Geothermie putten in ondiepe fijnzandige formaties

Literatuuronderzoek en ervaringen uit de olie/gas-, drinkwater- en WKO-sector.

IF Technology **Creating energy**

Datum	18 december 2019
Referentie	65163/RDx/20191218
Betreft	Kennisagenda Geothermie fijnzandige formaties
Behandeld door	Nick Buik en Guido Bakema
Gecontroleerd door	Roel Dirkx
Versienummer	Definitief

OPDRACHTGEVER

Dutch Geothermal Research Agenda (Kennisagenda Aardwarmte)

These technical guidelines have been made possible by the Kennisagenda subsidy of the Ministry of Economic Affairs, LTO Glaskracht Nederland and the program Kas als Energiebron.

INHOUDSOPGAVE

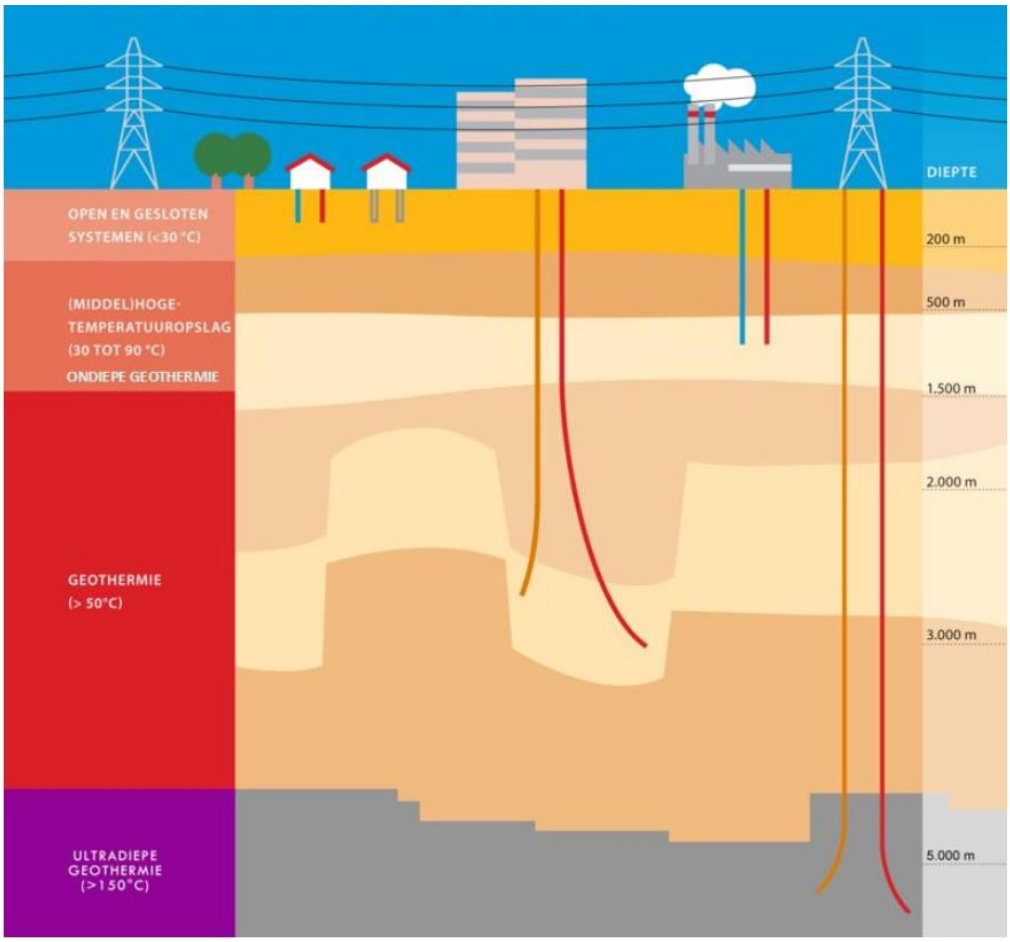
1 Inleiding 4
1.1 Kader 4
1.1.1 Diverse vormen van geothermie 4
1.1.2 Ondiepe geothermie 5
1.2 Specifieke onderzoeksvragen 6
2 Geologisch kader 7
3 Huidige ervaringen en normen 9
3.1 Putten in ongeconsolideerde formaties 9
3.2 warmte-/koudeopslag 10
3.2.1 Snelheid op de boorgatwand 11
3.2.2 Korrelgrootte, grofheid gravelpack en filterspleet 13
3.2.3 Conclusies WKO-putten normen 14
3.3 Drinkwatersector 14
3.3.1 Normen drinkwaterputten 15
3.3.2 Snelheid op de boorgatwand en maximaal debiet 15
3.3.3 Conclusies drinkwaterputten normen 16
3.4 Alternatieve ontwerpnormen 16
3.4.1 Maximale verlaging/verhoging in de put 16
3.4.2 Maximale stroomsnelheid in de filterspleet 17
3.5 Normen Olie- en gasoperators 17
3.5.1 Petrogas 17
3.5.2 Conclusies gasputten normen 19
4 Ondiepe geothermie case Zevenbergen 20
4.1 Achtergrond 20
4.1.1 Ontwerp en proefboring 22
4.1.2 Uitvoering 24
4.1.3 Conclusies project ondiepe geothermie Zevenbergen 25
5 Literatuur onderzoek zandproductie olie en gas 26
5.1 Algemeen 26
5.2 Gravelpack en filterspleet 26
5.3 Zandproductie 27
5.4 Richtlijn op basis van Shear failure criterum 33
5.5 Conclusies Drucker-Prager criterium 36
6 Conclusies en aanbevelingen 38
6.1 samenvatting Normen 38
6.2 Conclusies 39
6.3 Aanbevelingen 40
7 Literatuur 42
Bijlage 1 44

1 Inleiding

1.1 KADER

1.1.1 Diverse vormen van geothermie

Geothermie kan in verschillende vormen worden toegepast in Nederland (Figuur 1.1), waaronder: ondiepe geothermie (OGT), diepe geothermie (GT) en ultradiepe geothermie (UDG).



Figuur 1.1 | Schematisch overzicht van de verschillende vormen van geothermie. Open en gesloten systemen vallen onder de noemer bodemenergiesystemen. OGT bevindt zich in dezelfde diepte als hogetemperatuuropslag.

Ondiepe geothermie werkt volgens hetzelfde principe als diepe geothermie, maar omdat de temperaturen relatief laag zijn (lager dan 45 ºC) dient deze methode gebruikt te worden in combinatie met een warmtepomp die eventueel van energie voorzien kan worden door een groene energiebron, zoals zonnepanelen. Dit maakt de kosten hoger, maar daar staat tegenover dat boren juist een stuk goedkoper is. Daarbij zijn de onderhoudskosten ook relatief laag, omdat het opgepompte water minder corrosief is dan het water dat bij diepe geothermie opgepompt wordt.

Het eerste diepe geothermieproject in Nederland is in 2007 gerealiseerd en betreft de warmtevoorziening van tomatenkwekerij Van den Bosch in Bleiswijk. Ondertussen zijn meer dan 20 projecten gerealiseerd en zijn er lopende initiatieven voor geothermie in Friesland, Groningen, Flevoland, Brabant en Limburg. Van alle gerealiseerde projecten is slechts één project ontwikkeld in de bebouwde omgeving, het geothermie project aan de Leyweg in Den Haag (mogelijk operationeel in 2020).

Ondiepe geothermie is toegepast bij een project in Zevenbergen. UDG zit nog in de onderzoeksfase. Voor een overzicht van orde van grootte van de kosten en huidige commerciële toepasbaarheid van de verschillende technieken zie onderstaande tabel (Tabel 1.1).

Tabel 1.1 | Overzicht kosten en commerciële toepasbaarheid verschillende technieken van geothermie.

Techniek	Kosten	Onzekerheidsprofiel	Commerciële toepasbaarheid
Ondiepe geothermie	€ (orde 1 – 10 miljoen)	Beheersbaar tot hoog	Technologie is als prototype toegepast in operationele omgeving in de glastuinbouwsector (1 prototype doublet in gebruik).
Diepe geothermie	€€ (orde 10 – 20 miljoen)	Beheersbaar	Technologie is getest en bewezen toegepast in operationele en commerciële omgeving in met name de glastuinbouwsector en één keer in de bebouwde omgeving in Den Haag (24< doubletten in gebruik). Techniek is geschikt voor direct gebruik in bestaande bouw i.c.m. een warmtenet.
Ultradiepe geothermie	€€€ (orde >40 miljoen)	Zeer hoog	Technologie is nog niet toegepast in een pilot omgeving (geen doubletten in gebruik). UDG wordt op dit moment ontwikkeld binnen het kennisprogramma Green Deal Ultradiepe Geothermie.

1.1.2 Ondiepe geothermie

Bij OGT (ondiepe geothermie) wordt warm grondwater onttrokken uit veelal fijnzandige ongeconsolideerde reservoirs tussen de 300 en 1.250 m-mv met temperaturen tussen de 20 en 40 °C. Putten die produceren uit ongeconsolideerde fijnzandige formaties kunnen deeltjes (slib en fijn zand) vanuit de formatie mobiliseren. Door de toepassing van de juiste zandfilters kan productie van dit zand grotendeels worden voorkomen. Als er toch kleine deeltjes geproduceerd blijven worden kan dit leiden tot versnelde slijtage van de bovengrondse installatie en kan het specifiek debiet van de productieput verminderen door vorming van een skin. Fijnzandige formaties hebben in het algemeen een D_{50} (zandmediaan) die kleiner is dan 180 µm (Tabel 1.2).

Tabel 1.2 | Classificatie grondsoorten volgens NEN 5104.

Ondergrens	Bovengrens	Fractie
300 µm	420 µm	Zeer grof zand
210 µm	300 µm	Matig grof zand
150 µm	210 µm	Matig fijn zand
105 µm	150 µm	Zeer fijn zand
63 µm	105 µm	Uiterst fijn zand

In de ondiepe formaties (50 - 300 m-mv) is door de drinkwaterwinning en warmte-/koudeopslag (WKO) veel ervaring opgedaan met ontwerpen en maken van deeltjesvrije putten. Echter die kennis is maar deels bruikbaar voor diepere formaties omdat de ondiepe formaties vaak een orde meer permeabel zijn (D_{50} tussen de 180 en 360 µm)

Putten voor geothermie worden ontworpen door uit te gaan van een maximaal toelaatbaar drukverlies in het systeem. Deze ontwerpstrategie houdt bij het bepalen van het maximale debiet geen rekening met het risico op het mee produceren van fines (zand) (er worden wel maatregelen genomen om fines tegen te houden). Voor ondiepe ongeconsolideerde formaties werkt deze ontwerpstrategie niet en zal het beperken van zandlevering het belangrijkste criterium voor het maximale debiet moeten zijn.

In de olie- en gasindustrie wordt ook gebruik gemaakt van ondiepe putten (1000 tot 1.500 m-mv). Doordat er veel olieputten zijn die voor een groot deel water produceren kan de kennis van deze industrie ook gebruikt worden voor het opzetten van richtlijnen voor de realisatie voor putten voor OGT.

Op dit moment is er in Nederland één ondiep geothermieproject gerealiseerd. Dit project bevindt zich in Zevenbergen en het produceert uit de zanden van Brussel door middel van horizontale putten. De ervaringen en gegevens van dit project kunnen meer inzicht geven in richtlijnen voor de realisatie van putten voor OGT.

1.2 SPECIFIEKE ONDERZOEKSVRAGEN

De belangrijkste vraag die in dit onderzoek moet worden beantwoord is in welke mate kennis en ervaringen uit de olie- en gasindustrie, drinkwatersector en warmte/koudeopslag kunnen worden toegepast in ondiepe geothermie om zand- en sliblevering te voorkomen.

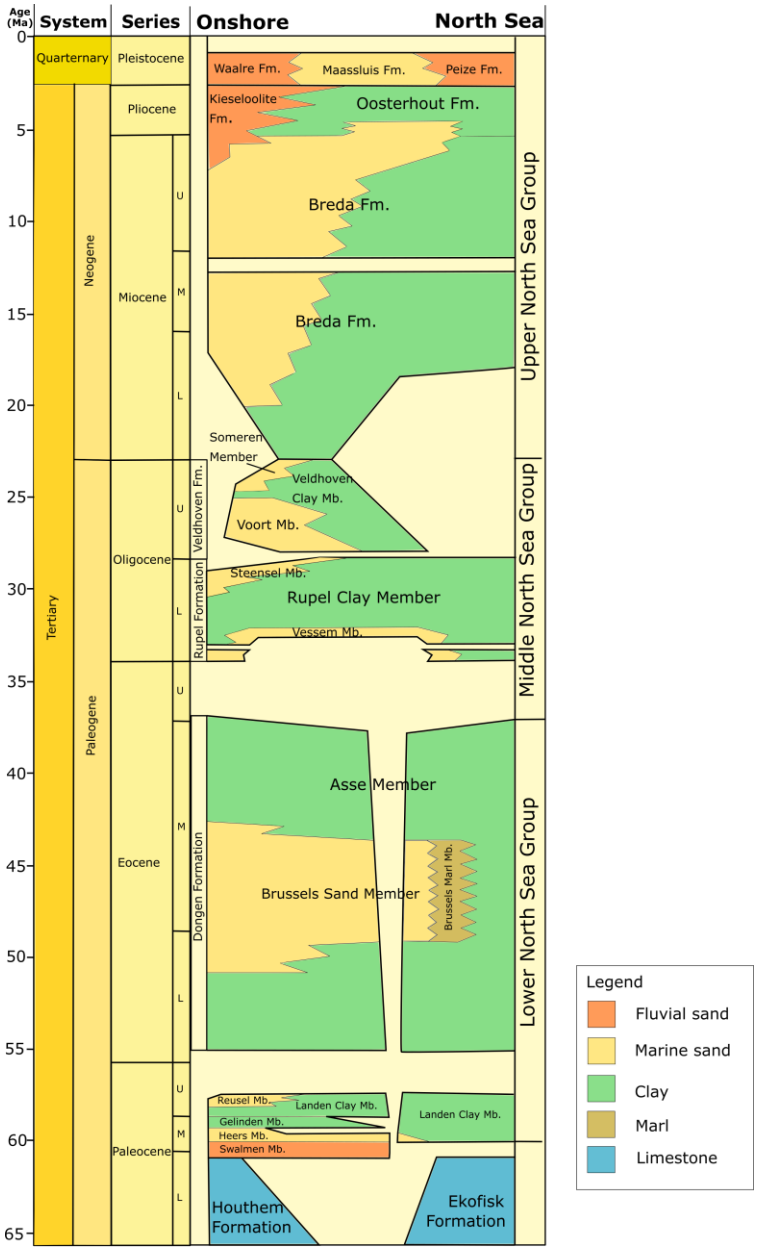
2 Geologisch kader

De potentie van OGT hangt voornamelijk af van de dikte, permeabiliteit en geothermische gradiënt. Binnen de bovenste 1.250 m-mv van de ondergrond liggen voornamelijk lagen van Tertiaire en Vroeg Kwartaire ouderdom. De lagen maken deel uit van de Noordzee Supergroep. De focus voor de toepassing van ondiepe geothermie ligt dan ook op deze afzettingen. In Figuur 2.1 zijn de potentiële reservoirs van de Noordzee Supergroep weergegeven.

Welke zandlichamen als potentieel formatie in aanmerking komen is gebaseerd op de dikte van het zandlichaam. Naast een bepaalde minimale permeabiliteit dient het zandlichaam een bepaalde minimale dikte te hebben om interessant te zijn als OGT-reservoir (IF Technology, KEMA, DLV Glas en Energie 2012). De analyse is uitgevoerd op basis van informatie van NLOG. Na de analyse blijven binnen Nederland slechts vier lagen over die in grote delen van Nederland voldoende dik zijn voor de toepassing van ondiepe geothermie. Dit zijn het Zand van Brussel, de Formatie van Breda, de Formatie van Oosterhout en de Formatie van Maassluis (zie bijlage 1, Tabel 2.1). Daarnaast zijn lokaal mogelijk het zand van Voort en het zand van Heers geschikt.

Tabel 2.1 | Geohydrologische karakterisering formaties geschikt voor ondiepe geothermie.

Formatie	Diepte ligging (m-mv)	Doorlatendheid hor. (m/d)	Dikte (m)
Maassluis	100 - 500	6,0 – 10,0	0 - 180
Oosterhout	100 - 700	4,0 – 8,0	0 - 300
Breda	150 - 1000	0,3 – 0,4	0 - 500
Brussel	150 - 1300	0,4 – 0,6	0 - 150



Figuur 2.1 | Overzicht potentiële formatie voor OGT in Noordzee Supergroep naar Pluymaekers (Pluymaekers, M et al 2013).

3 Huidige ervaringen en normen

3.1 PUTTEN IN ONGECONSOLIDEERDE FORMATIES

De formaties die geschikt zijn voor ondiepe geothermie zijn voor het overgrote deel volledig ongeconsolideerd. Om zandvrije putten te maken in dergelijk formaties is het belangrijk dat de toestromende zanddeeltjes worden tegengehouden. Dit kan worden bereikt door een juiste selectie van de filteropening maar nog meer door het creëren van een zandfilterende zone rond de put. Deze zandfilterende zone kan op twee manieren ontstaan. De eerste methode is de “naturally developed gravel packs” waarbij direct in het boorgat een filter wordt geplaatst, zie Figuur 3.1. Hierna wordt door het verwijderen van de klei, silt en zanddeeltjes rond het boorgat een filterzone (10- 25 cm) gecreëerd bestaande uit de grovere delen van de formatie. Dit zogenaamde natuurlijk gravelpack wordt gecreëerd door een filter te selecteren waarbij 40 % van het formatie-materiaal wordt tegengehouden (Driscoll 1987). Dit betekent dat tijdens het ontwikkelen van de put in het begin veel zand vrijkomt.

Bij de tweede methode, de “gravel packed wells”, wordt er een boorgat gemaakt dat groter is dan de filterdiameter. De ontstane annulaire ruimte wordt opgevuld met filtermateriaal bestaande uit grof zand of grind. Hierna worden de fijne delen uit het gravel pack en de formatie verwijderd.

De natuurlijke gravel packed wells kunnen alleen worden toegepast in grove niet homogene pakketten. Voor fijnzandige homogene pakketten is een gravel pack noodzakelijk omdat het, door het ontbreken van een grof zandige fractie, onmogelijk is een natuurlijk gravel pack te creëren (Driscoll 1987).

Misstear (Misstear en et al 2006) geeft aan dat een natuurlijk gravelpack gebruikt kan worden als het pakket slecht gesorteerd en redelijk grofzandig is. De sortering wordt bepaald op basis van Vergelijking 1 waarbij voor slecht gesorteerde pakketten een Uniformiteitscoëfficiënt (UC) groter dan 3 wordt gehanteerd. Voor grofzandige pakketen wordt een norm van D10 > 250 µm aangehouden.

Vergelijking 1: Uniformiteit coëfficiënt.

$$UC = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D_{60} : Diameter waarbij 60 % fijner is.
D_{10} : Diameter waarbij 10% fijner is.

Gezien de korrelgrootte (veelal D_{50} kleiner dan 180 µm) van de voor ondiepe geothermie (zie bijlage 1) geschikte formaties, is het niet aannemelijk dat een dergelijke grove fractie en slechte sortering aanwezig is.

Figuur 3.1 | Naturally gravel packed wells (Driscoll 1987).

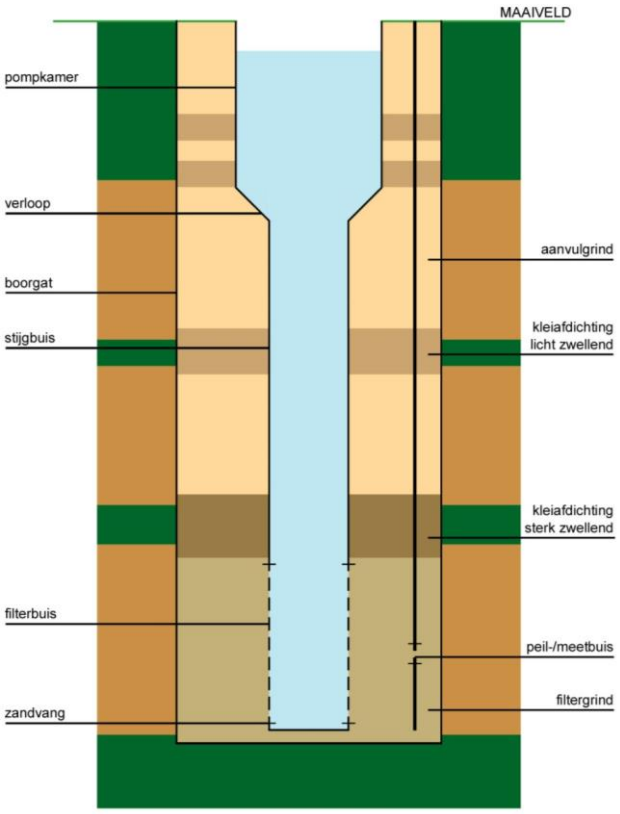
3.2 WARMTE-/KOUDEOPSLAG

Op dit moment zijn er in Nederland tussen de 6.000 en 8.000 bronnen geboord voor WKO-toepassingen. Het over grote deel is gemaakt in matig tot zeer grofzandige formaties. Een zeer beperkt deel van de WKO-projecten is gemaakt in de formaties van Oosterhout en Maassluis (diepte tussen de 200- 250 m-mv). Vanwege de fijnzandigheid (D50-cijfer 180) en de sterke heterogeniteit van deze formaties worden er meer putverstoppingsproblemen aangetroffen dan bij meer ondiepe (< 150 m-mv) meer grofzandige formaties (IF Technology 2002).

Voor WKO-bronnen is het ontwerp genormaliseerd binnen de BRL SIKB 11000. Een principeschema van een WKO-bron is weergegeven in Figuur 3.2.

De volgende uitgangspunten gelden voor het ontwerp van WKO-bronnen:

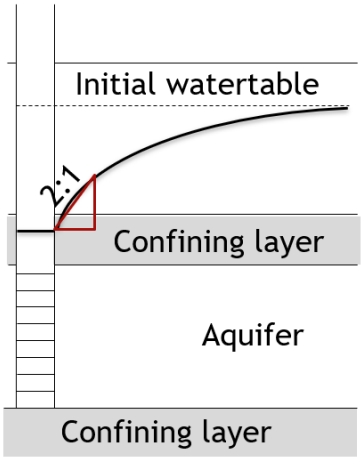
- WKO-bronnen worden gemaakt in ongeconsolideerde zandpakketten met een D50-cijfer (zandmediaan) tussen de 180 en 360 µm. WKO-bronnen worden geboord met de zuigboortechniek (zonder casing) met een diameter tussen de 800 en 450 mm en een diepte tot max 300 m-mv. Het open boorgat wordt voorzien van PVC pompkamer en PVC filterbuis.
- De filterbuis wordt altijd omstort met filtergrind (gravelpack). De rest van het boorgat wordt aangevuld met zwellende klei of aanvulgrind. De dikte van het gravelpack is afhankelijk van de boordiameter en ligt tussen de 150 en 300 mm.



Figuur 3.2 | Principeschema WKO bron.

3.2.1 Snelheid op de boorgatwand

Voor deze toepassing is een maximale toelaatbare snelheid (snelheid waarbij nog geen zandproductie optreedt) op de boorgatwand gedefinieerd (Buik 2001). De snelheid is gebaseerd op een maximaal toelaatbare drukgradiënt op de boorgatwand welke aan de hand van honderden projecten empirisch is bepaald. De afgeleide maximale drukgradiënt op de boorgatwand is 2. Dit betekent een dusdanige snelheid (debiet) waarbij het verschil in stijghoogteverandering in de put op 1 meter afstand, 2 meter is. In Figuur 3.3 is de drukverlaging te zien bij onttrekking.



Figuur 3.3 | Maximale drukgradiënt.

De drukgradiënt snelheid wordt berekend met behulp van Vergelijking 2.

Vergelijking 2: Maximale drukgradiënt snelheid.

$$v_\max = \frac{2\,k}{24}$$

v_max : maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand [m/h]
k : doorlatendheid bij 12 °C [m/d]

De doorlatendheid wordt afgeleid uit pomp- of capaciteitsproeven. Indien deze niet beschikbaar zijn wordt de doorlatendheid berekend op basis van de zandmediaan uit boorstaten. De zandmediaan wordt door middel van de empirische relatie van Sheperd (Sheperd 1989) omgerekend naar een doorlatendheid, zie Vergelijking 3.

Vergelijking 3: Doorlatendheid op basis van Sheperd.

$$k = 150 * (D50)^{1,65}$$

D50 : zandmediaan [mm]
k : doorlatendheid bij 12°C [m/d]

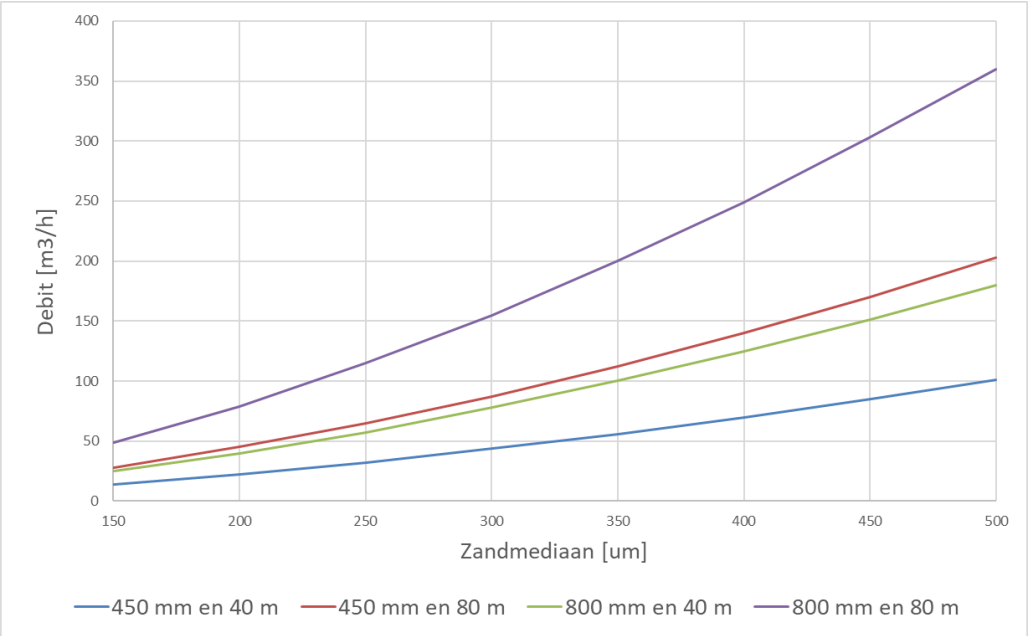
De snelheid op de boorgatwand is om te rekenen naar een debiet door middel van Vergelijking 4.

Vergelijking 4: Maximaal debiet WKO-put.

$$q = v_\max 2\,\pi\,r\,H$$

r : straal boorgat [m]
H : filterlengte [m]
q : debiet [m^3/h]

Het maximale debiet voor fijne zanden (D50-cijfer < 180 µm) ligt tussen de 15 en 80 m^3/h afhankelijk van de dikte van het pakket en de diameter van de bron. Dit debiet houdt geen rekening met andere ontwerpcriteria zoals injectiedruk en infiltratienormen. Verhoging van het debiet is mogelijk als het criterium voor de maximale stroomsnelheid op de boorgatwand wordt verruimd. Figuur 3.4 is de relatie tussen debiet, korrelgrootte, filterlengte en diameter van de bron grafisch weergegeven.



Figuur 3.4 | Relatie tussen debiet, korrelgrootte, filterlengte en diameter van de bron. De doorlatendheid varieert tussen 7 m/d (150 um) en 48 m/d (500 um).

3.2.2 Korrelgrootte, grofheid gravelpack en filterspleet

Het doel van het gravel pack is het tegenhouden van fines (fijn zand) uit het reservoir. De grofheid van de gravel pack wordt bepaald op basis van de D50 van de fijnste laag waarin het filter wordt geplaatst volgens Vergelijking 5.

Vergelijking 5: Bepaling grofheid gravel pack.

Gemiddelde korrelmaat gravel pack = D50 van de fijnste zandlaag x 4

De filterspleet van het PVC-filter moet zodanig worden ontworpen dat de filterspleet het gravel pack tegenhoudt. Hiervoor wordt de volgende stelregel aangehouden:

De filterspleet dient 0,1 mm kleiner te zijn dan de geselecteerde ondermaat van de standaard korrelmaat van het filtergrind.

Voorbeeld bronfilter en gravel pack selectie

In Tabel 3.1 is een voorbeeld dimensionering weergegeven.

Tabel 3.1 | Voorbeeld dimensionering filtergrind en screen WKO-sector.

D50- cijfer[um]	Korrelmaat omstorting [mm]	Sleuf-breedte [mm]
105	0,20-0,63	0,1
150	0,40-0,80	0,3
160	0,50-1,00	0,4
180	0,63-1,00	0,5
200	0,63-1,00	0,5
220	0,71-1,25	0,5
240	0,80-1,25	0,5
260	0,80-1,25	0,5
300	0,80-1,25	0,5
420	0,80-1,25	0,5

Voor zanden met een D50 groter dan 180 µm is PVC-filter vrijwel altijd toepasbaar. Bij fijner zand moet een rvs-wikkeldraad moeten worden toegepast.

3.2.3 Conclusies WKO-putten normen

WKO-bronnen worden bijna altijd gemaakt in zandpakketten met een D50 > dan 180 µm. De ervaring met het gebruik van fijnzandige formaties zoals Oosterhout en Maassluis (< 180 µm) voor WKO is beperkt tot enkele projecten. Voor deze projecten is zandlevering en putverstopping een belangrijk aandachtspunt.

Bronnen worden altijd geboord met de zuigboortechniek en afgewerkt met een PVC-filter en een gravel pack. Bronnen in fijnzandige formaties (< 180 µm) zullen gebruik moeten maken van RVS-filters in plaats van de voor WKO gebruikelijke PVC-filters. RVS-filters zijn aanzienlijk duurder dan PVC-filters.

Het debiet dat volgens de huidige ontwerpcriteria aan WKO-bronnen in fijnzandige formaties (D50-cijfer < 180 µm) kan worden onttrokken ligt tussen de 15 en 80 m3/h. Hierbij varieert de dikte van het pakket tussen de 40 en 80 m en een diameter van de put tussen de 450 en 800 mm. Hogere debieten vergroten het risico op zandlevering.

Debieten in fijnzandige formaties kunnen verder worden gelimiteerd door de maximale toelaatbare injectiedruk en de maximaal toelaatbare infiltratiesnelheid.

3.3 DRINKWATERSECTOR

In 2011 is er een uitgebreid kennisdocument over het ontwerpen van putten voor drinkwater winningen verschenen (KIWA 2011). In dit document wordt een overzicht gegeven van alle huidige beschikbare kennis over pompputten aangeleverd door verschillende waterbedrijven. Het Kennisdocument is een naslagwerk, waarin die aspecten zijn beschreven die tot het ontwerp, de aanleg en de exploitatie van pomp- en waarnemingsputten in ongeconsolideerd gesteente behoren. De bronnen voor de drinkwatersector zijn sterk vergelijkbaar met WKO-bronnen: zuigboren, PVC-screen en gravel pack.

De belangrijkste aspecten die meegenomen worden bij het ontwerp voor een drinkwaterput zijn:

- Snelheid op de boorgatwand;
- Korrelgrootte filtergrond (gravel pack);
- Grootte van de filterspleet.

3.3.1 Normen drinkwaterputten

In Nederland zijn honderden putten gemaakt ten behoeve van de drinkwatervoorziening. Deze putten bevinden zich veelal in goed doorlatende aquifers met zoet water. Deze aquifers zijn vaak veel grover (D50-cijfer tussen 300-800 µm) dan de aquifers die onderzocht worden voor de toepassing van OGT. Dit betekent echter niet dat de ervaringen met het maken van drinkwaterputten geen toegevoegde waarde hebben voor putten voor OGT. De putten voor drinkwaterwinningen mogen immers ook geen zand leveren.

3.3.2 Snelheid op de boorgatwand en maximaal debiet

De maximaal toelaatbare snelheid is afhankelijk van de aard en samenstelling van de watervoerende zandlaag en is daarom variabel (Kobus e.a. 1976). Hoewel aanvechtbaar, wordt de formule van Sichardt veelal gebruikt voor het berekenen van de maximale snelheid op de boorgatwand:

Vergelijking 6: Maximale snelheid drinkwaterput, Sichardt.

$$v_{max} = 0.41\sqrt{k}$$

v_max : maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand [m/h]
k : doorlatendheid bij 12°C [m/d]

In vergelijking met de WKO-norm (Vergelijking 4) geeft de Sichardt-norm (Vergelijking 6) bij k-waarden beneden de 20 m/d hogere aanvaardbare snelheden op de boorgatwand.

Om tijdens wateronttrekking het zandtransport van boorgatwand naar filter tegen te gaan, moet de annulaire ruimte en daarmee de diameter van het boorgat niet te klein worden gekozen. Op grond van ervaring wordt voor de annulaire ruimte meestal 125 mm tot 300 mm aangehouden.

Korrelgrootte, grofheid gravelpack en filterspleet

In de praktijk bestaan er voor de keuze van de korrelgrootte van het filtergrind geen uniforme regels. Elk waterleidingbedrijf hanteert zijn eigen normen. Te fijn filtergrind betekent onherroepelijk verstopping op de boorgatwand na enige jaren; bij te grof filtergrind blijft de put zand geven.

Tabel 3.2 | Voorbeeld dimensionering filtergrind drinkwatersector (KIWA 2011).

D50-cijfer [µm]	Korrelmaat omstorting [mm]	Sleufbreedte [mm]
300	0,80 - 1,25	0,50
400	1,00 - 1,50	0,75
600	1,50 - 2,00	1,00
700	2,00 - 2,50	1,50
800	2,50 - 4,00	2,00

De drinkwatersector selecteert (Tabel 3.2) vergelijkbare gravelpacks als de WKO-sector in vergelijkbare geologische condities. Wel gebruikt de drinkwatersector veelal veel grofzandige formaties.

3.3.3 Conclusies drinkwaterputten normen

Drinkwaterbronnen worden veelal gemaakt in grofzandige lagen met een korrelgrootte tussen de 300 en 800 µm. Dit betekent dat de ontwerpnormen uit de drinkwatersector niet of zeer beperkt toepasbaar zijn in sterk fijnzandige pakketten zoals die voor OGT gebruikt gaan worden.

In het ontwerp ligt de nadruk op het voorkomen van bronverstopping door deeltjes en minder op het minimaliseren van de zandlevering. Dit wordt bereikt door de bronnen van een dik (150 - 300 mm) en grof gravelpack te voorzien.

3.4 ALTERNATIEVE ONTWERPNORMEN

In het onderzoek naar normen voor WKO-bronnen is naar voren gekomen dat de meeste normen voor putten gebaseerd zijn op maximale stroomsnelheid op de boorgatwand in relatie tot de doorlatendheid van de formatie (Buik 2001). Er zijn echter ook normen die hiervan afwijken en uitgaan van ofwel een maximaal toelaatbare verlaging/verhoging in de put ofwel een maximaal toelaatbare stroomsnelheid in de filterspleet.

3.4.1 Maximale verlaging/verhoging in de put

Binnen geothermie is het gebruikelijk om het maximale debiet te baseren op de maximale verlaging/verhoging die in de formatie geomechanisch acceptabel is. Ook wordt het debiet gelimiteerd door het maximale acceptabele weerstandsverlies in de casing. In de drinkwater en WKO-sector werd in het verleden door een aantal partijen ontworpen op basis van een maximale verlaging in de put. Als ontwerpregel werd veelal een verlaging van twee meter gehanteerd bij een maximale boordiameter van 600 mm (Buik 2001). Uitgaande van een gemiddelde geohydrologische situatie in Nederland (kD = 1000 m^2/d en een c van 1000 dagen) kan deze stelregel met behulp van een putformule (Vergelijking 7) weer omgebouwd worden naar een maximale snelheid op de boorgatwand (Vergelijking *8*). In vergelijking met de normen uit de WKO-sector leidt deze norm tot veel lagere maximale toelaatbare debieten.

Vergelijking 7: Putformule voor het berekenen van het maximale debiet in semi-gespannen pakketten.

$$s = \frac{Q}{2\pi kH} \ln \frac{1{,}123\sqrt{kD} * C}{r}$$

s : verlaging in de bron [m]
C : weerstand scheidende laag (d)
r : putstraal (m)

Vergelijking 8: Ontwerpnorm op basis van maximale verlaging (2 m) onder gemiddelde geohydrologische situaties.

$$v_{max} = \frac{0{,}81}{24} * k$$

v_max : maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand [m/h]
k : doorlatendheid bij 12°C [m/d]

3.4.2 Maximale stroomsnelheid in de filterspleet

In Driscolls's standaardwerk over bronnen (Driscoll 1987) wordt vaak de maximale toelaatbare snelheid waarmee het grondwater door de filterspleten mag stromen (intree-snelheid) als ontwerpnorm gehanteerd. De gedachte hierachter is dat de weerstand over het filter beperkt moet worden om de benodigde onttrekkingsdrukken te beperken. De algemene conclusie is dat de intree-snelheid van 0,03 m/s in de meeste gevallen voldoet. Om de intree-weerstand te kunnen vergelijken met de snelheid op de boorgatwand kan Vergelijking 9 worden gebruikt. Uitgaande van een open oppervlak van het filter tussen de 6 en 10 % (PVC-screen) en een boordiameter van 600 mm en een filter van 250 leidt dit tot stroomsnelheden tussen de 2,7 en 4,5 m/h. Dit maakt duidelijk dat deze norm van maximale stroomsnelheid in de filterspleet tot veel hogere stroomsnelheden leidt dan de norm gebaseerd op de doorlatendheid van de formatie.

Vergelijking 9: Intree-snelheid in de relatie tot de boorgatwand snelheid.

$$v_{filter} = \frac{v_b * \frac{r_b}{r_f}}{\theta}$$

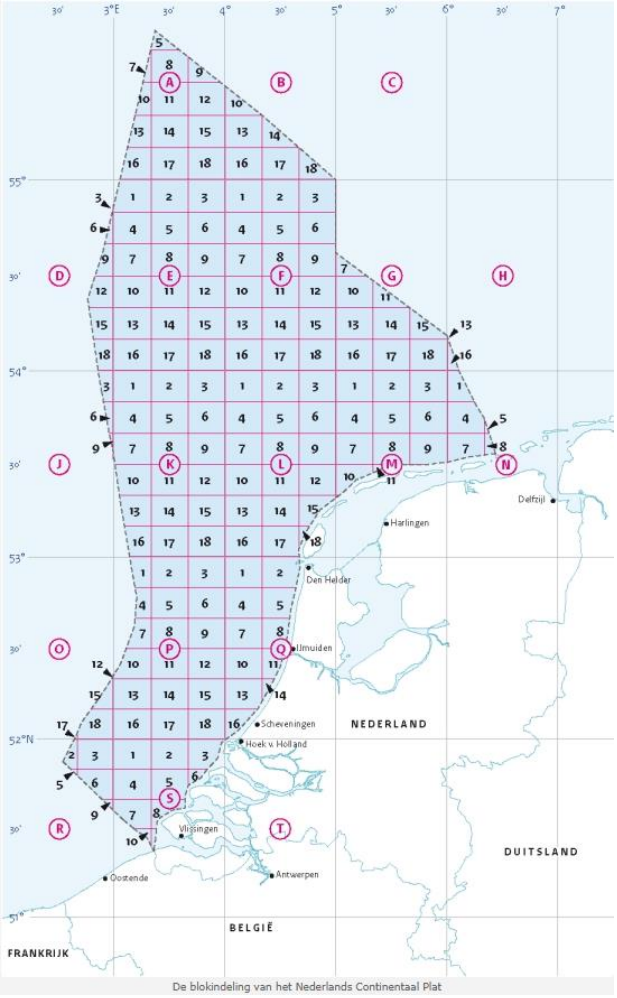
r_b : straal boorgatwand [m]
r_f : straal filter [m]
v_{filter} : snelheid in de filterspleet (m/h)
v_b: : snelheid op de boorgatwand (m/h)
θ : fractie open oppervlak [-]

3.5 NORMEN OLIE- EN GASOPERATORS

Er is contact gezocht met diverse olie- en gasoperators en service companies om ervaring te delen over de zandproductie en de daarbij gehanteerde normen. Met uitzondering van Petrogas was er geen bereidheid bij deze bedrijven om aan dit onderzoek mee te werken.

3.5.1 Petrogas

Petrogas bezit offshore putten in de A en B blokken (zie Figuur 3.5). Een aantal van de putten in hun bezit, zijn geboord naar dieptes tussen 500 en 1.800 m-mv en hebben een lengte van 300 tot 500 m. De putten zijn geboord naar de Noordzee Groep, het Zechstein en het Slochteren. Uit de putten wordt gas geproduceerd door middel van horizontale putten.



Figuur 3.5 | Locatie blokken A + B waarin de putten van Petrogas zich bevinden.

De Petrogas putten met een diepte tussen de 500 en 1000 m-mv zijn geboord naar de Fm. van Maassluis. Onshore bevindt deze formatie zich op een diepte tussen grofweg 150 en 250 m-mv. Door deze diepteligging en het daarbij behorende temperatuurniveau is de formatie onshore commercieel/energetisch niet erg interessant voor de toepassing van OGT.

De diepere putten van Petrogas bevinden zich in de Fm. van Peize, Fm. van Breda en de Rupel Mb. Ook deze afzettingen zullen onshore niet snel aangeboord worden voor OGT. De voornaamste reden hiervoor is dat de afzettingen zeer kleirijk zijn, waardoor de permeabiliteit laag is.

Hoewel de afzettingen waaruit Petrogas gas wint, onshore niet snel in aanmerking komen voor de toepassing van OGT, liggen ze wel in het dieptebereik waarnaar gekeken wordt. Hierdoor is de consolidatiegraad vergelijkbaar. De kennis en ervaringen van Petrogas zijn hierdoor zeer relevant.

Op 22 maart 2019 heeft het gesprek met Petrogas plaatsgevonden. De belangrijkste bevindingen waren:

- Indien de frac-gradient laag is worden de putten uitgerust met een expandable screen[1]. In een boorgatdiameter van 8,5 inch gaat een screen dat geëxpandeerd kan worden van 5,5 inch tot 8,9 inch. Dit screen wordt geplaatst om shear failure (zandlevering) van de formatie tegen te gaan. Bij een hoge frac-gradient wordt een gravel pack geplaatst;
- Als maximale afpomping wordt 8 tot 10 bar aangehouden. Dit in verband met het voorkomen van zandlevering;
- Als collapse strenght van de casings wordt 25 tot 35 bar aangehouden;
- De gemiddelde korrelgrootte van de formaties waaruit gas gewonnen wordt bedraagt circa 100 µm;
- Toepassing van horizontale putten met lengtes van 500 tot 1000 m;
- De flows die geproduceerd worden bedragen circa 10 Mscf/h (gas);
- Deels wordt water geretourneerd.

Redenen voor het toepassen van expandable screen zijn:
- Geen annulaire ruimte rondom screen;
- Stabiliteit boorgat doordat screen er tegenaan gedrukt wordt.

3.5.2 Conclusies gasputten normen

Uit het gesprek met Petrogas is gebleken dat het voorkomen van zandproductie voor hen niet direct een ontwerpuitgangspunt is. Tijdens het ontwerp wordt meer rekening gehouden met de stabiliteit van het boorgat (expandable screen); het schoon houden/krijgen van het boorgat (laag mud gewicht en makkelijk te verwijderen mud) en het snel kunnen aanbrengen van het screen.

De gasputten produceren ongeveer 100 tot 300 m^3/h aan gas op reservoirniveau (bij 60 bar). De viscositeit van het gas is een orde kleiner dan de viscositeit van water onder vergelijkbare omstandigheden. De sleepkrachten op het reservoir zijn hierdoor ook een orde kleiner. Hierdoor is het risico op zandproductie marginaal. Petrogas heeft ook aangegeven dat er nauwelijks sprake is van zandproductie en dat hier geen aanvullende maatregelen voor worden getroffen (bovengrondse filtering o.i.d.).

Door de lagere viscositeit van het gas, lijkt zandlevering bij gasputten met een vergelijkbare flow een kleinere rol te spelen dan bij waterputten.

[1] Een expandable screen is een screen dat in het boorgat gebracht wordt en vervolgens geëxpandeerd tot het tegen de boorgat wand aandrukt.

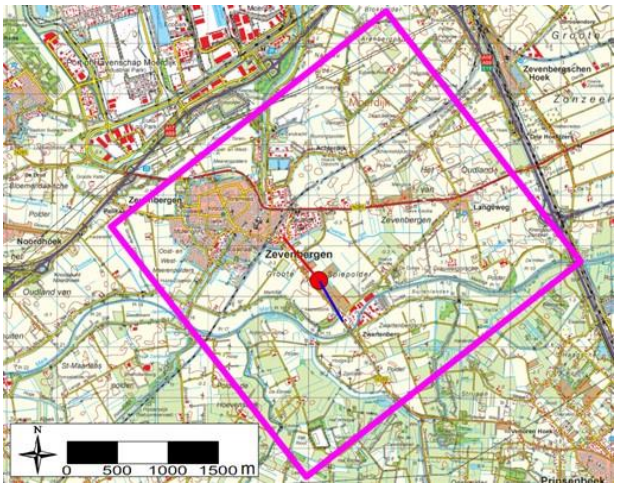
4 Ondiepe geothermie case Zevenbergen

4.1 ACHTERGROND

Visser en Smit Hanab B.V. heeft voor de verwarming van het glastuinbouwbedrijf in Zevenbergen een ondiep geothermie systeem gerealiseerd. De geproduceerde lage temperatuur warmte is in combinatie met een warmtepomp geschikt om het lage temperatuur verwarmingssysteem in de kas van Greenbrothers van warmte te voorzien.
Op een diepte van ongeveer 600 tot 700 m-mv in de Zanden van Brussel is een geschikte laag waaruit aardwarmte gewonnen kan worden. De temperatuur van het water bedraagt op deze diepte ongeveer 31°C. Het warme grondwater dat via de onttrekkingsbron wordt opgepompt, wordt aan de oppervlakte door een warmtewisselaar geleid. De warmte die in de warmtewisselaar wordt overgedragen, wordt met behulp van warmtepompen opgewaardeerd naar een temperatuurniveau dat geschikt is voor de verwarming van de kassen. Het afgekoelde grondwater wordt vervolgens met een temperatuur van 8- 11°C via de infiltratiebron teruggebracht in de formatie. Het thermisch vermogen bedraagt maximaal 5.0 MW. Verwacht wordt dat jaarlijks maximaal 30.000 MWh geothermische warmte opgewekt kan worden, wat qua energiehoeveelheid vergelijkbaar is met ongeveer 3 miljoen m^3 aardgas per jaar.

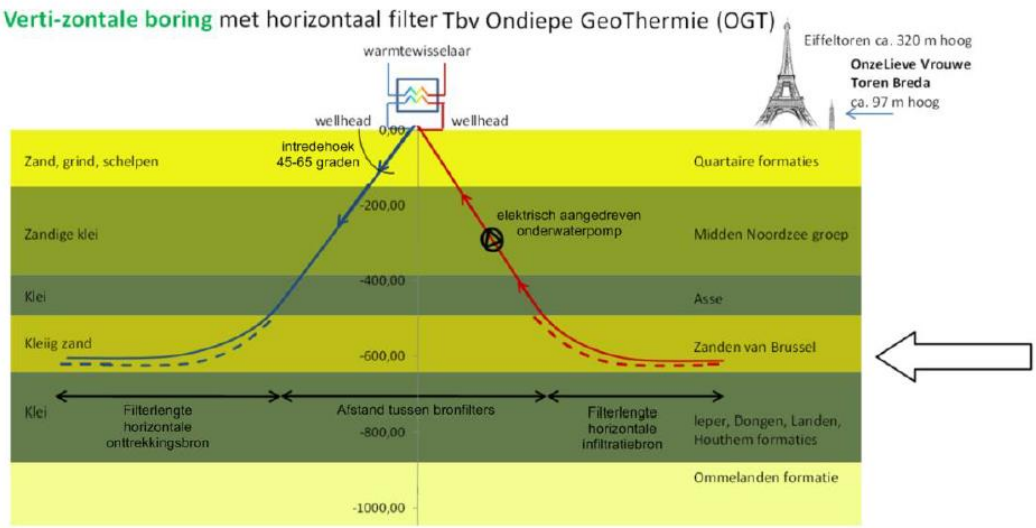
Voor het onttrekken van de geothermische warmte wordt gebruik gemaakt van twee horizontale putten ieder met een filterlengte van 500 - 600 m. Visser en Smit Hanab B.V. heeft gebruik gemaakt de “Geothermal Directional Drilling” (GDD) methode.

Het glastuinbouwbedrijf bevindt zich aan de Hazeldonkse Zandweg ten zuidoosten van Zevenbergen, zie Figuur 4.1.

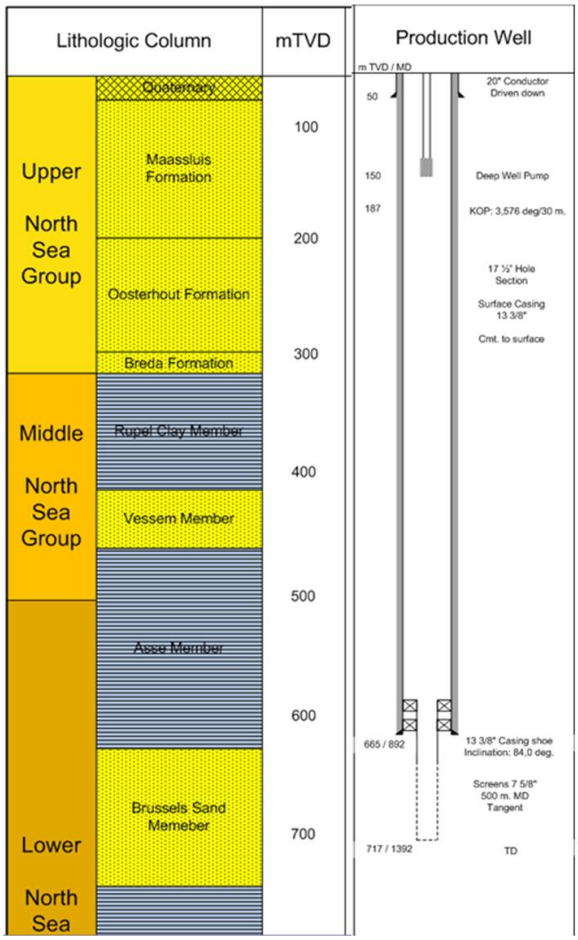


Figuur 4.1 | Locatie van het horizontale doublet met de daarbij aangevraagde opsporingsvergunning.

Figuur 4.2 geeft een verticaal beeld van de beide putten en de geohydrologsiche situatie.



Figuur 4.2 | Verticaal profiel ondiep geothermie project Zevenbergen.



Figuur 4.3 | Putontwerp ondiepe geothermie Zevenbergen.

4.1.1 Ontwerp en proefboring

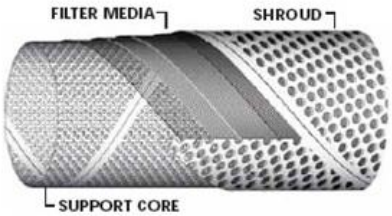
Voorafgaand aan de horizontale boringen is een verticale proefboring uitgevoerd. Het Brussel zand is aangetroffen tussen de 650 en 720 m -mv. De zeefkrommes op diverse dieptes laten een D_{50} zien tussen de 100 en 170 µm. Verder wordt er veel erg fijn zand (< 63 µm, silt) en klei (< 8 µm) aangetroffen. De hoge kleifractie is mogelijk beïnvloed door de boorspoeling. Doordat de D_{10} erg laag is (tussen de 8 en 80 µm) komt de Uniformiteitcoëfficiënt van het zand (Vergelijking 1) boven de 3 uit. Hierdoor zou het zandpakket in aanmerking komen voor een natuurlijk gravelpack; echter het pakket is wel erg fijn zandig.

Het heeft daarom de voorkeur om te werken met een gravel pack. Het is echter technisch-economisch niet haalbaar gebleken om een gravelpack horizontaal aan te brengen (V&SH, 2017). In het ontwerp is de focus gelegd op het tegenhouden van het zand en tegelijkertijd de mogelijkheid te hebben om iets van een natuurlijke omstorting te creëren. Er is gekozen voor een 100 µm mesh size PoroLock ® premium screen (Figuur 4.4). Fijner mesh size is overwogen maar de beperkte ontwikkelmogelijkheden (zowel mud als zand verwijderen) gaven de doorslag voor een grover screen. Hierdoor zou een aanzienlijk deel van de onderfractie (tussen de 20 en 50 %) door het filter stromen en veel zandproductie tijdens het ontwikkelen kunnen veroorzaken.

Het systeem is ontworpen om 285 m^3/uur te onttrekken en te infiltreren. Het maximale debiet is bepaald op basis van de maximaal toelaatbare injectiedruk (eis SodM: 15 bar) en een minimaal noodzakelijke COP (Coëfficiënt of Performance, maat voor de hoeveelheid elektriciteit die nodig is om een zekere hoeveelheid thermische energie te leveren).

Het boorgat is 11″ en heeft een lengte van 500 m. In het boorgat is een screen geplaatst van 7 5/8 ″ op een diepte tussen de 650 en 720 m-mv (Figuur 4.3).

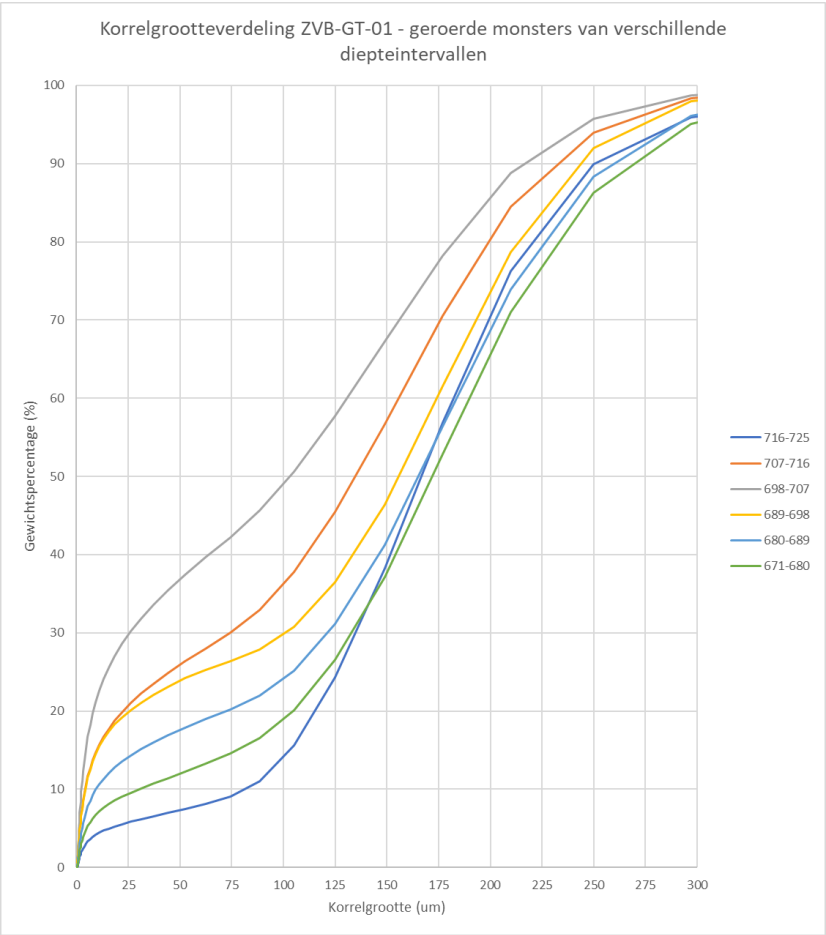
Volgens de ontwerpnormen van de drinkwater/WKO-sector zou de snelheid op de boorgatwand ca. 0,05 m/h (uitgaande van een k-waarde van 0,5 m/d) mogen zijn; de werkelijke ontwerpsnelheden liggen een factor 10 hoger (0,64 m/h).



Figuur 4.4 | Porolock screen (HP Wellscreen brochure).

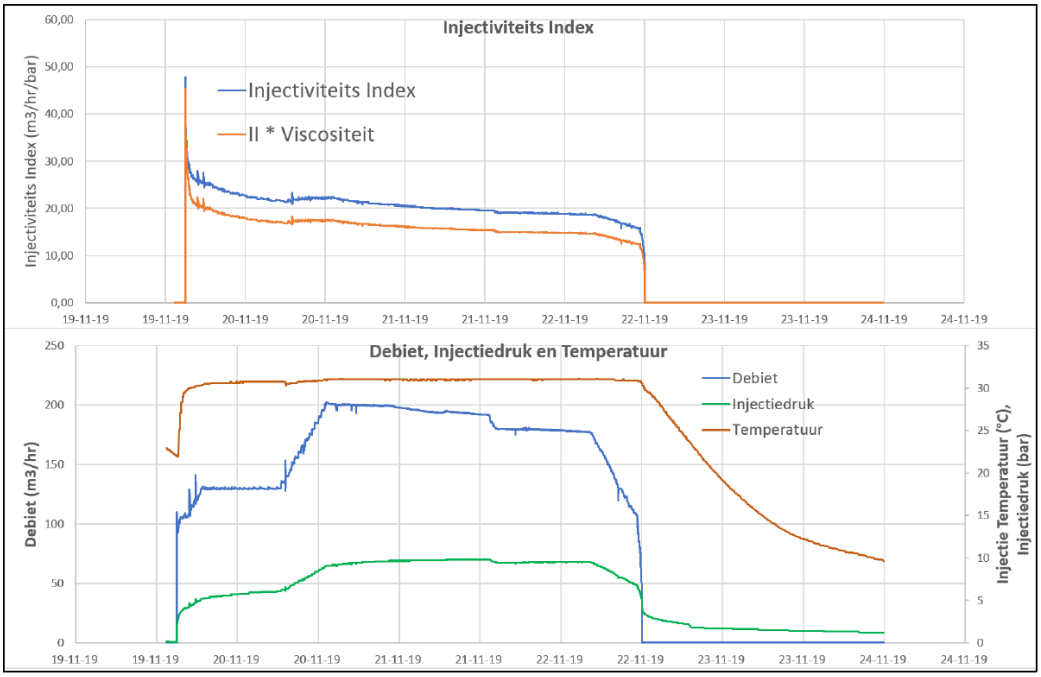
4.1.2 Uitvoering

De ontwerpdebieten blijken niet haalbaar. Belangrijkste oorzaak is de veel lagere verticale doorlatendheid waardoor de toestroming naar de horizontale put sterk wordt belemmerd. De verticale permeabiliteit bedraagt 25 mD en de horizontale permeabiliteit 750 mD (Panterra, 2019). Dit resulteert in een anisotropie van 30.



Figuur 4.5 | Zeefkrommes op verschillende dieptes in het Brussels Zand.

Uit eind 2019 uitgevoerde testen blijkt dat de zandhoudendheid van het onttrokken water laag is en dat er weinig zandfilters hoeven te worden gewisseld (VS&H, 2019). Verder blijken de injectiedrukken gedurende een periode van een week slechts licht te dalen (Figuur 4.6).



Figuur 4.6 |Onttrekkings- en injectietesten geothermie Zevenbergen eind 2019 (VS&H, 2019).

4.1.3 Conclusies project ondiepe geothermie Zevenbergen

Het Zevenbergen project is een van de weinig onshore projecten die gemaakt zijn in de formatie van Brussel. Deze zanden hebben een mediaan (D50) tussen de 100 en 170 µm. De horizontale doorlatendheid van deze formatie wordt echter sterk beperkt door de hoge silt en kleifractie. Daarnaast kent de formatie een hoge mate van anisotropie (meer dan 30) waardoor de toestroming naar de horizontale putten sterk wordt gelimiteerd.

Ondanks dat het voorlopige debiet de helft is van het ontwerpdebiet, ligt de stroomsnelheid op de boorgatwand aanzienlijk hoger (5 maal) dan de drinkwater/WKO putnormen. In het ontwerp heeft de snelheid op de boorgat geen rol gespeeld en is met name gekeken naar de maximaal mogelijke drukken. Eventuele zandlevering was voorzien en lijkt vooralsnog beperkt.

5 Literatuur onderzoek zandproductie olie en gas

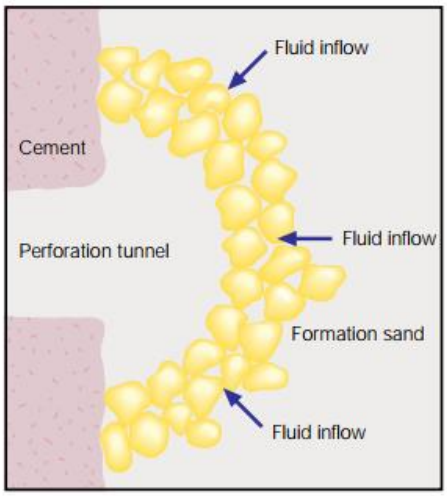
5.1 ALGEMEEN

De afgelopen decennia is er in olie- en gasliteratuur veel geschreven over het voorkomen van zandproductie (Carlson en et al 1992; Veeken, C.A.M en et al. 1991; Palmer 2003; Vaziri 2002). De meeste literatuur gaat met name in op het maximale debiet waarbij zandproductie, in zowel ongeconsolideerde als geconsolideerde sedimenten, wordt voorkomen (Yi 2003). Er wordt minder ingegaan op wat voor gravelpack (grofheid en sortering) of filterbuis (grote filterspleet) er toegepast moet worden om het zand tegen te houden.

5.2 GRAVELPACK EN FILTERSPLEET

Uit de literatuur blijkt dat een gravelpack gezien wordt als de manier om zandlevering te voorkomen (Carlson en et al 1992). Aandachtspunt bij het plaatsten van een gravel pack is dat een gravel pack in een hoge positieve skin kan resulteren (Sanchez en Tibbles 2007). In Carlson (Carlson en et al 1992) worden de volgende richtlijnen gegeven:

- De filterspleet is dusdanig dat de grootste 10% van de zanddeeltjes bruggen vormen (Figuur 5.1). Deze brug vormt een barrière voor de kleinere fractie. Het nadeel is echter dat er een laag permeabele zone rond om de put gecreëerd wordt. Ook bestaat het risico dat het screen geblokkeerd wordt door de fijne fractie.

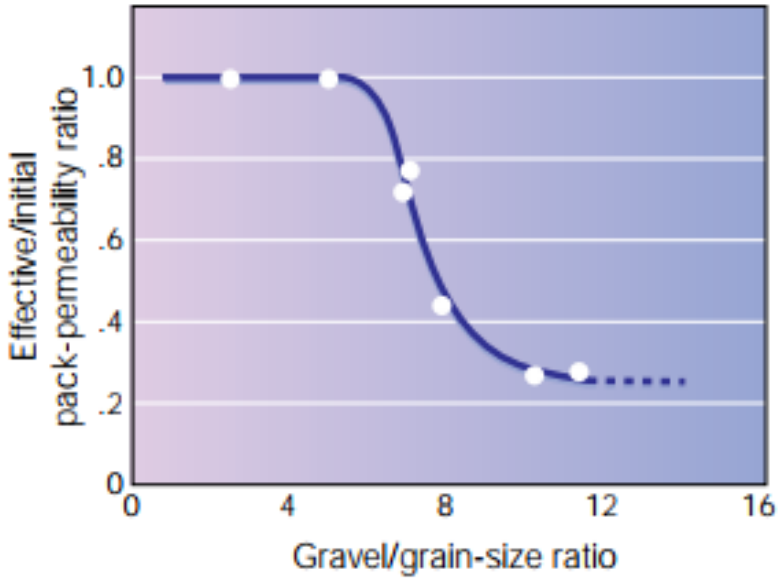


Figuur 5.1 | Brug van formatiezand rondom het filter of perforatie.

- Een gravelpack moet schoon en dichtgepakt zijn. Verder moet het geplaatst worden met een minimum aan reservoirverstoring. Tijdens het plaatsen moet voorkomen worden dat een fijne

zandfractie in het gravelpack komt, omdat dit de permeabiliteit van het gravelpack negatief beïnvloedt.

Er zijn verschillende methoden om de formatie korrelgrootteverdeling te vertalen naar een grofheid van het gravelpack. De meest gebruikte is die van Saucier (Saucier 1974) die aangeeft dat de mediaan gravelpack diameter maximaal zes keer grover moet zijn dan de mediaan formatie korreldiameter, zie Figuur 5.2. Dit is vergelijkbaar met de normen uit de drinkwatersector.



Figuur 5.2 | Selectie gravelpack. De gravelpack/korrelgrootteverhouding moet kleiner zijn dan 6. Bij een grotere verhouding kunnen zandkorrels vanuit het formatie de permeabiliteit van het gravelpack flink reduceren.

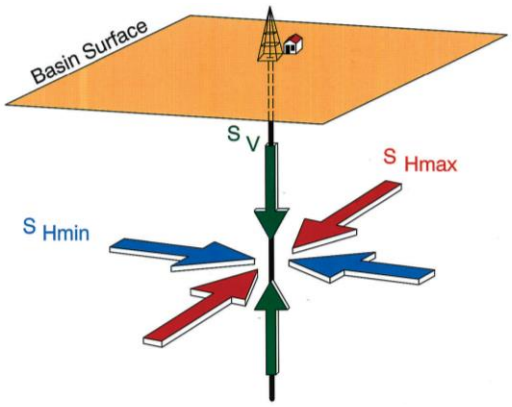
5.3 ZANDPRODUCTIE

In de ondergrond is een bepaalde spanningssituatie aanwezig. Deze spanningssituatie is afhankelijk van de druk van de bovenliggende lagen, en de horizontale druk die geologische fenomenen (bijv. zout diapieren, subductiezone en bergen) uitoefenen. Hoe groter de afstand tot een bepaald geologisch fenomeen, hoe kleiner de invloed hiervan op de lokale spanningssituatie (Tingay 2015), zie Tabel 5.1.

Tabel 5.1 | Samenvatting van de hoofdkenmerken die invloed uitoefenen op het spanningsveld en een indicatieve schaal van hoe zij het spanningsveld beïnvloeden.

Feature	Examples	Effect	Scale
Plate Boundary Forces	Mid-ocean ridges, continental collision zones, subduction zones	'Primary' control on stress field	Plate to regional: 100s-1000s of km
Major intraplate Forces	Surface loads, isostatic compensation, continent-ocean transition, deglaciation	'Secondary' control on stress field	Regional: 100s of km
Detachment zones	Evaporites, overpressured shales, low angle faults.	Mechanically detach overlying sediments from primary/secondary ('basement') stress field	Basin to local scale: 10s-100s of km
Basin Geometry	Tertiary deltas,	Regional control on stress field, particularly in detached basins	Basin scale (100s of km)
Major Topography (Mountain Belts)	Foreland basins, back-arc basins, intermontaine basins	Gravitational forces exerted due to weight of thickened lithosphere	Basin scale (100s of km)
Geological Structures	Faults, fractures, diapirs, folds	Rotation of stress field due to mechanical contrasts between units	Local (meters to a few kms)
	Active faults	Temporal change in stress associated with seismic cycle	Local to regional depending on scale of fault activity: 1 to 100s km
Local Topography	Mountains, valleys	Rotation of principal stresses due to Earth's surface being a free surface	Shallow regions only: near surface, within approximately one 'wavelength' of topography

De lokale spanningssituatie kan beschreven worden middels drie componenten die ieder een andere richting en grootte hebben, zie Figuur 5.3. Er is een verticaal gerichte spanning (Sv), die zoals reeds gezegd veroorzaakt wordt door de druk van de bovenliggende lagen. Verder zijn er twee horizontale spanningscomponenten; een minimale horizontale spanning (Shmin) en een maximale horizontale spanning (SHmax). In Nederland is SHmax ongeveer 5 tot 15% groter dan Shmin (Mechelse E. 2017) en is SHmax op de meeste plaatsen naar het noordnoordwesten gericht (315° +/- 23°) (Mechelse E. 2017). Shmin staat per definitie loodrecht op SHmax. Deze drie spanningen oefenen een druk uit op de ondergrond en worden dan ook grondspanningen genoemd. De grondspanning is te vertalen naar een korrelspanning door de poriedruk ervan af te trekken, zie Vergelijking 10.



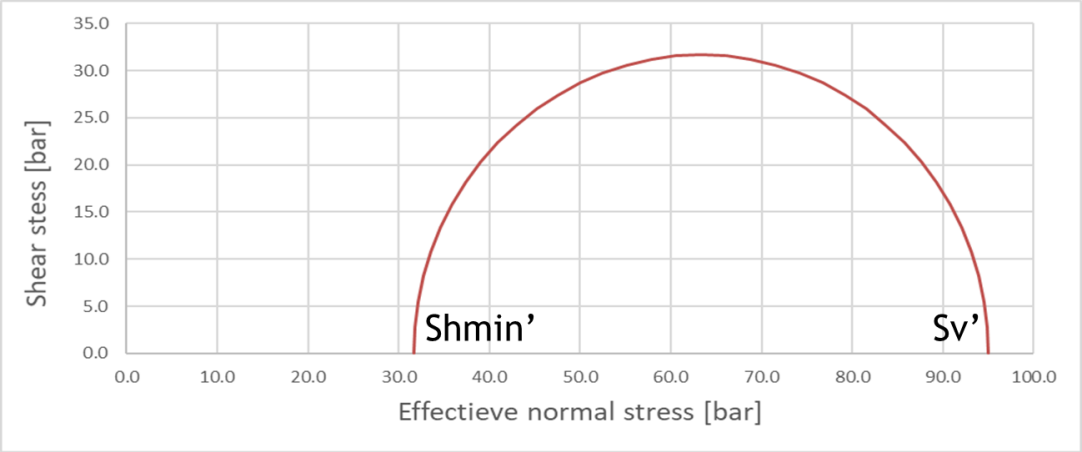
Figuur 5.3 | Schematische weergave van de ondergrondse spanningssituatie.

Vergelijking 10 : Effectieve korrelspanning (Sv').

Sv' (korrelspanning) = Sv (grondspanning) – Pp (poriedruk)

In Vergelijking 10 is weergegeven hoe de verticale grondspanning omgerekend wordt naar een (effectieve) korrelspanning. Deze omrekeningsmethodiek geldt voor alle drie de spanningscomponenten.

De ondergrondse spanningssituatie is schematisch weer te geven in een Mohr diagram, zie Figuur 5.4. De cirkel wordt getrokken op basis van de minimale korrelspanning (Shmin) en de maximale korrelspanning (Sv), en geeft de mogelijke verhoudingen tussen de schuifspanning (shear stress) en de normaal spanning. De verhouding tussen beide spanningen is afhankelijk van de hoek van het vlak waar de spanningen opstaan. In een Mohr-cirkel worden vaak de effectieve spanningen weergegeven.



Figuur 5.4 | Voorbeeld Mohr diagram. Met minimale effectieve stress (Shmin') en maximale effectieve stress (Sv').

Sv is vrij eenvoudig te bepalen op basis van de dichtheid van de boven het reservoir liggende lagen. Een nauwkeurige inschatting van Shmin is veel lastiger. Er bestaan verschillende modellen om Shmin te bepalen (Mechelse E. 2017). Deze verschillende modellen geven echter uiteenlopende waarden voor Shmin. Het beste is om Shmin te bepalen door middel van een leak-off test. Bij een dergelijke test wordt de druk op het reservoir opgevoerd totdat het reservoir bezwijkt. Dit heet tensile failure, zie Figuur 5.5. De druk waarbij het reservoir bezwijkt is gelijk aan Shmin.

Zandproductie vindt onder andere plaats op het moment dat een bepaalde waarde van de schuif spanning overschreden wordt, waardoor de formatie rondom de put bezwijkt (Yi 2003). Dit wordt shear failure genoemd. Naast shear failure zijn er andere mechanismen die zandproductie veroorzaken, maar deze treden pas op na shear failure (Charalambous, Packman, en Burnet 2012). In onderhavige onderzoek wordt daarom alleen in gegaan op shear failure. Voor het bepalen van de shear failure is de shear strekte van belang. De shear sterkte wordt als volgt berekend:

Vergelijking 11 : Shear-sterkte.

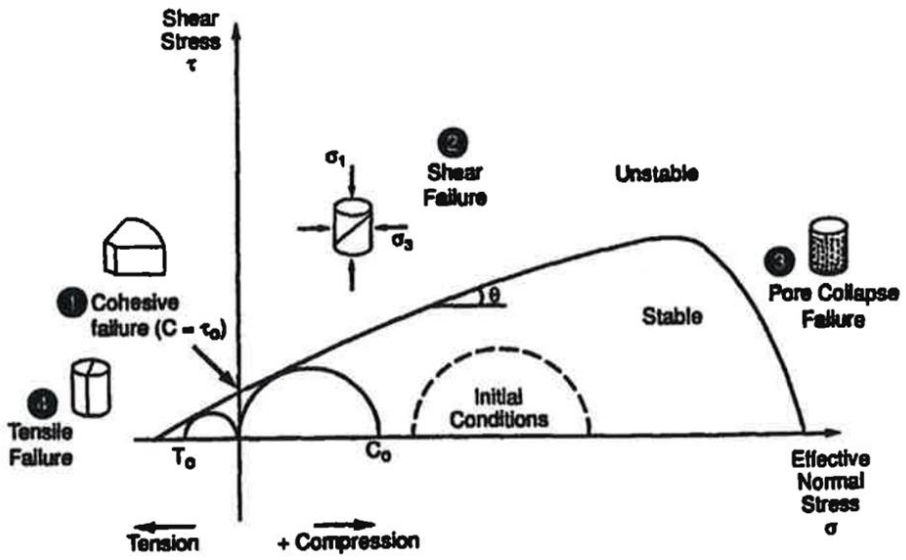
$\tau = S_0 + S \tan \Phi_f$

In deze formule is τ de shear sterkte [bar], S_o is de cohesieve sterkte [bar], S is de effectieve normale spanning [bar] en Φ_f is de hoek van inwendige wrijving [°]. Hoewel ongeconsolideerde sedimenten een beperkte cohesieve sterkte hebben (Charalambous, Packman, en Burnet 2012) wordt deze vaak niet meegenomen bij de berekeningen van de shear sterkte en de kans op zandproductie.

Er bestaan verschillende criteria om de shear failure te berekenen. De bekendste zijn het Mohr-Coulomb criterium, het Drucker-Prager criterium en het Brown-Hoek criterium. Het Mohr-Coulomb criterium en het Hoek-Brown criterium nemen alleen de minimale (Shmin) en de maximale spanning (Sv) in de ondergrond mee, terwijl het Drucker-Packer criterium ook de tussenliggende spanning (SHmax) meeneemt. Alle criteria zijn min of meer op dezelfde manier schematisch weer te geven, zie Figuur 5.5.

In het figuur wordt middels de Mohr-cirkel de initiële druksituatie weergegeven. Als gevolg van een drukverlaging verschuift de positie van de cirkel en verandert deze van grote (Van Wees e.a. 2014). Zodra de cirkel de diagonale lijn kruist, gaat de formatie zand leveren (shear failure). Als de Mohr cirkel de verticale as doorsnijdt, treedt tensile failure op.

De beginpositie van de cirkel hangt af van de initiële drukcondities. De mate van verschuiving en vergroting van de cirkel hangt af van de drukverandering. De steilheid van de diagonale lijn hangt af van de frictie tussen de zandkorrels. De frictie wordt gekwantificeerd door middel van een hoek van inwendige wrijving. Hoe groter deze hoek, hoe groter de shear-sterkte en hoe groter de drukverlaging kan zijn alvorens een put zand gaat leveren.



Figuur 5.5 | Schematisch Mohr-Coulomb en Drucker-Prager failure diagram (Abass, H.H en et al 1993).

In deze studie is gebruik gemaakt worden van het Drucker-Prager criterium. Het Drucker-Prager criterium neemt namelijk de drie hoofdspanningen (Sv, SHmax en Shmin) mee in de berekening, terwijl het Mohr-Coulomb criterium er maar twee meeneemt in de berekening (Sv en Shmin).

Hieronder volgen de vergelijkingen om op basis van het Drucker-Prager criterium het maximale toelaatbare debiet te berekenen:

Vergelijking 12: Eerste stress tensor.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

I_1 is de eerste stress tensor. σ_1 en σ_2 en σ_3 zijn de hoofd stress richtingen ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$).

Vergelijking 13: Tweede tensor tensor.

$$J_2 = \frac{1}{6}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2\right]$$

J_2 is de tweede stress tensor.

Vergelijking 14: Materiaal constante.

$$\alpha_D = \frac{2\sin\phi_f}{\sqrt{3}(3 - \sin\phi_f)}$$

Vergelijking 15: Materiaal constante.

$$k_D = \frac{6S_o\cos\phi_f}{\sqrt{3}(3 - \sin\phi_f)}$$

α_D en k_D zijn materiaal constanten, Φ_f is de hoek van inwendige wrijving [°] en S_0 is de cohesie [bar].

Vergelijking 16: Bezwijk criterium Drucker-Prager.

$$F = \alpha_D I_1 + k_D - \sqrt{J_2}$$

F is het bezwijk criterium. Als F kleiner of gelijk is aan nul treedt afschuiving op. Het maximaal toelaatbare debiet kan nu als volgt berekend worden:

Vergelijking 17:Maximaal toelaatbaar debiet op basis van Drucker-Prager.

$$q = \frac{100.000\,F}{24\,\rho\,g}\,\frac{2\,\pi\,kD}{\ln(1.123\frac{\sqrt{kDc_v}}{r})}$$

F	bezwijk criterium [bar]
ρ	dichtheid water [kg/m^3]
g	valversnelling [m/s^2]
k	doorlatendheid [m/d]
d	dikte reservoir [m]
c_v	vervangingsweerstand [d]
q	debiet [m^3/h]
r	straal van de put [m]

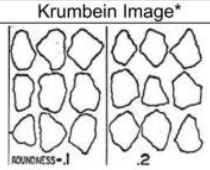
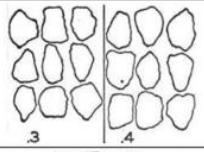
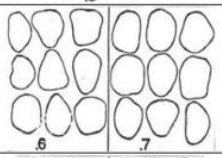
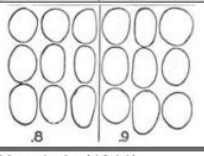
Normaliter wordt de hoek van inwendige wrijving bepaald door middel van laboratoriummetingen (triaxiaal proeven). Voor het ontwerp van de bronnen zijn deze metingen vaak niet aanwezig, waardoor de hoek van inwendige wrijving op een andere wijze afgeleid moet worden. Uit de literatuur (Bareither 2008; Cabalar unknown; Stark en et al 2014; Casini, Brauchli, en Springman 2011) blijkt dat de hoek van inwendige wrijving afhankelijk is van diverse geologische en fysische omstandigheden zoals: diepte, dichtheid, korrelgrootteverdeling en hoekigheid van de korrels.

Het kwantificeren van al deze parameters is in de praktijk zeer lastig en derhalve niet toepasbaar. Bareither (Bareither 2008) heeft op basis van een Multivariabele Regressie Analyse de invloed van de verschillende parameters op de hoek van de inwendige wrijving bepaald. Uit de analyse blijkt dat de hoek van de inwendige wrijving zeer goed te benaderen valt door middel van de volgende relatie:

Vergelijking 18 : Hoek van inwendige wrijving

$$\phi' = 1.89 + 20.56 \times D_{10} + 2.35 \times \gamma_{d\,\max} - 24.10 \times R_s$$

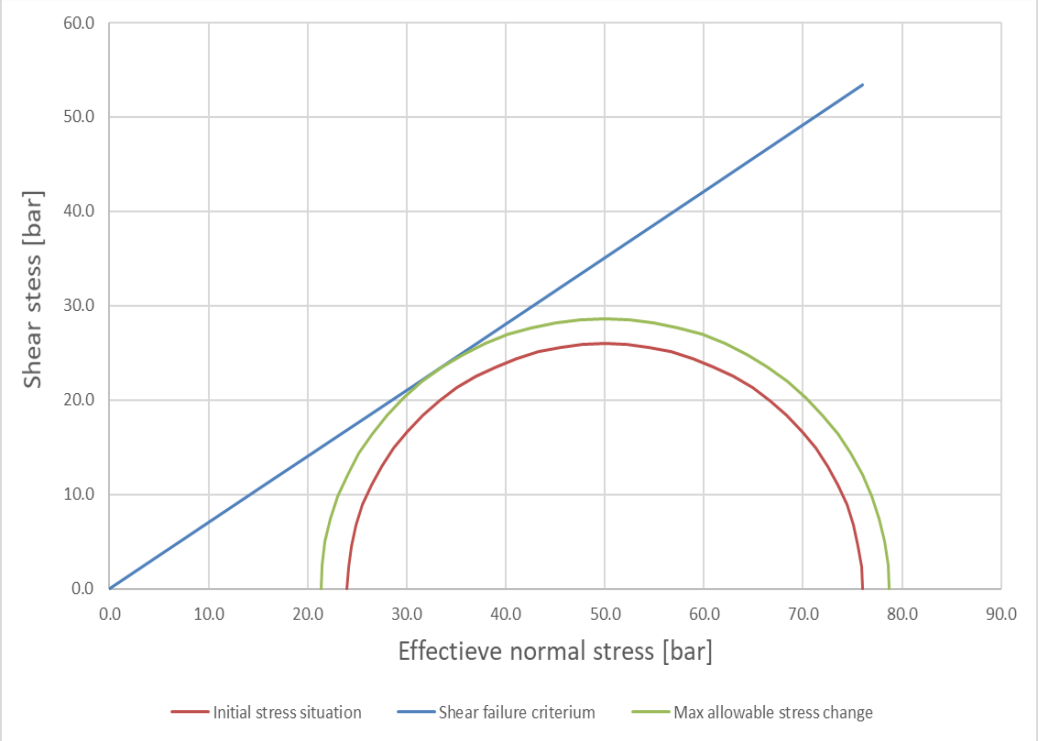
In deze relatie staan een D_{10} korrelgrootte [mm], een y_d maximaal droog gewicht van reservoir materiaal [kN/m³] en een Rs rondheid kwalificatie [-]. In Figuur 5.6 staat de classificatie van Rs. Initieel werden er meer parameters meegenomen maar bovenstaande parameters bleken de meeste invloed te hebben op de hoek van inwendige wrijving.

Roundness	Krumbein Image*	Range	Average
Angular		0.10 - 0.26	0.18
Subangular		0.26 - 0.42	0.34
Subrounded		0.42 - 0.58	0.50
Rounded		0.58 - 0.74	0.66
Well-Rounded		0.74 - 0.90	0.82

*adapted from Krumbein (1941).

Figuur 5.6 | Rondheid categorieën zandkorrels (Krumbein 1941).

Het principe van het Drucker-Prager criterium is schematisch weergegeven in Figuur 5.7. Door het verlagen van de poriedruk neemt de differentiële spanning toe. Verder veroorzaakt het poro-elastisch effect een verlaging van Shmin'. In Figuur 5.7 is de initiële spanningssituatie met de formatie shear sterkte weergegeven. De ruimte tussen de shear-sterkte en de Mohr-cirkel bepaald de toelaatbare afpomping in de put en daarmee de flow.



Figuur 5.7 | Mohr cirkel initiële stress situatie en shear sterkte. De blauwe lijn geeft het shear failure criterium. De steilheid van deze lijn is afhankelijk van de hoek van inwendige wrijving. De rode halve cirkel geeft de initiële spanningssituatie in de ondergrond op een bepaalde diepte weer. De groene halve cirkel geeft aan welke spanningsverandering maximaal toelaatbaar is. De maximaal toelaatbare flow is afhankelijk van de ruimte tussen de groene en de rode cirkel.

5.4 RICHTLIJN OP BASIS VAN SHEAR FAILURE CRITERUM

Om na te gaan of de in de literatuur gevonden relaties inderdaad gebruikt kunnen worden zijn een aantal cases doorgerekend. Deze cases zijn vergeleken met de norm voor onttrekkingsputten die voor koude-/warmteopslagputten (WKO-norm) gebruikt wordt.

Tabel 5.2 | Inputwaarde case studies Drucker-Prager criterium.

Parameters	Waarde	Eenheid
Doorlatendheid	5	[m/d]
Dikte	30	[m]
Temperatuur	20	[°C]
Verticale drukgradiënt	0,220	[bar/m]
Minimale horizontale drukgradiënt	0,135	[bar/m]
Maximale horizontale drukgradiënt	0,135[1]	[bar/m]
Waterdruk gradiënt	0,100	[bar/m]
Rondheid van de korrels	0,66	[-]
Diameter put	0,800	[m]
Gewicht droge korrels	20	[KN/m^3]

[1]In dit voorbeeld is gekozen voor een conservatieve benadering door de maximale horizontale drukgradiënt gelijk te stellen aan de minimale drukgradiënt.

In Vergelijking 18, wordt een D10 gebruikt. De D10 geeft aan dat 10 % van de korrels (in gewichtshoeveelheden gemeten) kleiner is dan die waarde. Om de D10 te bepalen moeten korrelgrootteanalyses uitgevoerd worden. Indien deze niet beschikbaar zijn, kan de D10 bepaald worden door middel van empirische relaties. Een veel gebruikte relatie om een doorlatendheid om te rekenen naar een D10, is de relatie van Hazen (Hazen 1982):

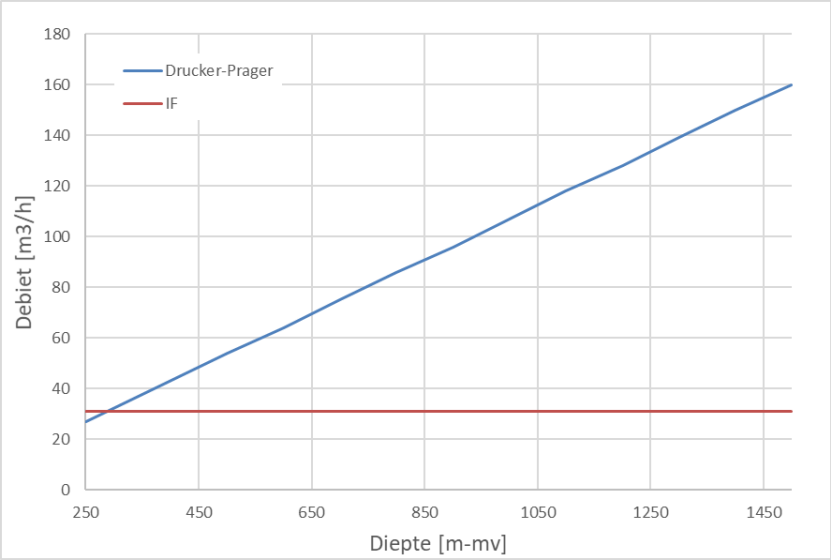
Vergelijking 19 : Hazen.

$$K = {}^{\rho g}/_{\mu} \times 6 \times 10^{-4} \times [1 + 10(n - 0.26)](d_{10})^2$$

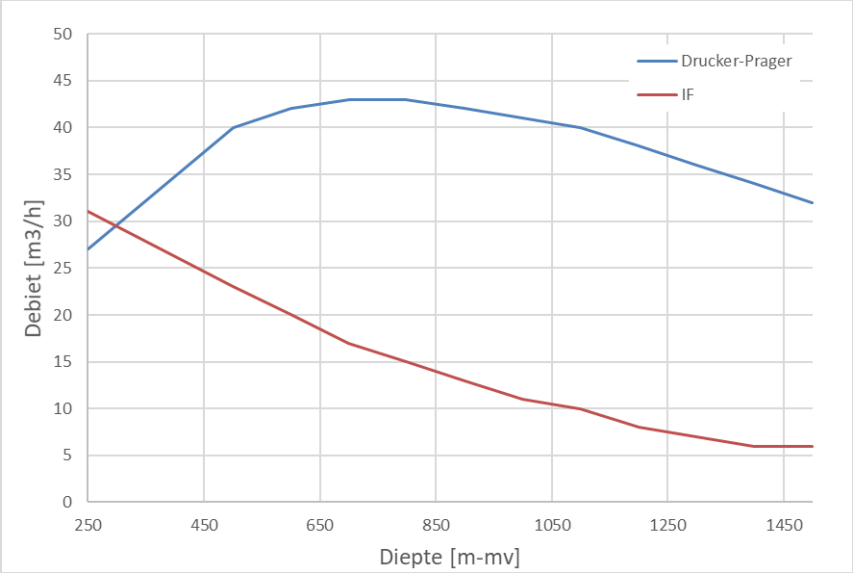
In deze vergelijking staat k in [m/s], ρ is de dichtheid van het water in [kg/m^3], g is de valversnelling [m/s^2], n is de porositeit [-] en μ is de viscositeit in [kg/(m s)].

De relatie van Hazen berekent D10-waarden die goed overeenkomen met korrelgroottemetingen van de Fm van Breda, Fm Oosterhout en Fm Maasluis en de Zanden van Brussel (Doorn, Leyzers Vis, en Salomons 1985).

In Figuur 5.8 staat een vergelijking weergegeven van de WKO-norm met het Drucker-Prager criterium. Uit het figuur blijkt duidelijk dat de Drucker-Prager criterium met toenemende diepte hogere debiet toestaat dan de WKO-norm. Het figuur lijkt te suggereren dat het debiet op basis van het Drucker-Prager criterium lineair toeneemt met de diepte. In werkelijkheid zal de doorlatendheid met de diepte afnemen. Het effect hiervan wordt weergegeven in Figuur 5.9.



Figuur 5.8 | Vergelijking IF WKO-norm en Drucker-Prager criterium. Constante doorlatendheid.



Figuur 5.9 | Vergelijking IF WKO-norm en Drucker-Prager criterium. Doorlatendheid afnemend met de diepte via een standaard compactie curve (Bahr 2001).

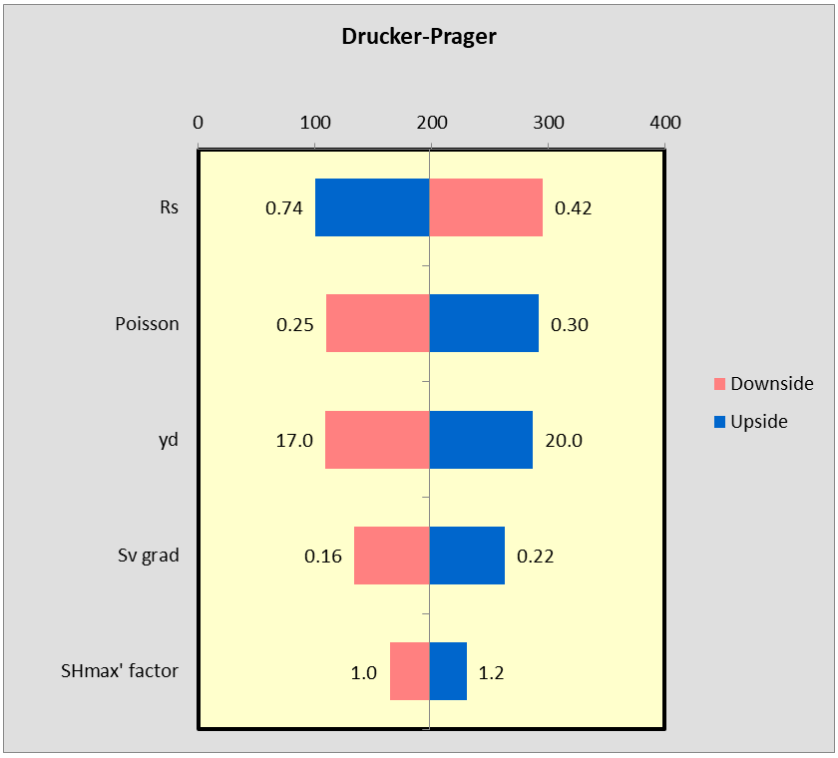
Gevoeligheid

Uit de uitgevoerde studie blijkt dat dat het Drucker-Prager criterium theoretisch goed gebruikt kan worden om te bepalen bij welke drukverlaging in een onttrekkingsput zand levering gaat optreden. Voor het gebruik van het Drucker-Prager criterium is echter gedetailleerde kennis over het reservoir nodig waaraan onttrokken gaat worden. Belangrijke invoerparameters voor het criterium zijn:

- Verticale spanning
- Horizontale spanning

- Verhouding tussen de minimale en maximale horizontale spanning
- Poisson's ratio
- Rondheid van de korrels
- Drooggewicht van het reservoir materiaal

Om de invloed van bovengenoemde parameters op het maximaal toelaatbare debiet door middel van het Drucker-Prager criterium te bepalen, is een tornadoplot opgesteld. De tornadoplot is weergegeven in Figuur 5.10. De invloed van de minimale horizontale spanning wordt meegenomen door de Poisson's ratio. De Poisson's ratio wordt namelijk gebruikt om de verticale spanning om te rekenen naar een horizontale spanning. De variatie in de parameters is bepaald op basis van de nauwkeurigheid waarmee ze op dit moment ingeschat kunnen worden. Uit het tornadoplot blijkt dat het met name interessant is om de rondheid van de korrels goed te kunnen kwantificeren, de Poisson's ratio (of Shmin) beter in te kunnen schatten en om het droge gewicht van het reservoir sediment nauwkeurig te kunnen bepalen.



Figuur 5.10 | Tornadoplot parameters Drucker-Prager. Rs is rondheid korrels, yd is droge gewicht sediment en Shmax factor is de verhouding tussen SHmax en Shmin.

5.5 CONCLUSIES DRUCKER-PRAGER CRITERIUM

Het Drucker-Prager failure criterium lijkt een goede methode om het maximaal toelaatbare debiet van een onttrekkingsput te bepalen. Het criterium kan het best vergeleken worden met de norm die momenteel gebruikt wordt voor WKO-putten. De WKO-norm gaat uit van een maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand bij een constante drukgradiënt, terwijl het Drucker-Prager criterium uitgaat van een maximaal toelaatbare spanningsverandering. Aangezien de snelheid op de boorgatwand in de WKO-norm leidend is, is het debiet lineair afhankelijk van de diameter van de

put. Dit betekent dat als de diameter van de put een factor twee groter wordt, ook het maximaal toelaatbare debiet een factor twee groter wordt. Aangezien de afpomping in een put veel minder afhankelijk is van de diameter van de put, is de invloed van de diameter bij het Drucker-Prager criterium beperkt.

Bovenstaande suggereert dat er met twee verschillende processen, die zandlevering veroorzaken, rekening gehouden moet worden: 1) Een proces waarbij de ondergrond instabiel wordt als gevolg van de toename van de differentiële spanning; 2) een proces waarbij de sleepkrachten dusdanig groot worden dat zandkorrels meegenomen worden.

Hoewel het Drucker-Prager criterium de sleepkrachten niet meeneemt, lijkt het criterium goed bruikbaar. Het staat in het algemeen hogere debieten toe dan de huidige WKO-norm. Afhankelijk van het proces (sleepkracht of shear failure) dat de laagste snelheid oplevert is een van de twee normen maatgevend. Het is hierom van belang het Drucker-Prager criterium aan praktijkgegevens te kalibreren.

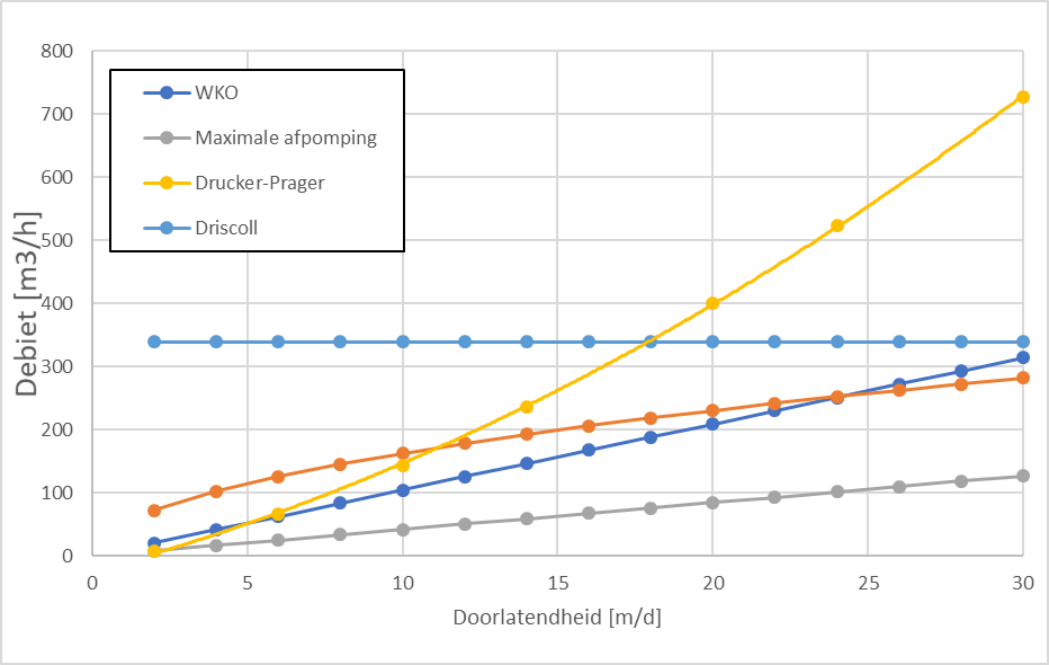
6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 SAMENVATTING NORMEN

In onderstaande Tabel 6.1 is een overzicht gegeven van de belangrijkste normen vanuit de diverse vakgebieden. In Figuur 6.1 zijn de verschillende normen grafisch weergegeven. Uit het figuur blijkt dat vanaf een bepaald debiet de maximaal toelaatbare snelheid in de filterspleet maatgevend wordt.

Tabel 6.1 | Samenvatting bestaande normen voor het bepalen van het maximaal toelaatbare debiet.

Norm	Snelheid [m/h]	Gemiddelde korrelmaat gravelpack	Filterspleet
WKO	$v_max = \frac{2\ k}{24}$	D50 van de fijnste zandlaag * 4	Filterspleet 0,1 mm kleiner dan geselecteerde ondermaat van het filtergrind.
Drinkwater	$v_{max} = 0.41\sqrt{k}$	Over het algemeen 1 korrelmaat grover dan WKO	Vergelijkbaar met WKO
Maximale afpomping	$v_{max} = \frac{0{,}81}{24} * k$	-	-
Max. snelheid filterspleet	$v_{filter} = \frac{v_b * \frac{r_b}{r_f}}{\theta}$	-	-
Olie en Gas	Maximale afpomping, shear failure. Diverse berekeningsmethodieken	D50 fijnste zandlaag * 6	< 10% D90 formatie



Figuur 6.1 | Samenvatting bestaande normen uitgezet tegen doorlatendheid (diepte 250 m-mv). Voor de norm van de maximaal toelaatbare snelheid in de filterspleet is een openoppervlak van het screen gehanteerd van 6%, en een verhouding van r_b/r_f van 2.4.

6.2 CONCLUSIES

De belangrijkste conclusies uit het onderzoek zijn:

- Conclusies olie- en gasbedrijven ongeconsolideerde formaties
  - In de praktijk van olie en gasbedrijven blijkt dat het voorkomen van zandproductie niet direct een ontwerpuitgangspunt is bij het bepalen van het maximale debiet. Wel worden er maatregelen genomen om het geproduceerde zand tegen te houden of er uit te filtreren.

- Bestaande normen voor zandvrije putten
  - In de praktijk van WKO, drinkwaterwinning en geothermie wordt het maximale debiet op diverse manieren bepaald:
    - Onttrekkingssnelheden op de boorgatwand gebaseerd op de maximale drukgradiënt op de boorgatwand;
    - Onttrekkingssnelheden gebaseerd op de maximale verlaging in de bron;
    - Onttrekkingsnormen gebaseerd op de maximale stroomsnelheid in de filterspleet.
  - De norm die uitgaat van de drukgradiënt (gebaseerd op de doorlatendheid van de formatie) is het meest toegepast binnen de WKO en drinkwatersector. Binnen de diepe geothermie wordt veelal ontworpen op maximale verlaging (of verhoging).
  - Voor alle gevonden normen geldt dat ze niet zijn ontwikkeld en ook zeer beperkt zijn toegepast op fijnzandige formatie met korrelgrootte kleiner dan 200 µm.
  - Indien de normen worden toegepast op fijnzandige formaties leidt dit tot sterk gereduceerde debieten. Hierdoor komt de economische haalbaarheid van ondiepe geothermie projecten onder druk te staan.

- Conclusies ondiepe geothermie Zevenbergen
  - Het Zevenbergen project is een van de weinige onshore project die gemaakt zijn in de formatie van Brussel. Deze zanden hebben een mediaan (D50) tussen de 100 en 170 µm. De horizontale doorlatendheid van de formatie op deze locatie wordt echter sterk beperkt door de hoge silt en kleifractie. Daarnaast kent de formatie op deze locatie een hoge mate van anisotropie (meer dan 30) waardoor de toestroming naar de horizontale putten sterk wordt gelimiteerd. Het is denkbaar dat deze hoge anisotropie in meer potentiele OGT reservoirs aanwezig is.
  - Technisch-economisch is het plaatsen van een gravelpack voor dit project niet mogelijk gebleken. Dit betekent dat het zand door het screen moet worden tegengehouden en dat de onderfractie van de formatie tijdens het ontwikkelen volledig moet worden verwijderd. Om het zand voldoende tegen te houden is een screen met een fijne maaswijdte gekozen. Uit de eerste testresultaten blijkt dat de zandlevering zeer beperkt is en eenvoudig kan worden afgevangen met bovengrondse filters.
  - Ondanks dat het voorlopige debiet lager is dan het ontwerpdebiet ligt de stroomsnelheid op de boorgatwand aanzienlijk hoger dan de drinkwater/WKO putnormen. In het ontwerp heeft snelheid op het boorgat geen rol gespeeld en is met name gekeken naar de maximaal mogelijke drukken.

- Toekomstige normen
  - Uit de olie en gasliteratuur blijkt dat er richtlijnen bestaan om te bepalen bij welke drukdaling (flow) mogelijk zandlevering optreedt. Het Drucker-Prager failure criterium lijkt een goede methode om het maximaal toelaatbare debiet van een onttrekkingsput te bepalen. In vergelijking met de huidige WKO onttrekkingsnorm geeft deze norm aan dat veel hogere debieten aan een put kunnen worden onttrokken. Hiermee neemt de economische haalbaarheid van ondiepe geothermie aanzienlijk toe.

  - De beschreven methoden vereisen veel kennis over de formatie waaraan onttrokken gaat worden. Er zijn methoden om de vereiste input met voldoende nauwkeurigheid te bepalen. Uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat met name de rondheid van de korrels, de minimale horizontale stress (Poisson's ratio) en het drooggewicht van het sediment een belangrijke rol spelen.

6.3 AANBEVELINGEN

Voor toekomstige ondiepe geothermie projecten zijn de volgende punten van belang:

- De formaties die geschikt zijn voor ondiepe geothermie zijn erg weinig gebruikt voor drinkwater/WKO en voor olie/gas. Dit maakt dat de geohydrologische parameters een grote mate van onzekerheid hebben. Een proefboring eventueel met capaciteitstest is voorlopig voor elk ondiep geothermie project noodzakelijk.
- De formaties die geschikt zijn voor ondiepe geothermie zijn in het algemeen zeer fijnzandig (< 150 µm) en niet gecementeerd. Om zandlevering te voorkomen moet er een zand filterende zone worden gecreëerd. Vanwege het ontbreken van een grove fractie in de geselecteerde formatie is het noodzakelijk de bronnen te voorzien van een gravelpack. Wellicht dat bij meer gecementeerde formaties (zoals die gevonden worden bij diepe geothermie) een gravelpack achterwege gelaten kan worden.

- De ervaring met het boren en ontwikkelen van waterputten in fijnzandige formaties is beperkt. Meer onderzoek is nodig naar het boren en ontwikkelen van waterputten in fijnzandige formaties. Hier is het belangrijk dat er een balans wordt gevonden tussen het veilig boren en het verwijderen van de mud (skin) en het zand rond de put.
- Ten aanzien van het Drucker-Prager criterium dienen de volgende punten verder te worden gewerkt:
  - De relatie tussen de huidige WKO norm en het Drucker-Prager criterium voor diverse geologische formaties en de diepte (druk) afhankelijkheid in beide normen;
  - Het kalibreren van het Drucker-Prager criterium aan bestaande en nieuwe ondiepe geothermie en hoge temperatuuropslag projecten.
  - Een praktische methodiek ontwikkelen om de rondheid van de korrels van de formatie in te schatten. De rondheid kan bijvoorbeeld afhangen van het type afzetting (facies).
  - Het vinden van methoden voor het beter inschatting van Shmin, of ondiepe Poisson's ratio.

De benodigde geomechanische parameters kunnen waarschijnlijk afgeleid worden uit well log metingen. Op basis van ondiepe leak off testen kan wellicht een goede inschatting van een Shmin verkregen worden. Ook kunnen WKO putten waarbij opbarsting is opgetreden, gebruikt worden om Shmin te bepalen. Het bepalen van korrelgroottes en korrelgrootteverdelingen is vrij eenvoudig uit te voeren door zandmonsters tijdens de boring te nemen. Uitdaging hierbij is hoe de metingen representatief gemaakt worden voor het gehele filtertraject. Wellicht zijn de korrelgroottemetingen te correleren aan continue logmetingen.

7 Literatuur

Abass, H.H, en et al. 1993. “Stimulating Weak Formations Using New Hydraulic Fracturing and Sand Control Approaches”. *Society of Petroleum Engineers*.

Bahr, D.B. 2001. “Exponential approximations to compacted sediment porosity profiles”.

Bareither, C. 2008. “Geological and Physical Factors Affecting the Friction Angle of Compacted Sands”. JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING © ASCE.

Buik, N. 2001. “Ontwerpnormen voor bronnen voor koude-/warmteopslag.” Arnhem: IF Technology.

Cabalar, A. unknown. “Influence of grain shape and gradation on the shear behavior of sand mixtures”. University of Gaziantep, Department of Civil Engineering.

Carlson, Jon, en et al. 1992. “Sand control: Why and How ?” Slumberger: Completion/Stimulation.

Casini, F, R Brauchli, en S Springman. 2011. “Grain size distribution and particle shape effects on shear strength of sand”. Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Charalambous, A, M Packman, en B Burnet. 2012. “Sand pumping and well design in consolidated and semi-consolidated sandstone reservoirs”. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology.

Doorn, drs Th H. M. van, drs C. I. Leyzers Vis, en drs N. Salomons. 1985. “Aardwarmtewinning en grootschalige warmteopslag in tertiaire en kwartaire afzettingen”. Haarlem: RGD.

Driscoll, F., G. 1987. *Groundwater and Wells, second edition*. Minnesota: Johnson Filtration systems Inc.

Hazen, A. 1982. “Some physical properties of sands and gravels.” Massachusetts State Board of Health, Annual Report, 539-556.

IF Technology. 2002. “Well and Borehole Failures in UTESS. State of the Art 2000.” Arnhem.

IF Technology, KEMA, DLV Glas en Energie. 2012. “Kansen voor Ondiepe Geothermie voor de glastuinbouw”. Arnhem.

KIWA. 2011. “Kennisdocument Putten(velden) : Ontwerp, aanleg en exploitatie van pomp- en waarnemingsputten”.

Kobus, E. J. M., T. N. Olsthoorn, H. Tuinzaad, en A. N. G. de Vogel. 1976. “Omstortingen van waterwinningsputten en het maximaal toelaatbare putdebiet”. Rijswijk: KIWA.

Mechelse E. 2017. “The in-situ stress field in the Netherlands: Regional trends, local deviations and an analysis of the stress regimes in the northeast of the Netherlands”. TU Delft.

Misstear, B., D., R., en et al. 2006. “Water wells and boreholes”. Wiley, Chichester, UK.

Palmer, I. 2003. “Predicting and Managing Sand production: a new strategy”, oktober.

Pluymaekers, M, en et al. 2013. “HTO - Hoge temperatuur opslag in de ondiepe ondergrond”. TNO-rapport.

Sanchez, M, en R Tibbles. 2007. “FRAC PACKING: FRACTURING FOR SAND CONTROL”. Slumberger.

Saucier, R. J. 1974. “Considerations in Gravel Pack Design”. SPE.

Sheperd, R. G. 1989. “Correlations of Permeability and Grain Size”. *Ground Water*, oktober 1989.

Stark, N, en et al. 2014. “The impact of particle shape on the angle of internal friction and the implications for sediment dynamics at a steep, mixed sand-gravel beach”. opernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.

Tingay, M. 2015. “State and origin of present-day stress fields in sedimentary basins”. Department of Applied Geology, Curtin University of Technology, Perth.

Van Wees, J.D., L. Buijze, K. Van Thienen-Visser, M. Nepveu, B.B.T. Wassing, B. Orlic, en P.A. Fokker. 2014. “Geomechanics response and induced seismicity during gas field depletion in the Netherlands”. *Analysis of Induced Seismicity in Geothermal Operations* 52 (0): 206–19. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.05.004.

Vaziri, H. 2002. “Assessment of several sand prediction models with particular reference to HPHT wells”. *SPE/ISRM 78235*.

Veeken, C.A.M, en et al. 1991. “Sand Production Prediction Review: Developing an Integrated Approach”. *Society of Petroleum Engineers*.

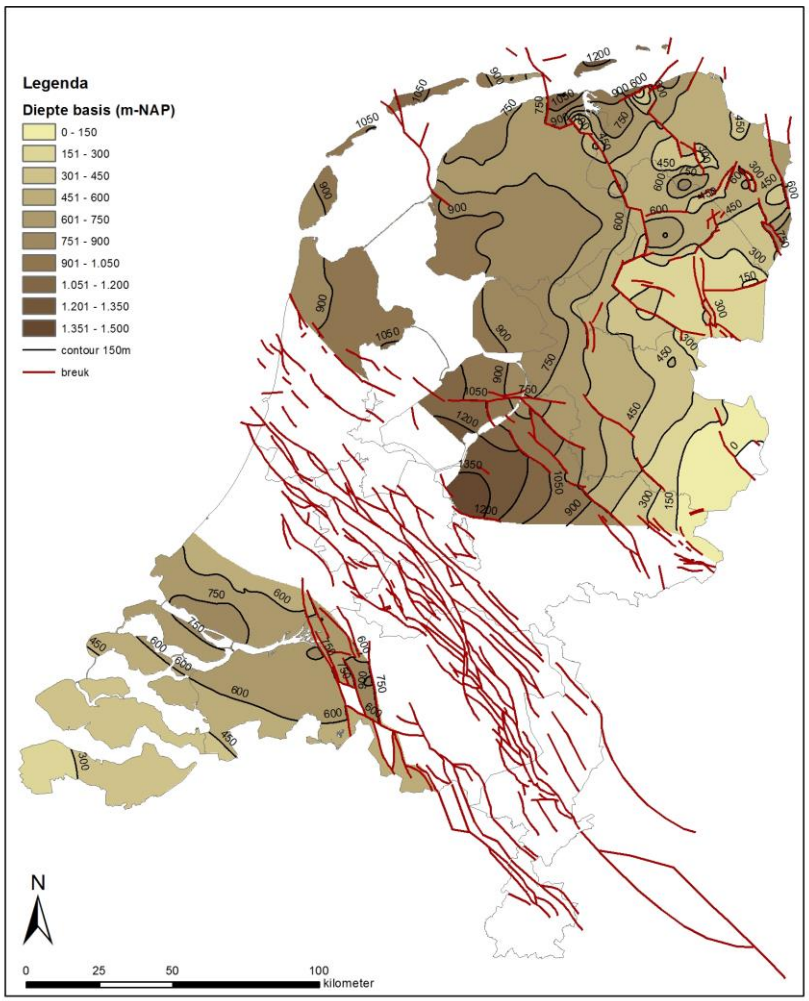
VS&H, 2019. Eerste resultaten onttrekkings- injectietest eind 2019.

Yi, Xianjie. 2003. “Numerical and analytical modeling of sanding onset prediction”, augustus.

Bijlage 1

FORMATIE VAN BRUSSEL

Het Zand van Brussel is een mariene afzetting bestaande uit zeer fijn, vaak verkit, klei- en kalkhoudend zand. Deze sedimenten zijn afgezet in twee gescheiden bekkens in Nederland, waarbij de bekkens gesitueerd waren in het zuidwesten (Zeeland, West-Brabant en ten zuiden van Rotterdam) en het noorden (lijn ten noorden van midden Noord-Holland, midden Flevoland, noordwest Gelderland en midden Overijssel). Uit de geïnventariseerde data blijkt dat de kwaliteit van het zand vermindert naar het noorden en de bekkenranden toe. Dit blijkt uit de toename in het kleigehalte en cementatie en een slechtere sortering. In het algemeen neemt het kleigehalte toe aan de basis en de top.

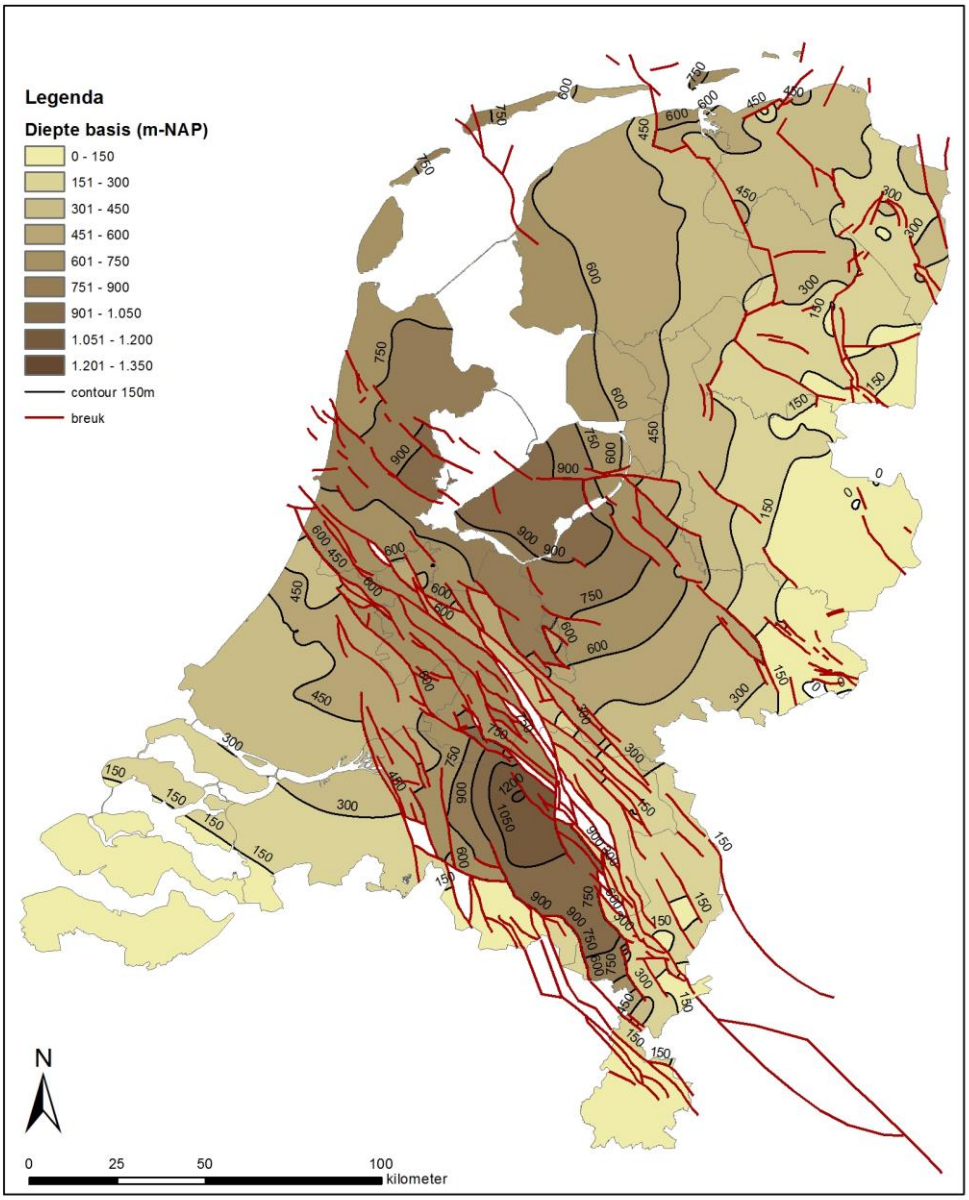


Brussels Zand

Onderwerp: Diepte basis
Referentie: 61335/WN
Auteur: MB
Datum: 2-2-2012
Status: definitief

FORMATIE VAN BREDA

De formatie bestaat uit een afwisseling van zanden, kleiige zanden en kleien van mariene oorsprong. De zandige eenheden binnen de formatie verschillen sterk qua verbreiding, diepteligging, dikte en eigenschappen. In twee gebieden zijn er duidelijk dikkere pakketten afgezet, namelijk in de centrale slenk en in het Zuiderzee bekken. Dit is te wijten aan een actieve periode van slenk- en bekkenvorming in deze gebieden.

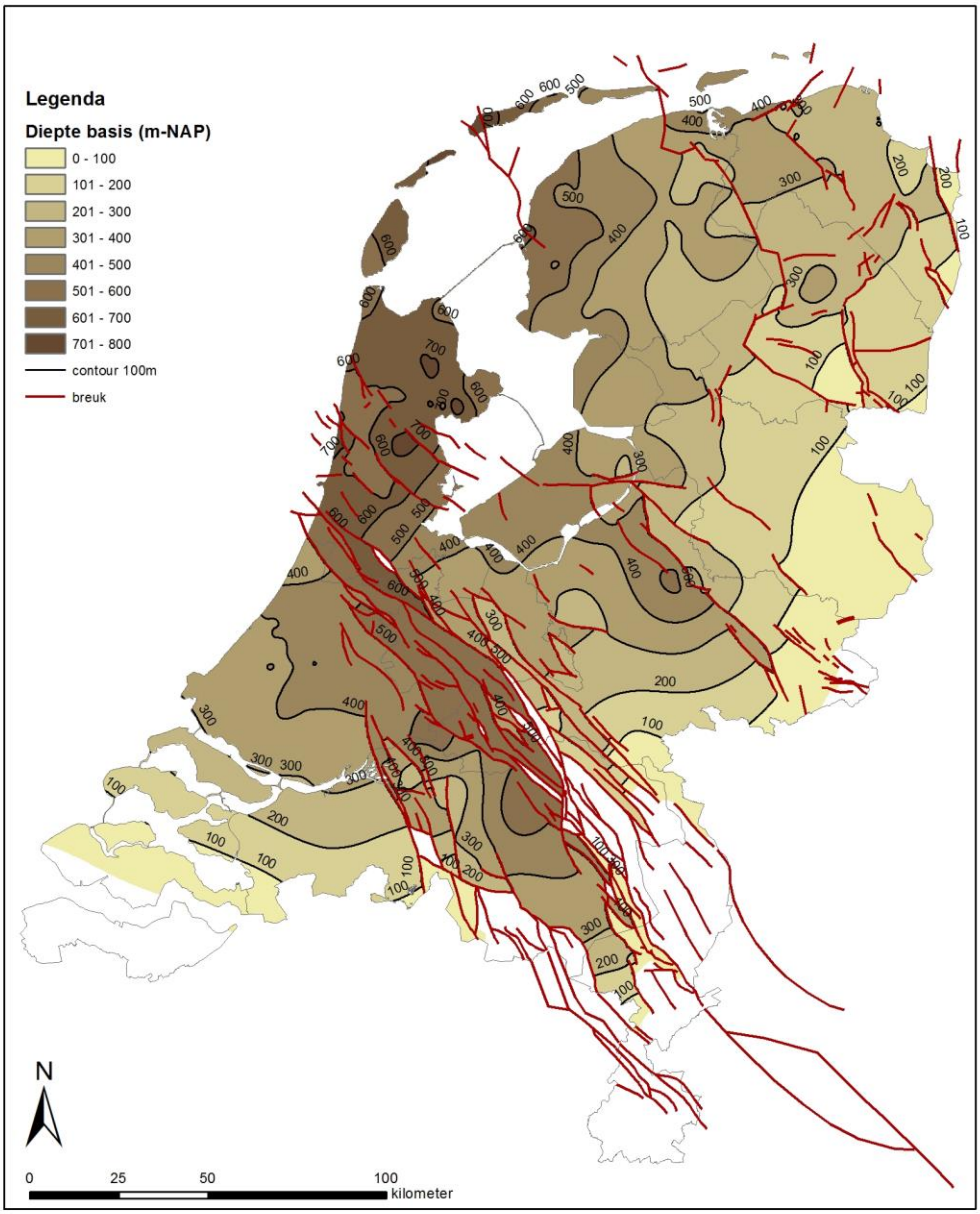


Formatie van Breda

Onderwerp: Diepte basis
Referentie: 61335/WN
Auteur: MB
Datum: 2-2-2012
Status: definitief

FORMATIE VAN OOSTERHOUT

De formatie bestaat uit een pakket mariene kleien, zandige kleien en kleiige zanden. De afzettingen bevatten vaak glimmers, verkoolde houtresten en vooral in het oosten veel schelpgruis. Zowel de basale lagen als de top van de formatie bestaan in grote delen van Nederland uit zandige afzettingen. Hiertussen zitten kleiige niveaus die uitwiggen naar het oosten. In het westen van Nederland ontbreekt het basale zandpakket volledig.

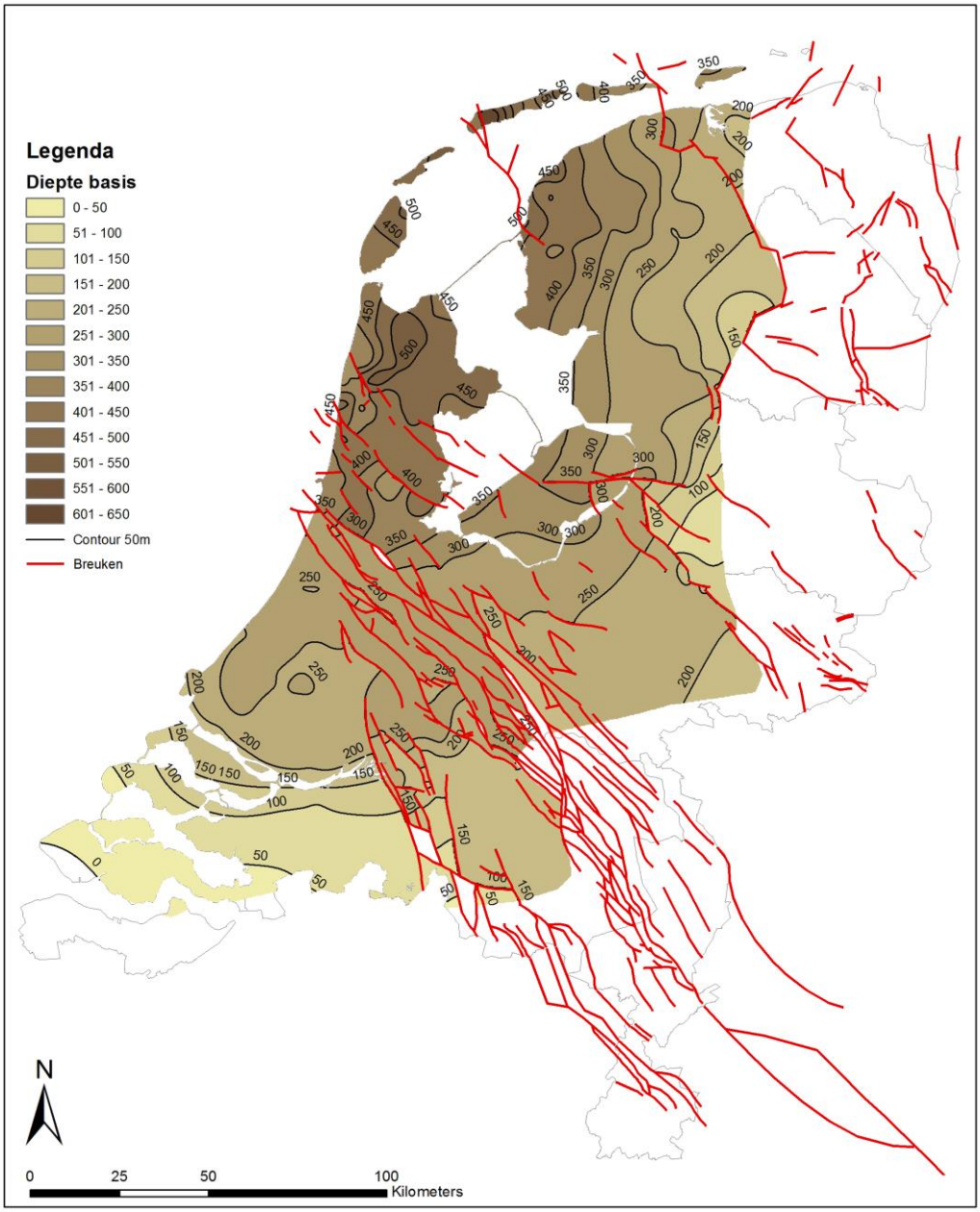


Formatie van Oosterhout

Onderwerp: Diepte basis
Referentie: 61335/WN
Auteur: MB
Datum: 2-2-2012
Status: definitief

FORMATIE VAN MAASSLUIS

De afzettingen van de Formatie van Maassluis zijn overwegend ondiep mariene, matig fijne tot grove kleiige zanden, die soms schelprijk zijn. Naar het oosten toe gaat het meer om deltaïsche zanden en/of continentale afzettingen.



Formatie van Maassluis

Onderwerp: Diepte basis
Referentie: 61335/WN
Auteur: MB
Datum: 23-9-2011
Status: definitief

IF Technology **Creating energy**

IF Technology **Creating energy**