen aan de wettelijke vereisten voor integriteit van de afdichtende gesteentepakketten.

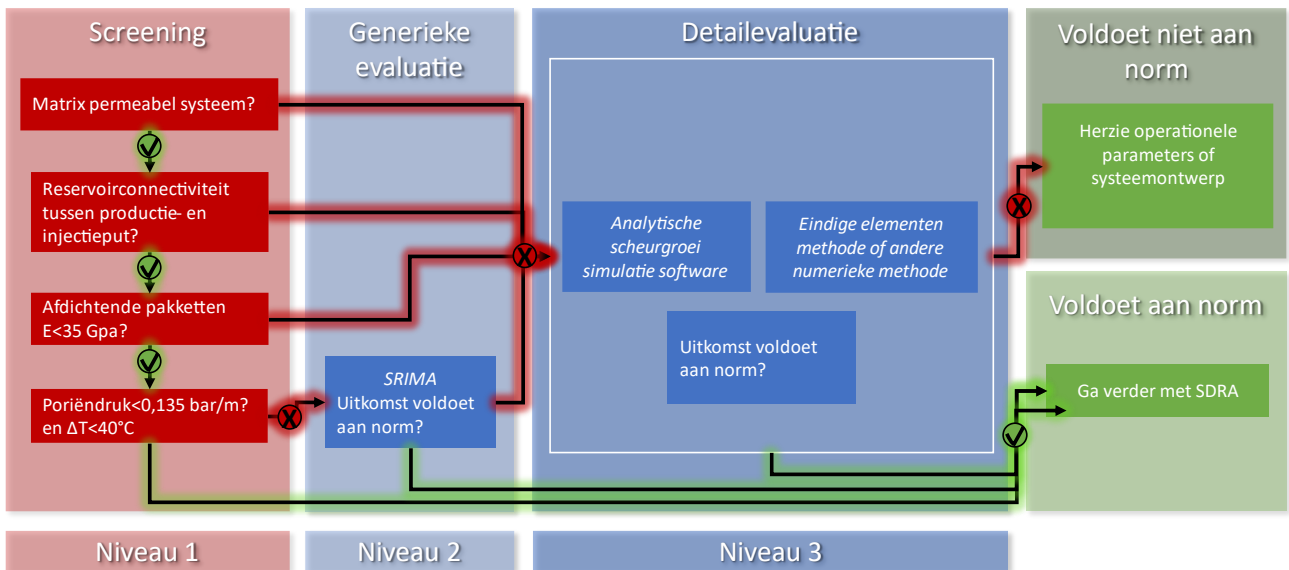
### 3.1 Methodiek

De opgelegde methodiek behelst een evaluatietraject van 3 niveaus:

- Niveau 1: Screening
- Niveau 2: Generieke evaluatie (SRIMA)
- Niveau 3: Detail evaluatie

Bij elk van deze niveaus wordt een geothermisch project direct of indirect getoetst aan de norm (de beschrijving van de norm staat in paragraaf 2.1.3). Bij elke niveau kan de uitkomst zijn dat er een acceptabel dreigingsniveau is (voldoet aan de norm) en hoeft de stap naar het volgende niveau niet genomen te worden (zie Figuur 3-1).

In de eerste stap, niveau 1, worden geothermische projecten kwalitatief gescreend op dreiging van integriteitsverlies van afdichtende gesteentepakketten met behulp van vier vragen. Voor projecten waar al deze vragen positief worden beantwoord, kan gesteld worden dat de dreiging voor scheurvorming nihil is en is er geen verdere evaluatie nodig. Als één of meer vragen van de screening negatief worden beantwoord, zal het desbetreffende project nader geëvalueerd moeten worden via niveau 1 en of 2.



Figuur 3-1: Generiek stappenplan van de TAS-procedure.

### 3.1.1 Niveau 1: Generieke screening

Niveau 1 van de TAS-procedure bestaat uit een 1<sup>ste</sup> orde screening. Hierin worden een aantal vragen gesteld. Deze vragen hebben als doel geothermieprojecten met een op voorhand laag aantoonbaar dreigingsniveau voor integriteitsverlies van afdichtende gesteentelagen te ontheffen van locatie specifieke evaluaties. Aan de andere kant worden projecten met een hoog dreigingsniveau of met bijzondere configuraties direct doorgeleid richting de meer gedetailleerde evaluatie.

De exploitant (operator) van een geothermisch systeem moet volgens de procedure deze vragen in een rapportage beantwoorden en beargumenteren.

#### 3.1.1.1 Eerste vraag; permeabiliteitssysteem

De eerste vraag van de generieke screening gaat over de aard van het permeabiliteitssysteem. Alleen matrix permeabele systemen kunnen met SRIMA worden geëvalueerd. In de screeningprocedure van de SDRa wordt het permeabiliteitssysteem op dezelfde manier behandeld (TNO-AGE & EBN, 2023c), hoofdstuk permeability system).

Als het antwoord op deze vraag negatief is, wordt het geothermieproject doorverwezen naar een gedetailleerde evaluatie met een numeriek model. In het geval van een positief antwoord, volgt de volgende vraag van de generieke screening.

#### 3.1.1.2 Tweede vraag; reservoirconnectiviteit tussen injectie- en productieput

In de MbW, artikel 1, lid h staat:

*„.. winnen van aardwarmte: met gebruikmaking van boorgaten onttrekken van aardwarmte aan de ondergrond door het oppompen van formatiewater, en terugvoeren van het bij die winning opgepompte water in de oorspronkelijke geologische formatie, of door het uitwisselen van warmte met de ondergrond zonder het oppompen en terugvoeren van formatiewater”.*

Dit betekent dat het geothermische water van de injectieput via het matrix-permeabele reservoir naar de productieput moet kunnen stromen. Er moet in andere woorden reservoirconnectiviteit zijn tussen de putten van het geothermiesysteem. Het is de bedoeling dat de poriëndruk van het hele reservoir in balans is tijdens de productieperiodes. In het geval van connectiviteit zal de poriëndruk van het reservoir snel terugvallen naar de originele, natuurlijke druk als productie wordt stilgelegd.

De reservoirconnectiviteit kan beoordeeld worden met een interferentietest. Hiervoor zijn tenminste twee bestaande putten nodig. Als het project nog niet gerealiseerd is (ook aangeduid met de Engelse term *pre-drill*), moet door de operator aannemelijk gemaakt worden dat het geothermische systeem is ontworpen zodat reservoirconnectiviteit zeer waarschijnlijk zal zijn. De aanwezigheid van een eventuele afsluitende breuk tussen de injectie- en productieput wordt wel meegenomen.

De rapportage moet ten minste antwoord geven op de volgende vraag:

*“Zijn de productie- en injectieput in het doelreservoir zodanig ontworpen dat er drukcommunicatie is tussen de putten of zal zijn als het project is gerealiseerd?”*

Als het antwoord op deze vraag negatief is wordt het geothermieproject doorverwezen naar een gedetailleerde evaluatie met een numeriek model. In het geval van een positief antwoord, volgt de volgende vraag van de generieke screening.

### 3.1.1.3 Derde vraag; stijfheid afdichtende gesteentepakketten

In het geval van afdichtende gesteentepakketten met een hoge stijfheid, kan het zijn dat de scheurhoogte die SRIMA berekent niet meer conservatief is. Als de inschatting van de stijfheid, uitgedrukt in de Young's modulus, hoger is dan 35 GPa, kan SRIMA niet meer gebruikt worden.

In dat geval, wordt het geothermieproject doorverwezen naar een analytisch breukpropagatiemodel of een numeriek model. Als de beste inschatting van de Young's modulus lager is dan 35 GPa, volgt de volgende vraag van de generieke screening.

### 3.1.1.4 Vierde vraag; injectiedrukbe grenzing volgens het injectieprotocol

Het “Protocol bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning” bevat richtlijnen voor het bepalen van de maximale injectiedruk bij een geothermie injectieput (SodM & TNO-AGE, 2013).

Deze vraag van de generieke screening gebruikt dit protocol. Als het (beoogde) geothermiesysteem, op de diepte van de top van het reservoir in de injectieput een poriëndruk heeft die lager is dan 0,135 bar/m, voldoet het systeem volgens het protocol aan de norm en is verdere evaluatie niet nodig. Als de poriëndruk hoger is volgt een ten minste een evaluatie met de SRIMA-tool (niveau 2). Dit is toepasbaar bij temperatuurverschillen van maximaal 40 °C tussen de natuurlijke reservoirtemperatuur bij de injectieput en de injectietemperatuur.

## 3.1.2 Niveau 2: Generieke evaluatie

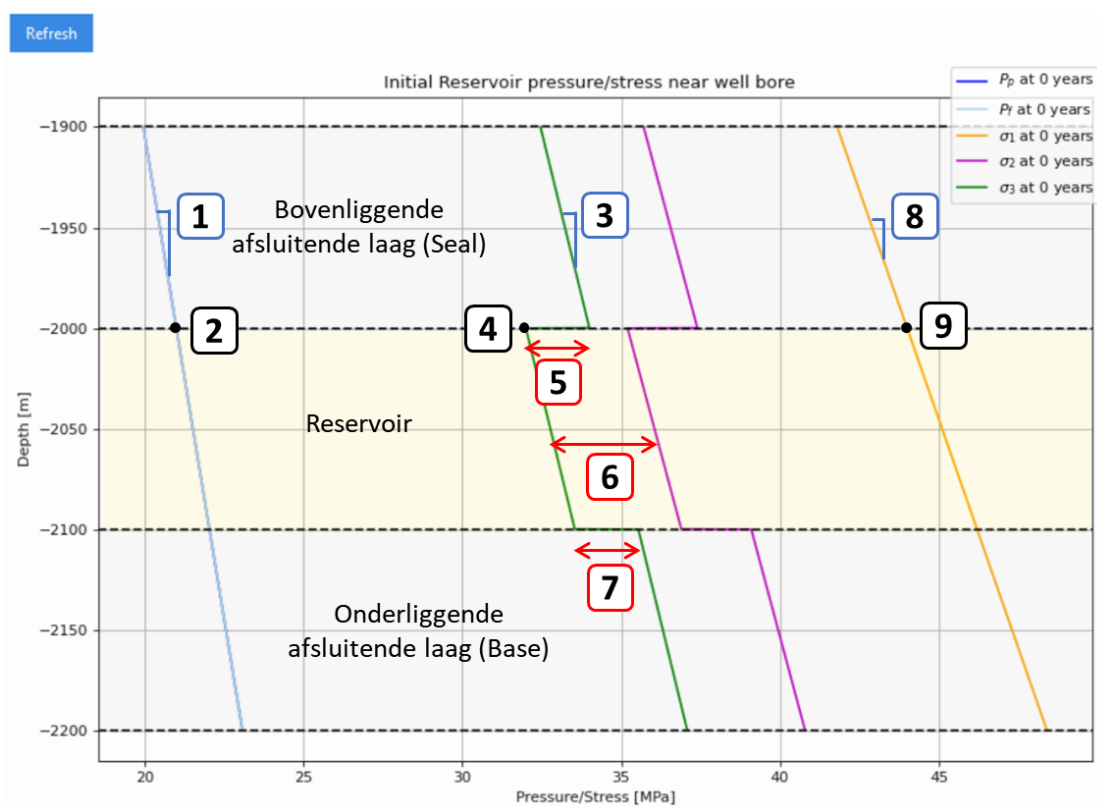
In niveau 2 van de TAS-procedure vindt een locatie specifieke evaluatie plaats met behulp van een analytisch model. De SRIMA-tool is hiervoor ontwikkeld en ter beschikking gesteld. Op basis van injectiedebiet-, -temperatuur en de geomechanische parameters van het reservoir wordt de injectiedruk en het scheurhoogtepotentieel berekend.

### 3.1.2.1 Evaluatie met SRIMA

De SRIMA-tool is een invulling van niveau 2 van de TAS-procedure. SRIMA is een analytische tool die een maximaal scheurhoogtepotentieel berekent in de boven- en onderliggende afsluitende gesteentepakketten. De tool kan een deterministische ('base case') berekenen op basis van de opgegeven waarschijnlijke ('likely') invoerwaarden. Voor de TAS-procedure is het echter van belang dat de bijbehorende onzekerheden worden meegenomen. Hiervoor heeft de tool een ingebouwde Monte-Carlo module die kan worden opgeroepen in het tabblad "general". Deze module voert de stochastische berekeningen uit die nodig zijn om de overschrijdingskans te bepalen die hoort bij de gestelde norm.

Een uitgebreide wetenschappelijke onderbouwing van de SRIMA-tool is te vinden in de Engelstalige rapportage "SRIMA: Background Information of the Python Tool" (TNO-AGE, Fokker, Buijze, & Pluymaekers, 2023a). In het rapport "SRIMA user manual" (TNO-AGE, Mijnlieff, De Vries, Jaarsma, & Vogelaar, 2023b) staat een gebruikers-handleiding waarin wordt uitgelegd hoe het programma te gebruiken is.

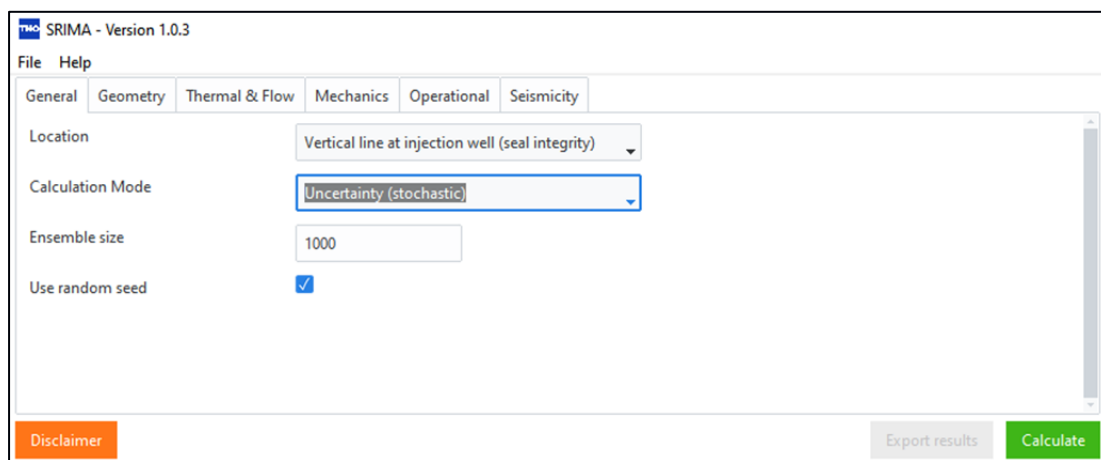
Als alle parameters ingevuld zijn, geeft de grafiek in het tabblad "Profiles Input" een goed overzicht van de initiële spanningssituatie. Het is van belang wel eerst op de knop "Refresh" te drukken zodra invoer verandert. Figuur 3-2 laat een voorbeeld zien van deze grafiek. In het onderschrift bij deze figuur staat een uitleg over de verschillende annotaties en hoe de getoonde lijnen relateren aan invoerparameters.



Figuur 3-2: Voorbeeld van de grafiek in de "Profiles Input" tab. De annotaties geven aan hoe deze grafiek tot stand is gekomen; 1) toename van de poriëndruk,  $P_p$ , met diepte gegeven door de "Pore pressure gradient", 2) poriëndruk aan de top van het reservoir opgegeven als "Pore Pressure top reservoir", 3) toename van de minimale horizontale spanning,  $\sigma_3$ , met diepte gegeven door de "Min. horizontal stress gradient", 4) Minimale horizontale spanning aan de top van het reservoir onder een eventueel contrast die wordt ingevuld bij "Min. horizontal stress top reservoir", 5) spanningscontrast gezien vanaf de bovenliggende afsluitende laag naar het reservoir opgegeven bij "Stress contrast seal to reservoir", 6) verschil tussen de minimale- en maximale horizontale spanning,  $\sigma_2/\sigma_3$ , die constant is over diepte en wordt toegepast op basis van de verhouding "Max.

hor. / min. hor. stress ratio”, 7) spanningscontrast gezien vanaf het reservoir naar de onderliggende afsluitende laag opgegeven bij “Stress contrast reservoir to base”, 8) toename van de verticale spanning,  $\sigma_v$ , met diepte gegeven door de “Vertical stress gradient”, 9) Verticale spanning aan de top van het reservoir opgegeven bij “Vertical stress top reservoir”.

De stochastische berekening van het maximale scheurhoogte potentieel start als de optie “Uncertainty (stochastic)” in het “general” tabblad (zie Figuur 3-3) is aangevinkt en de groene “Calculate” knop is ingedrukt. Als de berekening is voltooid, geeft de plot “Reservoir pressure / stress near well bore” in het tabblad “Profiles” een goed overzicht de spanningssituatie na injectie afgezet tegen de initiële spanningssituatie (zie Figuur 3-4). Het aantal weergegeven spanningssituaties na injectie is afhankelijk van de tijden die zijn gegeven in tabblad “Operational”. De initiële spanningssituatie wordt gerepresenteerd door de ononderbroken lijnen en gestreepte en gestippelde lijnen representeren de spanningssituaties na injectie.



Figuur 3-3: General tabblad van de SRIMA-tool. Voor de TAS procedure moet bij locatie “Vertical line at injection well (seal integrity)” optie gekozen worden. Voor de stochastische analyse waarbij de onzekerheden in de berekening worden meegenomen moet de Calculation Mode op “Uncertainty (stochastic)” worden gezet.

De uitvoer van de stochastische berekeningen worden door SRIMA uitgezet tegen twee referentiedrukken die gelden voor een injectieput tijdens injectie; de druk onder in de put op mid-reservoirdiepte (in de tool aangeduid als Bottom Hole Pressure of BHP) en de injectieverschuldruk op mid-reservoirdiepte (in de tool aangeduid als de Excess Injection Pressure, of EIP). In Figuur 3-5 staat een schematisch overzicht met de locaties en afleiding van deze drukken.

De TAS-procedure is gericht op het identificeren van potentiële scheurvorming in de boven- en onderliggende afdichtende gesteentepakketten. De bovenste zwarte, gestippelde lijn in Figuur 3-4 geeft de basis van het bovenliggende afsluitende gesteentepakket aan. Als de minimale horizontale spanning (gerepresenteerd door de groene lijnen met label  $\sigma_3$ ) in het bovenliggende gesteentepakket, lager is dan de poriëndruk (donkerblauwe lijnen met label  $P_p$ ) is een kritische situatie ontstaan; het gesteente verkeert in trekspanning. Op dat moment kan een rekscheur ontstaan, maar dit is niet altijd het geval. In de meeste gevallen moet eerst nog een drempel overschreden worden om scheurvorming te initiëren; de scheurinitiatiedruk. Als een rekscheur optreedt, kan deze progressief naar boven groeien in het bovenliggende afsluitende gesteentepakket tot daar waar het afsluitende gesteentepakket nog in kritische rekspanning staat. Als spanningsverandering groot genoeg is, kan de rekscheur door en voorbij het afsluitende gesteentepakket groeien. Op een soortgelijke manier kan een rekscheur vormen in het onderliggende afsluitende gesteentepakket.

Zo lang de opening van de scheur beperkt blijft, kan het afgekoelde formatiewater uit het reservoir niet in de scheur circuleren (advectie) en blijft de afkoeling van het afsluitende gesteente bepaald door diffusie. In dat geval kan de rekscheur nooit verder groeien dan de



zone waarin de minimale horizontale spanning lager is dan de maximale poriëndruk die vanuit het reservoir in een breuk kan optreden (weergegeven als de lichtblauwe gestreepte lijn met label  $P_f$  en dus niet hetzelfde als de poriëndruk in de gesteentematrix van het afdichtende pakket). De hoogte van deze zone is in SRIMA het maximale scheurhoogte potentieel. Onder de aanname dat advectie niet of nauwelijks optreedt, is dit een adequate en conservatieve inschatting van de maximale potentiële scheurhoogte.

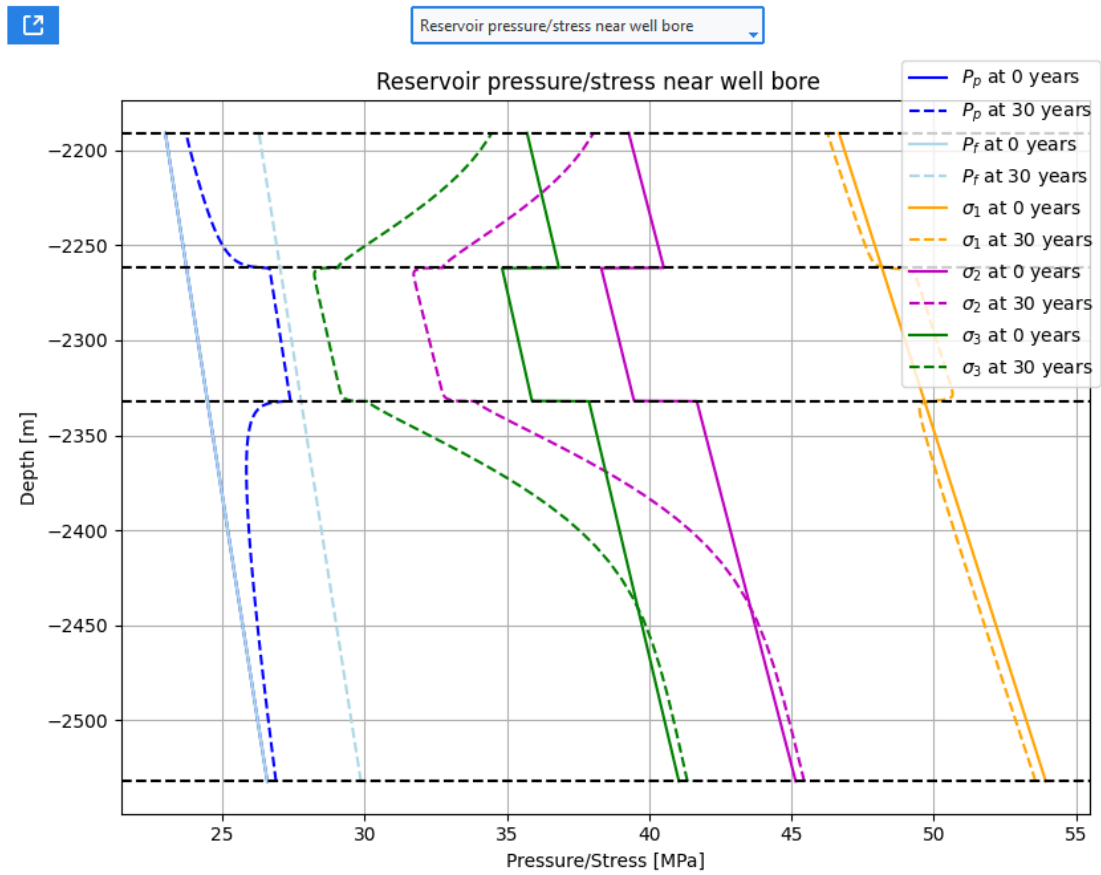
De “Reservoir pressure/stress near well bore” plot in de tab “Profiles” van SRIMA geeft de resultaten van de deterministische berekeningen. In dit geval heeft SRIMA ook stochastische berekeningen uitgevoerd. In het tabblad “Plots” geven de grafieken met de namen “Seal integrity” en “Base integrity” de belangrijkste stochastische uitvoer (zie Figuur 3-6).

De bovenste grafiek van Figuur 3-6 geeft op de y-as het maximale scheurhoogtepotentieel in het bovenliggende afsluitende gesteentepakket dat berekend is voor elke realisatie (voor het onderliggende afsluitende gesteentepakket kunnen dezelfde grafieken gegenereerd worden). De corresponderende druk aan de voet van de put (zoals gemeten in de injectieput halverwege het reservoir) staat op de x-as. Deze grafiek laat zien dat een hogere injectiedruk in algemene zin leidt tot groter maximaal scheurhoogtepotentieel. De kleur van elk punt geeft aan of de realisatie aan de norm voldoet (groen) of niet (rood). Het percentage van realisaties die aan de norm voldoen en niet aan de norm voldoen is ook in deze grafiek gegeven.

De tweede, middelste grafiek geeft met de stippen het percentage aan van de realisaties in een BHP-klasse (bin) dat qua maximale scheurhoogtepotentieel onder de norm blijft. De horizontale as representeert de druk in de injectieput op mid-reservoirdiepte (BHP). De hoeveelheid en grootte van de klassen is afhankelijk van de hoeveelheid realisaties. De blauwe lijn representeert de best passende curve door de stippen. Met behulp van deze blauwe lijn kan worden afgelezen welke BHP in meer dan 95% van de gemodelleerde gevallen leidt tot een maximaal scheurhoogtepotentieel dat binnen de norm valt. De rode verticale stippellijn geeft deze druk aan.

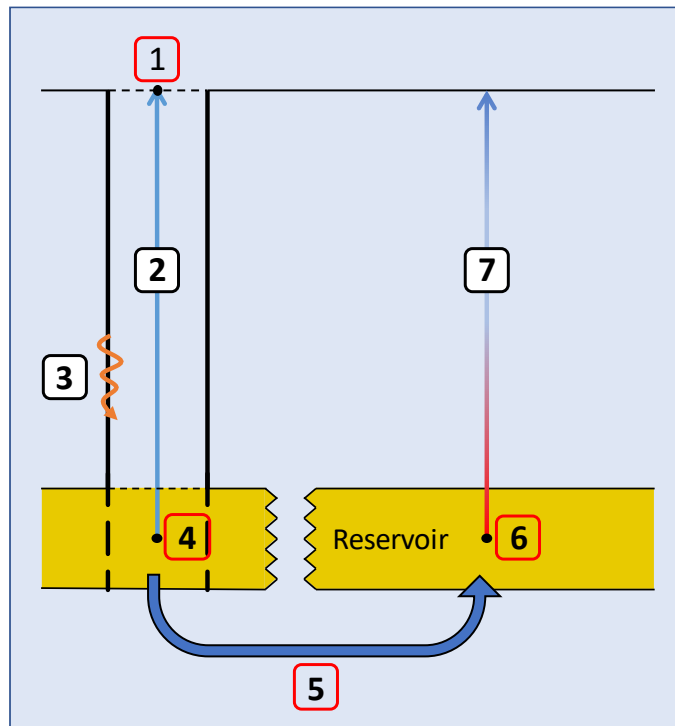
De laatste en derde grafiek is dezelfde als de tweede grafiek, maar hier is op de horizontale x-as de “Excess injection pressure” (EIP) gegeven. Dit is de injectieverschildruk op mid-reservoirdiepte gegeven door het verschil tussen de druk in de put tijdens injectie min de initiële reservoirdruk (zie ook Figuur 3-3). De injectiedruk aan de putmond tijdens injectie (in SRIMA aangeduid als Tubing Head Pressure, of THP) kan worden berekend met behulp van de conversietool voor injectiedruk in geothermieputten (TNO-AGE, 2023). Hierbij moet worden opgemerkt dat de conversietool rekent met de injectieverschildruk op top reservoir. Deze verschildrukken zijn niet exact hetzelfde. De injectieverschildruk op top-reservoirdiepte is kleiner, maar het verschil zal in de regel marginaal zijn.

Zoals in de onderste twee grafieken van Figuur 3-6 te zien is, is de fit van de lijn door de punten in het hoge drukbereik niet robuust vanwege het gebrek aan datapunten. Dit komt doordat de uitgerekenende drukken bepaald worden door het opgegeven debiet. Om een nauwkeurige en consistente maximale injectiedruk te bepalen (die niet leidt tot normoverschrijding), is het altijd noodzakelijk om een additionele analyse uit te voeren. Deze analyse rekent met debieten die buiten het bereik van de operationele instellingen van het project liggen en past een hoog aantal realisaties toe (10,000). Dit kan gerealiseerd worden door op de knop “Refine EIP/BHP” te drukken. De resulterende plots worden gegeven in Figuur 3-7 en hebben dezelfde opzet als die in Figuur 3-6. Zoals in de grafieken is te zien zijn er meer realisaties gemaakt en de gefitte curve is robuuster in het hoge drukbereik. Hierdoor is de afgeleide maximale injectiedruk betrouwbaarder. Bij deze figuur moet worden opgemerkt dat hier niet meer met kleuren en een legenda wordt aangegeven of realisaties aan de norm voldoen. De toegepaste debieten zijn namelijk niet meer gerelateerd aan het opgegeven debiet. Om te evalueren of het debiet dat is opgegeven in operationele instellingen leidt tot normoverschrijding kan alleen de bovenste grafiek onder “Seal integrity” worden gebruikt.

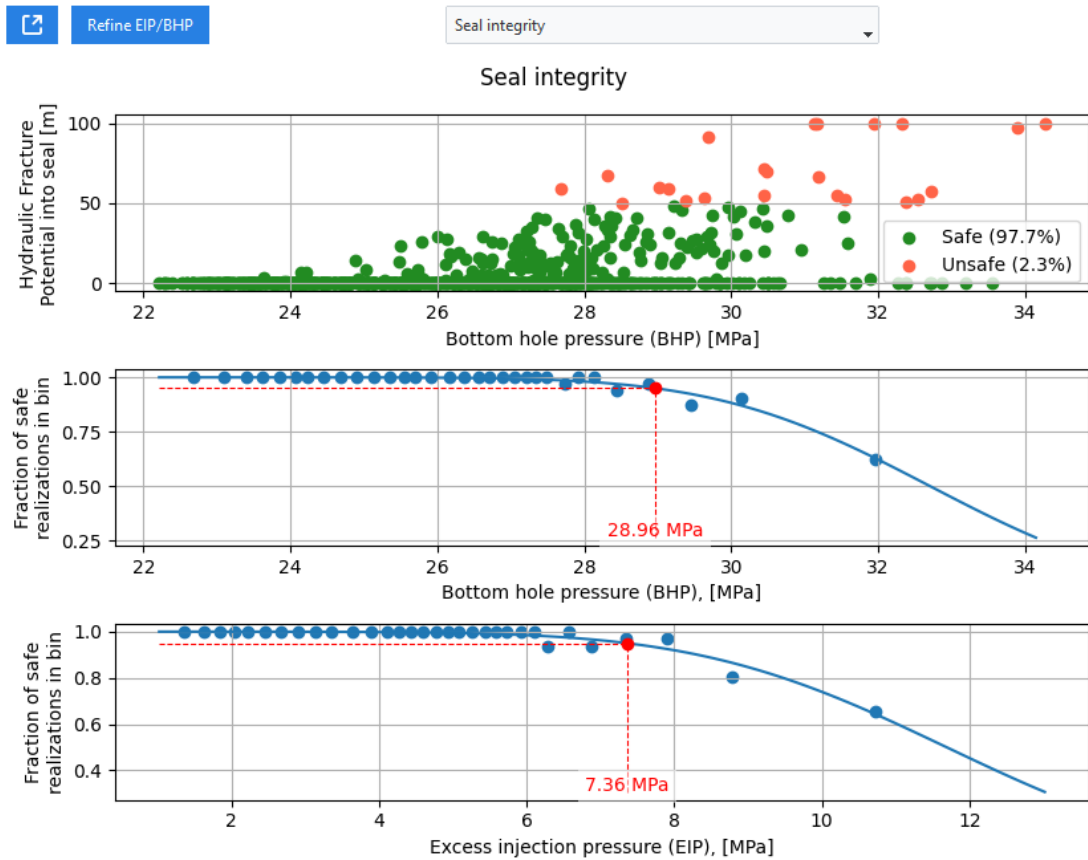


Figuur 3-4: Pressure and stress plot uit SRIMA. Hierin worden de initiële druk en spanningen getoond (ononderbroken lijnen). Ook de verandering van de druk en spanning als gevolg van de opgelegde injectiedruk en temperatuursverandering worden weergegeven (gestreepte lijnen).  $P_p$  is de poriëndruk;  $P_f$  is de poriëndruk zoals deze vanuit het reservoir in de afsluitende gesteentepakketten zou zijn als het geothermische water er ongehinderd in zou kunnen lopen. In het geval van scheurvorming is de poriedruk in scheur gelijk aan  $P_f$ . De verticale spanning is  $\sigma_1$ ;  $\sigma_2$  is de maximale horizontale spanning en  $\sigma_3$  de minimale horizontale spanning. De gestreepte zwarte horizontale lijnen geven de top en basis van het reservoir aan.

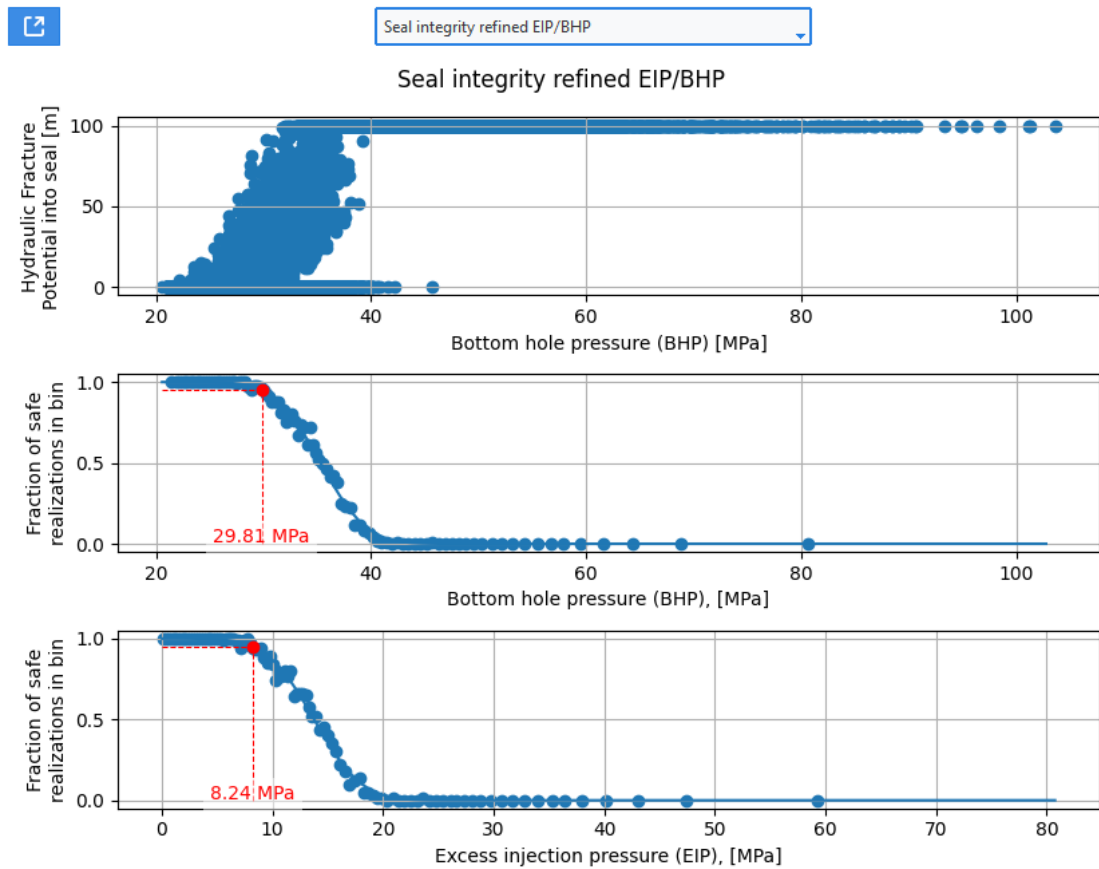




Figuur 3-5: Overzicht van de verschillende locaties in- en rondom de injectieput waar drukken worden gedefinieerd tijdens injectie; 1) de druk aan de putmond (ook aangeduid met Top Hole Pressure, of THP) die kan worden afgeleid door de vloeistofdruk als gevolg van de waterkolom in de injectieput [2] vermindert met het dynamisch drukverlies als gevolg van wrijving [3] van de vloeistofdruk in de put op mid-reservoirdiepte [4] af te trekken, 2) (koud)waterkolom in de injectieput, 3) dynamisch drukverlies door wrijving langs de verbuizing, 4) vloeistofdruk in de put op mid-reservoirdiepte (BHP) die wordt gegeven door het drukverlies door wrijving [3] af te trekken van de druk als gevolg van de waterkolom in de put [2], 5) Injectieverschilddruk op mid-reservoirdiepte (Excess Injection Pressure, of EIP) die kan worden berekend door de initiële hydrostatische druk [6] van de vloeistofdruk in de put op mid-reservoirdiepte [4] af te trekken, 6) Initiële hydrostatische druk op mid-reservoirdiepte die bepaald wordt door de statische waterkolom [7] die door SRIMA wordt berekend aan de hand van de porie-drukgradiënt, “Pore pressure gradient”, en de reservoirporiendruk op top reservoirdiepte, “Pore pressure top reservoir”, 7) statische waterkolom van maaiveld tot mid-reservoirdiepte.



Figuur 3-6: De eerste orde benadering “seal failure plots” grafieken van de SRIMA-tool die relevant zijn voor de TAS-procedure. De bovenste grafiek geeft de maximale rekscheurhoogte van elke stochastische realisatie. De rode punten voldoen niet aan de norm de groene wel. De middelste grafiek geeft per klasse van BHP weer welk deel van de stochastische berekeningen het maximale scheurhoogtepotentieel aan de norm voldoet. De onderste grafiek lijkt op de middelste, maar dan met klassen voor de injectieverschilddruk op reservoirdiepte. Dit is een analyse met 1000 stochastische realisaties. Zoals te zien is zijn er in het hoge drukbereik (gerelateerd aan de opgegeven debieten) te weinig punten om de curve goed te fitten. Nadere analyse kan worden uitgevoerd door op de “Refine EIP/BHP” (Excess injection pressure/Bottom hole pressure) knop te drukken.



Figuur 3-7: De “Seal/Base integrity refined EIP/BHP” grafieken van de SRIMA-tool die relevant zijn voor de TAS-procedure. Het debietbereik dat onderliggend is aan deze analyse is niet gelijk aan die van de operationele condities beoogd in het project. De bovenste grafiek geeft de maximale rekscheurhoogte van elke stochastische realisatie. De middelste grafiek geeft per klasse van injectiedruk weer welke fractie van de stochastische berekeningen een maximaal scheurhoogtepotentieel geeft dat aan de norm voldoet. De onderste grafiek lijkt op de middelste, maar dan met klassen voor de injectieverschilddruk op reservoirdiepte. Dit is een analyse met 10,000 stochastische realisaties. De fit van de lijn is nu veel beter en daarmee ook definitie van de maximaal toegestane injectiedruk volgens de norm.

## 3.2 Niveau 3: Detail evaluatie

In niveau 3 van de TAS-procedure is een locatie specifieke detailevaluatie opgenomen. Deze evaluatie kan bestaan uit een simulatie waarbij scheurgroei wordt meegenomen of een simulatie met een numeriek model.

### 3.2.1 Evaluatie met analytische scheurgroei simulatiesoftware

De evaluatie van niveau 2 kan uitgevoerd worden met SRIMA, maar is in principe ook mogelijk met analytische scheurgroei simulatiesoftware. Voorwaarde is dat deze software een industriestandaard is of dat er uitgebreid over is gepubliceerd in het publieke domein. Daarnaast moet de simulatie gekoppeld zijn aan een stochastisch model of andere vorm van onzekerheidsanalyse waarin alle relevante onzekerheden worden meegenomen zodat deze getoetst kan worden aan de norm.

## 3.2.2 Evaluatie met een numeriek model

In niveau 3 van de TAS-procedure is net als in niveau 2 een locatie specifieke evaluatie nodig. De evaluatie wordt echter gebaseerd op een numeriek model. Dit kan bijvoorbeeld een eindige elementen methode zijn. Deze modellen zijn in algemene zin complexer dan analytische modellen. Het kost meer tijd en specialistische kennis om deze modellen te maken en uit te voeren. Het grote voordeel van numerieke modellen is dat ze complexere situaties kunnen beschrijven en minder aannames nodig hebben dan analytische modellen.

De TAS-procedure schrijft geen specifiek softwarepakket voor. De gebruikte software dient een industriestandaard te zijn of er is uitgebreid over gepubliceerd in het publieke domein.

Om de onzekerheden van de ondergrond adequaat te ondervangen, moet de numerieke modelering worden gecombineerd met een onzekerheidsanalyse.

## 4 Referenties

- De Jager, J. (2007). Geological development. In T. Wong, D. Batjes, & J. De Jager, *Geology of the Netherlands*.
- Fenix. (2022). *Onderzoek Normering Reservoir Integriteit Aardwarmte, rapport voor: Ministerie voor Economische Zaken en Klimaat*.
- Mechelse, E. (2017). *The In-situ Stress Field in the Netherlands: Regional Trends, Local Deviations and an Analysis of the Stressregimes in the Northeast of the Netherlands*. TU Delft, EBN.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2023). *Publicatie normstelling voor seal integriteit bij geothermie, kenmerk: PDGGO*.
- SodM & TNO-AGE. (2013). *Protocol bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning*. Retrieved from [https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/publicaties/2013/11/23/protocol-bepaling-maximale-injectiedrukken-bij-aardwarmtewinning/Protocol\\_injectiedrukken\\_bij\\_aardwarmte.pdf](https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/publicaties/2013/11/23/protocol-bepaling-maximale-injectiedrukken-bij-aardwarmtewinning/Protocol_injectiedrukken_bij_aardwarmte.pdf)
- SodM. (2020). *Toezichtsignaal Integriteit afsluitende laag geothermie*. Retrieved from <https://www.sodm.nl/documenten/brieven/2021/01/19/toezichtsignaal-integriteit-afsluitende-laag-geothermie>
- TNO-AGE & EBN. (2023c). *Seismische Dreigings- en Risicoanalyse voor geothermieprojecten in Nederland, september 2023*.
- TNO-AGE. (2023, Mei). *Conversietool voor injectiedruk in geothermieputten*. Retrieved from [www.sodm.nl: https://www.sodm.nl/documenten/richtlijnen/2023/05/17/conversietool-voor-injectiedruk-in-geothermieputten](https://www.sodm.nl/documenten/richtlijnen/2023/05/17/conversietool-voor-injectiedruk-in-geothermieputten)
- TNO-AGE, Fokker, P., Buijze, L., & Pluymaekers, M. (2023a). *SRIMA: Background Information of the Python Tool, september 2023*.
- TNO-AGE, Mijnlief, H., De Vries, S., Jaarsma, B., & Vogelaar, B. (2023b). *SRIMA: User Manual, september 2023*.
- Worum, G., & Michon, L. (2005). Implications of continuous structural inversion in the West Netherlands Basin for understanding controls on Palaeogene deformation in NW Europe. *Journal of the Geological Society*.

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

**TNO** innovation  
for life