

CONFIDENTIEEL

Energie
Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75

TNO-rapport

TNO 2014 R11062 | Eindrapport

Handleiding geomechanische tool voor breukreactivatie en fracken bij aardwarmtewinning

Datum	21 augustus 2014
Auteur(s)	Len Paalvast, Karin van Thienen-Visser
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	14 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken
Projectnaam	Effecten vloeistofinjectie
Projectnummer	060.01462/01.05

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.

© 2014 TNO

CONFIDENTIEEL

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Aanleiding	3
1.2	Tool	3
1.3	Aanvraag- en Vergunningsproces	4
1.4	Werkproces.....	4
1.5	Disclaimer	4
2	Aardwarmte in Nederland	5
3	Overzicht interface	6
3.1	In- en uitvoerveld	6
3.2	Grafieken	8
4	Referenties	12
5	Ondertekening	13
	Bijlage 1. Voorbeeld DoubletCalc.....	14

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De afgelopen jaren is het aantal aanvragen voor vergunningen van geothermische projecten en de garantieregeling flink gestegen. Uit ervaringen met recente projecten blijkt dat relatief hoge injectiedrukken nodig zijn om het opgepompte water terug te injecteren en zodoende voldoende vermogen te genereren. Een te hoge injectiedruk kan echter leiden tot breukreactivatie of fracken, wat niet gewenst is buiten het vergunde gebied.

Samen met de geologische parameters bepaalt de injectiedruk hoe hoog het debiet van een aardwarmtebron zal zijn. De injectiedruk bepaalt dus gedeeltelijk of een aardwarmtebron rendabel is. Het is daarom belangrijk om op voorhand een goede inschatting te maken van de maximale injectiedruk waarbij breukreactivatie en fracken voorkomen kan worden.

1.2 Tool

Door TNO-AGE is een Excel-tool ontwikkeld waarmee op een efficiënte, reproduceerbare en transparante wijze een inschatting kan worden gemaakt van de maximaal toelaatbare injectiedrukken. De tool is bedoeld om een snel en simpel model te bieden, dat gekalibreerd is aan reële data, en dat een analytische en fysische basis heeft. In Tabel 1 staan de voordelen en beperkingen van de tool.

In de tool kunnen stuurbare project-specifieke parameters, zoals de temperatuur van het injectiewater en de injectiedruk, worden ingevoerd. Daarnaast worden ook 'default parameters' gegeven. N.B. deze parameters zijn gemiddelde waarden voor parameters voor de ondergrond van Nederland maar niet geldig voor specifieke casus.

<i>Voordelen</i>	<i>Beperkingen</i>
Snel antwoord (korte rekentijd)	Geen heterogeniteit in de analyse
Makkelijk hanteerbaar	Veel aannames (onzekerheid), vooral aan het begin van het proces
Weinig parameters	Eendimensionaal
Geen kosten voor aanschaf software	

Tabel 1. Overzicht voor- en nadelen van de tool.

De tool geeft aan of de voorgestelde injectiedruk op het reservoir volgens het injectieprotocol (Staatstoezicht op de Mijnen, 2013) toelaatbaar is, of het reservoirgesteente wel of niet gefrackt wordt, en of er kans is op reactivatie van breuken.

Het fracken van het reservoirgesteente hoeft op zich geen probleem te zijn, maar dit kan problemen opleveren wanneer de horizontale spanning in de afsluitende laag boven het reservoir (de seal) niet hoog genoeg is. Er zou een breuk kunnen ontstaan in de seal die kan doorschieten naar de lagen erboven. Hierdoor kan er contaminatie van ondiepere aquifers optreden. Omdat het spanningscontrast

tussen het reservoirgesteente en de seal meestal onbekend is, wordt als conservatieve aanname genomen dat het reservoirgesteente niet gefract mag worden.

In het kader van beheersbaarheid, wordt met de tool ook bepaald of er kans is dat bestaande breuken worden gereactiveerd. Dit kan geïnduceerde seismiciteit tot gevolg hebben.

1.3 Aanvraag- en Vergunningsproces

De tool kan aan het begin van het proces van aanvraag voor de garantieregeling al worden gebruikt om een eerste inschatting te maken van de injectiedrukken. In de loop van het proces kan de tool worden gebruikt, wanneer meer geologische informatie beschikbaar wordt, om dit verder te specificeren. Aan het eind van het proces kan de tool helpen bij het nauwkeuriger vaststellen van de toelaatbare injectiedruk, wanneer reële inputparameters zijn vastgesteld.

1.4 Werkproces

De parameters uit DoubletCalc¹ kunnen worden gebruikt als input in de tool. In bijlage 1 is een voorbeeld van een aardwarmtebron berekend met DoubletCalc, met een verwijzing waar welke parameters in de tool gebruikt kunnen worden.

1.5 Disclaimer

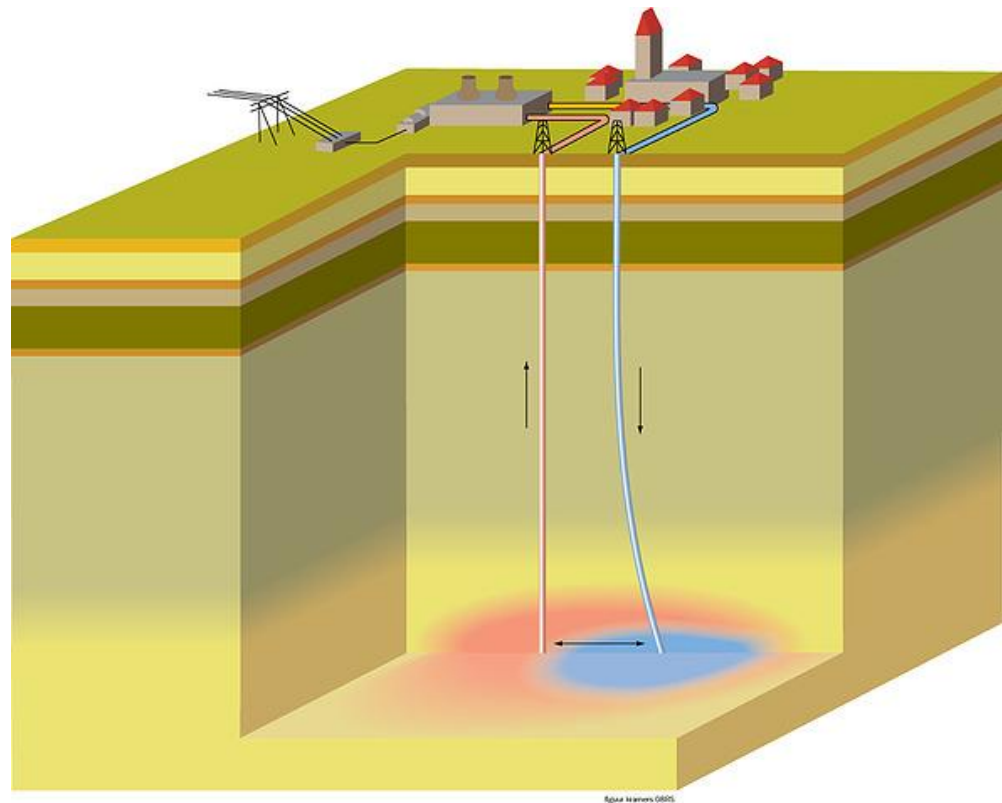
Deze tool is, op dit moment, niet voor operationele doeleinden bestemd. Er wordt gewerkt aan een verbeterde versie. In deze verbeterde versie zullen de verschillen in parameters van de lithologische eenheden (seal, reservoir) worden meegenomen.

¹ DoubletCalc is een programma waarmee een indicatief vermogen van een geothermiedoublet berekend kan worden. Met het programma kan onder meer de overschrijdingskansgrafiek worden verkregen die onderdeel uitmaakt van de subsidieaanvraag voor de Regeling 'SEI risico's voor Aardwarmte'. 'bron: <http://www.nlog.nl/nl/geothermalEnergy/DoubletCalc.html>'

2 Aardwarmte in Nederland

De temperatuur in de ondergrond van Nederland neemt met circa 30 °C per kilometer diepte toe. Hierdoor kan vanaf circa 1,5 km diepte aardwarmte worden gebruikt voor directe verwarming van woningen en kassen, en vanaf circa drie kilometer diepte ook voor de productie van elektriciteit.

De warmte uit de aarde wordt onttrokken door het aanboren van een geschikt (geothermisch) reservoir op een diepte van enkele kilometers. Warm water wordt met behulp van één of meer productieputten naar de oppervlakte gehaald (Figuur 1). Vervolgens wordt met een warmtewisselaar de energie afgegeven aan een warmtenet, dat huizen of kassen van warmte voorziet. Het afgekoelde water wordt in één of meer injectieputten in het reservoir teruggepompt enerzijds om bodemdaling tegen te gaan door het op druk houden van het reservoir, en anderzijds omdat het water te zout is om op oppervlaktewater te mogen lozen.



Figuur 1. Schematische weergave van een aardwarmtebron.

3 Overzicht interface

De interface bestaat uit links een invoer- en een uitvoerveld, en rechts drie grafieken.

Aan de linkerkant kunnen de parameters worden ingevoerd. Aan de hand van deze parameters worden de grafieken samengesteld, en wordt in het uitvoerveld aangegeven of de injectiedruk in combinatie met de set parameters toelaatbaar is, of er fracking optreedt, en of er kans is op breukreactivatie.

De middelste grafiek geeft een grafisch overzicht van de heersende drukken.

De Mohr-Coulomb diagrammen aan de rechterkant geven de spanningstoestand weer van de initiële spanning en de spanningstoestand ten gevolge van respectievelijk injectie en productie. De faallijnen die in de diagrammen weergegeven zijn, zijn alleen geldig als er daadwerkelijk breuken nabij het doublet aanwezig zijn.

3.1 In- en uitvoerveld

Invoerveld

In het invoerveld (Figuur 2) kunnen de parameters van de aardwarmtebron worden ingevoerd. Omdat bepaalde parameters op voorhand niet bekend zijn, zijn er ook default parameters gegeven (tweede kolom van rechts).

Het invoerveld is opgedeeld in drie delen, met verschillende kleuren, op basis van:

1. Diepte- en drukgegevens
2. Temperatuurgegevens
3. Gesteenteparameters

Een deel van de invoergegevens kan uit DoubletCalc worden overgenomen (zie bijlage 1). Zodra er gegevens van de boring bekend zijn, kunnen meer realistische invoergegevens gebruikt worden.

Uitvoerveld

In het uitvoerveld worden drie aspecten aangegeven:

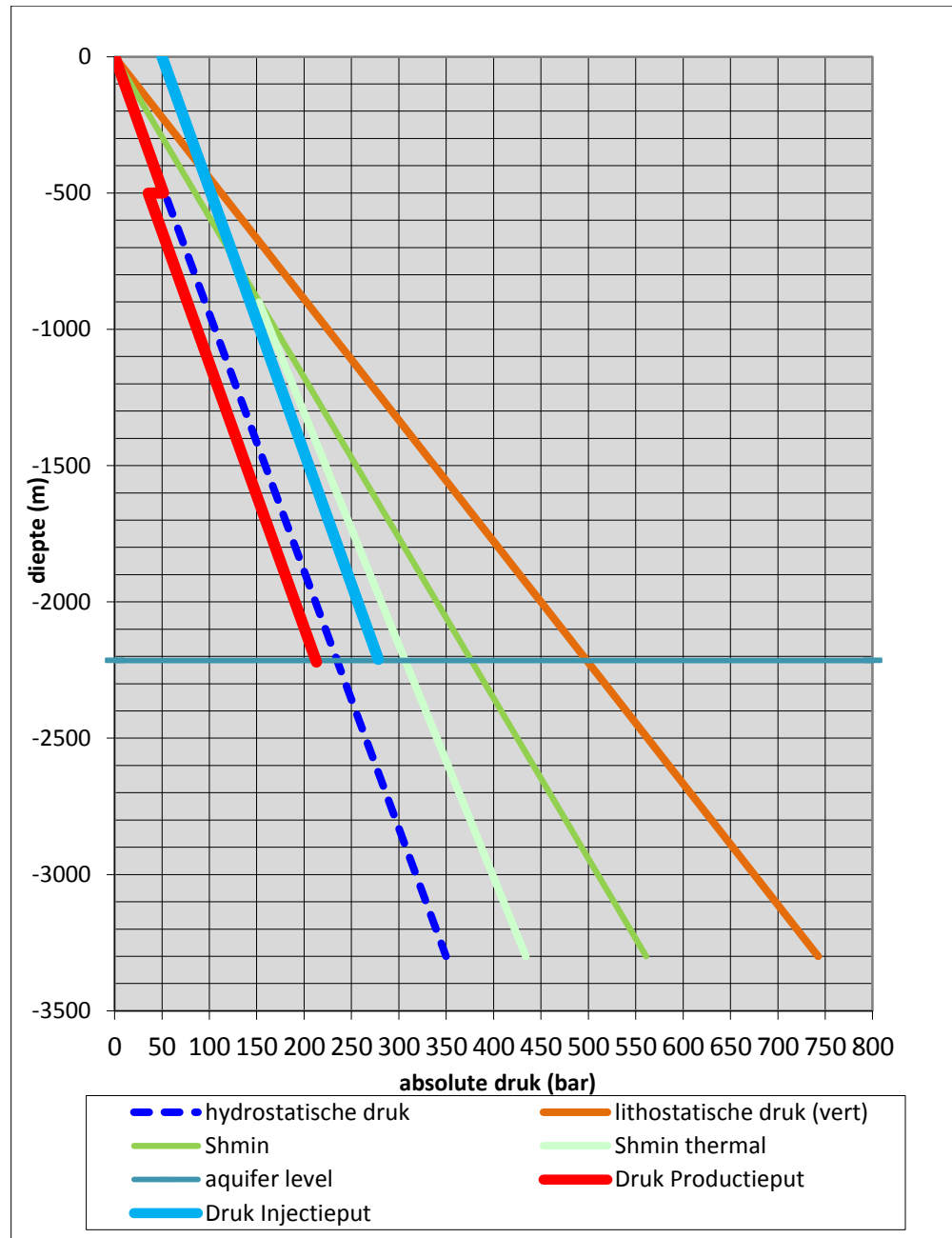
1. Of de injectiedruk is toegestaan volgens het protocol (Staatstoezicht op de Mijnen, 2013). De injectiedruk aan het oppervlak mag volgens het protocol niet groter zijn dan de diepte van de injectieput $\times (0,135 - \text{hydrostatische gradiënt})$ (in bar).
2. Of er fracking optreedt. Dit is het geval wanneer de reservoirdruk groter is dan de minimale horizontale spanning.
3. Of er kans is op reactivatie van bestaande breuken. Dit geldt alleen als er breuken aanwezig zijn dichtbij het doublet.

Invoer parameters	waarde	Default	eenheid
Diepte top aquifer in productieput	-2220		m
Diepte top aquifer in injectieput	-2210	x	m
Gemiddelde diepte top aquifer	-2215	x	m
Diepte pomp	-500	-500	m
Aquiferdruk Productieput	229	x	bar
Aquiferdruk Injectieput	228	x	bar
Bottom hole pressure Productieput	213	x	bar
Bottom hole pressure Injectieput	278	x	bar
Drukverschil over put-aquifer interface in productieput	16	x	bar
Drukverschil over put-aquifer interface in injectieput	50	x	bar
hydrostatische gradient	0.106	0.106	bar/m
lithostatische gradient	0.225	0.225	bar/m
minimale horizontale spanningsgradient (bar/m)	0.17	0.16	bar/m
Injectietemperatuur	45	x	°C
Aquifer temperatuur @ productieput	97	x	°C
Aquifer temperatuur @ injectieput	97	x	°C
Delta temperatuur @ injectieput	52	x	°C
Temperatuurgradient	0.039	0.032	°C/m
Gemiddelde oppervlaktetemperatuur	10	10	°C
Youngs modulus	10000	10000	Mpa
Poisson's ratio	0.25	0.25	frac
Arching coefficient	0.4	0.4	
Biot coefficient	0.75	0.75	
Linear thermal expansion coefficient (°C-1)	1.00E-05	1.00E-05	°C ⁻¹
Cohesie	0	0	bar
Hoek van inwendige wrijving	33	33	°
Invloed thermische stress	Ja		
Uitvoer	waarde		
Druk toegestaan volgens protocol	JA		
Fracking	NEE		
Kans op breukreactivatie	JA		

Figuur 2. In- en uitvoerveld.

3.2 Grafieken

3.2.1 Fracking



Figuur 3. Overzicht spanningen

In de middelste grafiek (Figuur 3) staan de spanningen in de ondergrond gegeven. Wanneer de lichtblauwe lijn (de druk in de injectieput) de lijn van de minimale horizontale spanning (S_{hmin}) overschrijdt, zal er fracking optreden. Er worden horizontale spanningen gegeven voor 2 scenario's: één zonder thermische effecten (groene lijn), en één met thermische effecten (lichtgroene lijn).

Vanwege de lage temperaturen zal, in de buurt van de injectieput, contractie plaatsvinden van het gesteente. Dit wordt ook wel thermisch fracken genoemd en is waarschijnlijk de oorzaak van goede injectiviteit dichtbij de put in veel projecten. Naarmate de afstand tot de injectieput toeneemt, zal de temperatuur van het gesteente ook toenemen waardoor thermisch fracken niet meer waarschijnlijk is. Het lage temperatuur regime zal zich gedurende de levensduur van het doublet steeds verder uitbreiden. De lengte van deze thermische fracs zal overigens vrij klein zijn (orde van grootte: centimeters tot decimeters).

Achterliggende berekeningen

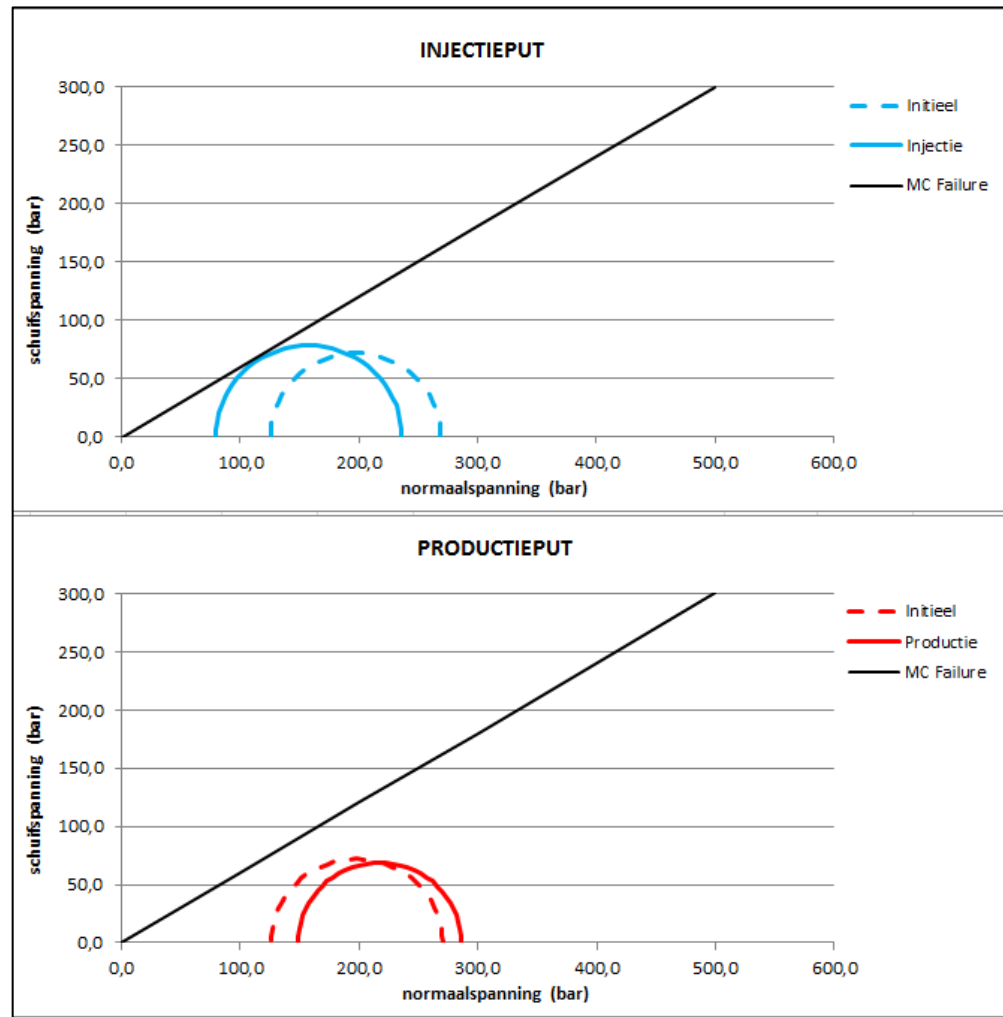
De hydrostatische, lithostatische, en de minimale horizontale (S_{hmin}) druk worden berekend door de respectievelijke drukgradiënt te vermenigvuldigen met de diepte.

De drukken in de injectie- en productieput worden berekend aan de hand van het opgelegde drukverschil in de invoerparameters. (in dit geval is uitgegaan dat de productie pomp op 500 m diepte hangt).

3.2.2 *Reactivatie van breuken*

In de twee grafieken (Figuur 4) zijn de Mohr-Coulomb diagrammen gegeven voor de injectie- en productieput. Een Mohr-Coulomb diagram beschrijft de spanningstoestand van het gesteente. Wanneer de cirkel onder de faallijn blijft, is er geen kans op breukreactivatie. Wanneer de cirkel gedeeltelijk boven de faallijn komt zal een gedeelte van de breuken in de omgeving gereactiveerd kunnen worden afhankelijk van de oriëntatie van de breuk. De initiële spanningstoestand is gegeven door de gestreepte cirkels. De andere cirkels (doorgetrokken lijn) bepalen de spanningstoestand wanneer er geïnjecteerd (blauw) en geproduceerd (rood) gaat worden, en geven aan hoe de spanningstoestand veranderd.

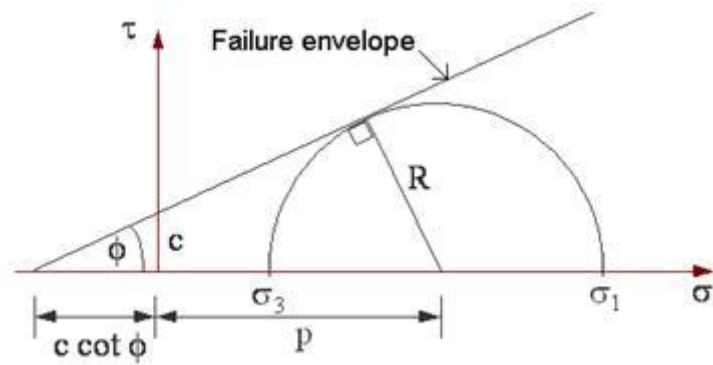
Als thermische effecten worden meegenomen, wordt reactivatie van breuken dichtbij de injectieput waarschijnlijk. Naarmate de afstand tot de injectieput afneemt en de temperatuur toeneemt, neemt de kans op reactivatie van bestaande breuken af.



Figuur 4. Overzicht spanningstoestand in de injectie- en productieput.

Achterliggende berekeningen

De spanningstoestand wordt weergegeven met een Mohr-cirkel in een grafiek waarin de schuifspanning ten opzichte van de normaalspanning wordt uitgezet. De Mohr-cirkel is een representatie van de spanningstoestand en heeft als snijpunten met de horizontale (normaalspannings-) as de kleinste en grootste principiële effectieve spanning (σ'_1 en σ'_3), in een gebied in extensie respectievelijk de lithostatische druk en de minimale horizontale druk, minus de aquiferdruk: dit geeft de effectieve spanning). Dit zijn de spanningen die een maximale schuifspanning veroorzaken ten opzichte van elkaar en daarom de grootste Mohr-cirkel geven.



Figuur 5. Mohr Coulomb diagram

De lijn waarbij failure (het breken van gesteente of breukreactivatie) optreedt wordt beschreven door de volgende formule:

$$\tau = \sigma \tan(\phi) + c$$

Waarbij c de cohesie van het gesteente is en ϕ de hoek van interne wrijving, dit zijn beide gesteenteparameters. Voor een breuk wordt een cohesie van 0 aangenomen.

Wanneer de injectiedruk toeneemt, neemt de effectieve spanning af en verschuift de Mohr-cirkel naar links richting de failure lijn.

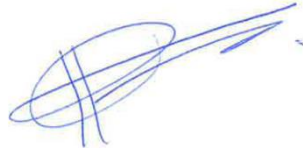
4 Referenties

Staatstoezicht op de Mijnen, 2013. Protocol bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning (<http://www.sodm.nl/onderwerpen/aardwarmte/injectie-bijvangst-aanleveren-gegevens>)

5 Ondertekening

Utrecht, 21 juli 2014

TNO

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

I.C. Kroon
Afdelingshoofd

Len Paalvast, Karin van Thienen-Visser
Auteur

Bijlage 1. Voorbeeld DoubletCalc

Invoer parameters	waarde	Default	dimensie
Diepte top aquifer in productieput	-2220	X	m
Diepte top aquifer in injectieput	-2210	X	m
Gemiddelde diepte top aquifer	-2215	X	m
Aquiferdruk Productieput	229	X	bar
Aquiferdruk Injectieput	228	X	bar
Bottom hole pressure Productieput	213	X	bar
Bottom hole pressure Injectieput	261	X	bar
Drukverschil over put-aquifer interface in productieput	16	X	bar
Drukverschil over put-aquifer interface in injectieput	33	X	bar
hydrostatische gradient	0.106	0.106	bar/m
lithostatische gradient	0.225	0.225	bar/m
minimale horizontale spanning gradient (bar/m)	0.16	0.16	bar/m
Injectie temperatuur	35	X	°C
Aquifer temperatuur @ productieput	97	X	°C
Aquifer temperatuur @ injectieput	97	X	°C
Delta temperatuur @ injectieput	62	X	°C
Temperatuur Gradient	0.032	0.032	°C/m
Gemiddelde oppervlakte temperatuur	10	10	°C
Youngs modulus	10000	10000	Mpa
Poisson's ratio	0.25	0.25	frac
Arching coefficient	0.4	0.4	
biot coefficient	0.75	0.75	
Linear thermal expansion coefficient (°C-1)	1.00E-05	1.00E-05	°C ⁻¹
Cohesie	0	0	bar
Hoek van inwendige wrijving	31	31	°
Invoerd thermische stress	Neel		

Doublet Calculator 1.4 Result Table

file: ... \pboow\top_pno_2013\6-sde\aanragen_2013\04 agripoot_in02 analyse\agrl_3_aanraag.xml

Geotechnics (Input)

Property	min	median	max
aquifer permeability (mD)	40.0	240.0	520.0
aquifer net to gross (-)	0.97	0.99	1.0
aquifer cross thickness (m)	141.0	150.0	159.0
aquifer top at producer (m TVD)	1998.0	2220.0	2442.0
aquifer top at injector (m TVD)	1999.0	2210.0	2431.0
aquifer water salinity (ppm)	150000.0	165000.0	180000.0

Geotechnics (Output)

Property	value	base case (median value inputs)	value
number of simulator runs (-)	1000.0		
aquifer kh:kv ratio (-)	1.0	aquifer KH net (Dm)	35.75
surface temperature (°C)	10.0	mass flow (kg/s)	85.73
geothermal gradient (°C/m)	0.038	pump volume flow (m³/h)	284.7
mid aquifer temperature producer (°C)	0.0	required pump power (kW)	527.2
aquifer pressure at producer (bar)	0.0	geothermal power (MW)	18.19
aquifer pressure at injector (bar)	0.0	COP (kW/kW)	34.5
soil temperature heat exchanger (°C)	35.0	aquifer Pressure at producer (bar)	229.2
distance wells at aquifer level (m)	1000.0	aquifer Pressure at injector (bar)	228.19
pump system efficiency (-)	0.75	Pressure difference at producer (bar)	16.0
production pump depth (m)	400.0	Pressure difference at injector (bar)	32.98
pump pressure difference (bar)	50.0	aquifer temperature at producer (°C)	97.21
outer diameter producer (inch)	8.5	Temperature at heat exchanger (°C)	95.88
skin producer (-)	0.0	* @ mid aquifer depth	
skin due to penetration angle p (-)	-0.15		
ubing segment sections p (m AH)	400.0		
ubing segment depth p (m TVD)	400.0		
ubing inner diameter p (inch)	5.92		
ubing roughness p (milli-inch)	1.8		
outer diameter injector (inch)	8.5		
skin injector (-)	0.0		
skin due to penetration angle (-)	-0.15		
ubing segment sections i (m AH)	1689.0		
ubing segment depth i (m TVD)	1689.0		

TNO CONFIDENTIEEL