

TNO-rapport

HTO - Hoge temperatuur opslag in de ondiepe ondergrond

Earth, Environmental and Life Sciences

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
infodesk@tno.nl

Datum	1 november 2013
Auteur(s)	Maarten Pluymaekers Jan-Diederik van Wees Muriel van der Kuip Vincent Vandeweyer
Exemplaarnummer	TNO 2013 R11694
Oplage	
Aantal pagina's	51 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgevers	Installect Haitjema Greenhouse Geopower Terratech VB Projects
Projectnaam	HTO - Hoge temperatuurs opslag in de ondiepe ondergrond
Projectnummer	052.04068

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, 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 belang-hebbenden is toegestaan.

© 2013 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Doelstelling	4
1.2	Uitvoering.....	4
2	HTO rekentool	6
2.1	Randvoorwaarden	6
2.2	Performance	7
2.3	Conclusie	12
3	Kartering	13
3.1	Randvoorwaarden	13
3.2	Werkwijze	13
3.3	HTO Potentie kaarten	13
4	Kosten/baten analyses	22
4.1	Koekoekspolder	22
4.2	Bergerden	26
5	Appendices	30
5.1	Appendix - Handleiding tool.....	30
5.2	Appendix - Literatuur onderzoek	35
6	Ondertekening	51

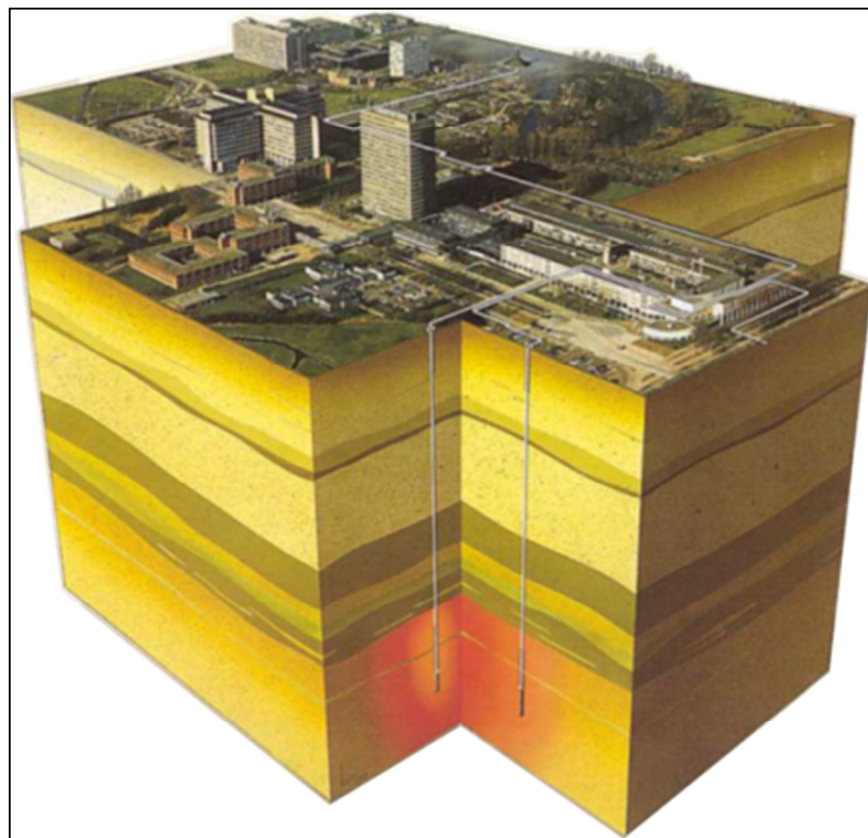
1 Inleiding

Het wordt steeds belangrijker om de productie- en vraag van warmte optimaal te matchen. Opslag van heet water in de ondergrond (HTO) zou een mogelijke oplossing kunnen zijn.

TNO, Installect, Haitjema, Greenhouse Geopower, Terratech, VB Projects hebben gedurende het project “HTO – Hoge temperatuur opslag in de ondiepe ondergrond” getracht kritische factoren vast te stellen en een rekentool ontwikkeld om de economische haalbaarheid te bepalen.

TNO heeft data, kennis, en modellen van de ondergrond gebruikt om een inschatting maken van de op de geologie gebaseerde mogelijkheden voor HTO. De deelnemende partijen hebben kennis van het boren, installaties en de opslagbehoefte van de verschillende groepen warmteafnemers ingebracht.

Het project is uitgevoerd in de vorm van een technologie cluster (TC). In dit TC heeft TNO kennis verzameld, gecreëerd en overgedragen waardoor bedrijven beter in staat zijn om een inschatting te maken van de kans op succes bij HTO.



Figuur 1: Schematische weergave van de HTO putconfiguratie op de Uithof, Utrecht (Drijver, 2012)

1.1 Doelstelling

De deelnemers hadden voor het project de volgende doelen gesteld:

- Identificatie van aan de hand van de ondergrond potentieel geschikte gebieden
- Doorrekenen van enkele business cases
- De vergaarde kennis verspreiden tussen de deelnemende partijen
- De vergaarde kennis verspreiden door middel van publicaties op bijv. de website van het Platform Geothermie

1.2 Uitvoering

De voorgestelde aanpak is tijdens het kick-off overleg besproken. Het werk is onderverdeeld in werkpakketten, waarin activiteiten gegroepeerd zijn. Het project is als volgt uitgevoerd:

WP1:

- Werkplan en initiële criteria bespreken/bepalen (Kick-off overleg)
- Uitvoeren van literatuurstudie, vaststellen van de state-of-the-art

WP2:

- Identificatie van potentieel geschikte gebieden a.d.h.v. ondergrond
- Selectie van scenario's (workshop 1)
- Vaststellen en vastleggen van details voor de business case berekeningen bepalen voor scenario's (workshop 2)

WP3:

- Doorrekenen en rapporteren van de business cases (workshop 3)
- Overkoepelende rapportage en presentatie van de scenario berekeningen (eindbespreking).

Aan het selecteren van scenario's en voor het vaststellen en vastleggen van details voor de business case berekeningen zijn twee workshops (workshop 1 & 2) gewijd.

Tijdens een derde workshop (workshop 3) is de rekenmethode uitgebreid toegelicht en zijn nog enkele laatste aanpassingen voorgesteld.

Tijdens een vierde overleg (eindbespreking) zijn de uiteindelijke resultaten besproken, mede in de aanwezigheid van enkele potentiële gebruikers (Hydreco & GreenVice Consulting – Bergerden). Eneco had ook de intentie om dit overleg bij te wonen, echter moesten zij zich op een laat moment afmelden.

Naast de workshops, welke tevens dienden als voortgangsoverleg, zijn er deelresultaten gepresenteerd op de I-Demodagen 2013. Het thema van de I-Demodagen 2013 was "Energie en Arbeid in de kwekerij van morgen". De presentatie, gehouden op 3 oktober, waarin het project werd beschreven en de deelnemers zijn genoemd werd goed ontvangen.

Tevens zal er nog een persbericht uit gestuurd worden en als laatste actie binnen het project zal er ook nog een presentatie gegeven worden bij de Themabijeenkomst BodemenergieNL op 3 december 2013. Het thema van deze

bijeenkomst is Hoge temperatuur opslag. Deze bijeenkomst waarbij vele potentiële gebruikers en geïnteresseerden aanwezig zullen zijn lijkt perfect aan te sluiten op het project en zal een mooi medium vormen om er bekendheid binnen de juiste doelgroep aan te geven.

2 HTO rekentool

2.1 Randvoorwaarden

De performance van ondergrondse hoge temperatuur opslag is afhankelijk van zowel kosten-technische als ondergrondse factoren. Om deze factoren in een gezamenlijke context te kunnen analyseren is een (gesimplificeerd) rekenmodel gemaakt.

De uitgangspunten voor het rekenmodel zijn:

- De ondergrondse installatie bestaat uit een injectie en productie put
- Het rendement van het systeem per seizoen cyclus is 75% (Bakker, 2009). Dat wil zeggen: het aantal winbare uren is 75% van het aantal opslaguren.
- De winbare uren van het systeem is maximaal $8760 \text{ uur} / (1 + 1.33) = 3760 \text{ uur}$ per jaar.
- Variabele kosten hangen samen met de elektriciteits-consumptie voor de pompen voor opslag en terugwinning van het water: dat is het product van het pompvermogen en het aantal draaiuren (winbare uren $\times (1 + 1/0.75 = 2.34)$)
- Het benodigd pompvermogen (P_{pump}) wordt berekend aan de hand van drukverliezen in de putten en in het reservoir. Voor de putten wordt formule A5 in Van Wees et al., 2012 gebruikt. Roughness van de tubing is 1.38 milli-inch. Voor de reservoir weerstand wordt formule 2 uit Van Wees et al., 2012 gebruikt.
- De netto Coëfficiënt of performance (COP) van het systeem wordt berekend als $(T_{\text{prod}} - T_{\text{out}}) \cdot C_p / (P_{\text{pump}} \cdot (1 + 1/0.75 = 2.34) / \text{Pompefficientie})$. T_{out} is uitkoelingtemperatuur. C_p is warmtecapaciteit. Voor pomp efficiëntie is 63% aangenomen (KEMA).

De uitgangspunten zijn verwerkt in een spreadsheet i.c.m. andere belangrijke parameters om een kosten-baten analyse uit te voeren. Deze spreadsheet vormt de HTO rekentool. De spreadsheet is een aanpassing op de techno-economische berekeningen voor ThermoGIS (www.thermogis.nl), een programma ontwikkeld door TNO.

De HTO rekentool maakt een berekening van de kosten en baten over de projectduur van hoge temperatuur opslag (Aquifer Thermal Energy Storage – ATES), met als resultaat de *Levelized Cost of Energy* uitgedrukt in EUR/GJ. Deze berekening is gebaseerd op kostenberekeningen zoals die voor de Stimulering Duurzame Energieproductie (SDE) regeling zijn gemaakt door ECN.

De ingevoerde waarden voor diepte, debiet in samenhang met een netto COP voor reservoir en ondergrondse puttransport COP, worden als input gebruikt. De netto COP voor een input debiet kan worden berekend in de sheet “ATES-performance” van het rekenmodel.

De handleiding voor de HTO rekentool is beschreven in appendix 5.1

2.2 Performance

Een van de belangrijkste performance indicatoren voor een succesvol HTO systeem is de doorlatendheid van de ondergrond. De doorlatendheid bepaalt samen met de toegepaste pompdruk het debiet en COP van het systeem.

De maximale toepasbare pompdruk is afhankelijk van de diepte van de aquifer. Als veilige randvoorwaarde hebben we een aanname voor de pompdruk aangenomen van maximaal 10% van de hydrostatische druk. Dit komt neer op 1 bar per 100m diepte.

Om meer grip te krijgen op de minimale doorlatendheid die nodig is voor een economisch rendabel HTO systeem, is het effect van de diepte berekend op minimale doorlatendheid, COP, en debiet.

Onderstaande referentie waarden (Tabel 1) zijn gebruikt voor deze performance analyse, met als belangrijkste uitgangspunt dat de maximale kostprijs 6 EUR per geleverd GJ bedraagt.

Tabel 1: Referentie waarden performance analyse

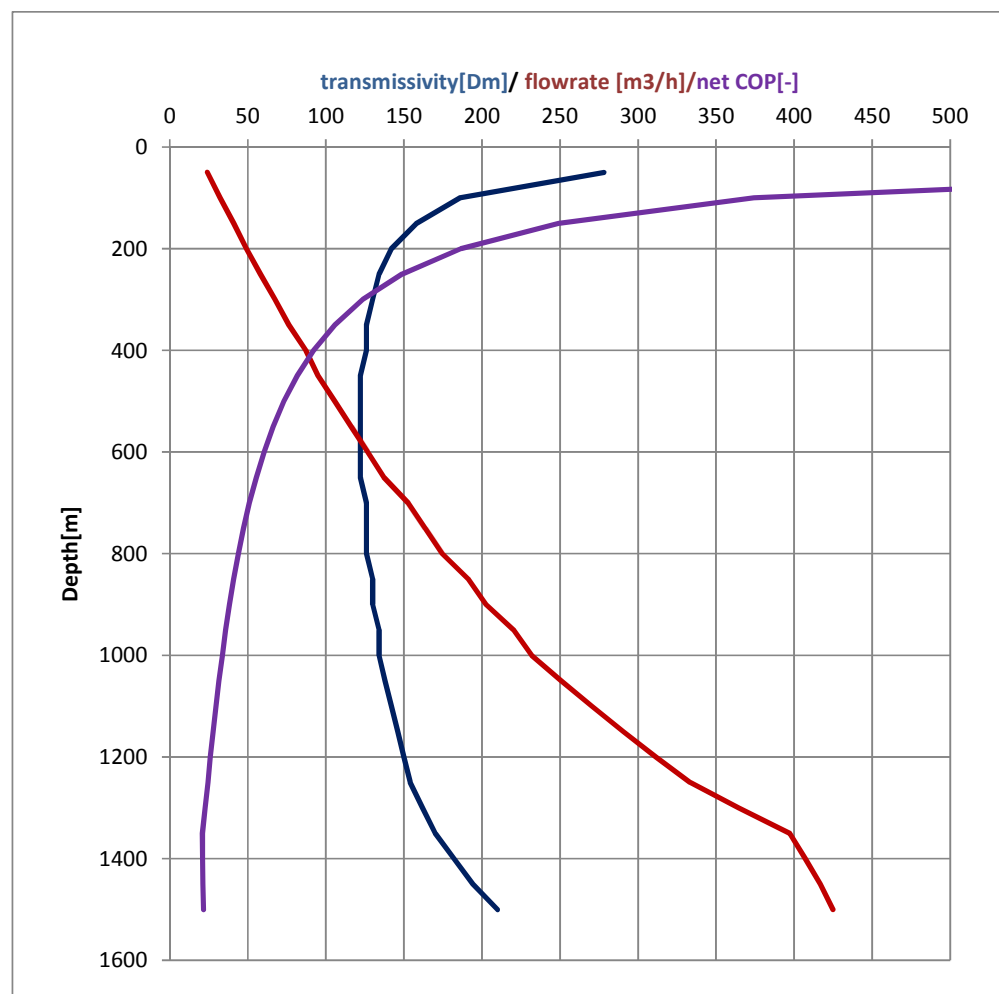
Parameter	
Maximaal toegestane LCOE [EUR/GJ]	6
Effective productie temperatuur [C]	70
Project duur [y]	15
Uitkoelingstemperatuur [C]	35
putkosten [EUR/m]	1000 ¹
Pomp investeringskosten	0.1
Pomp workover kosten/interval [mln/y]	0.1 per 5 jaar
Electriciteisprijs voor aandrijving van de pompen [EUR/MWhe]	140
Effectieve Productie uren [h]	3000
Opslag uren [h]	4000
Warmte-wisselaar investering [kEUR/MWth]	150
Warmte wisselaar fixed operating kosten [% van capex]	1%
Project financiering –rente op lening[%]	6%
Project financiering – return on investment [%]	15%
Project financiering – percentage eigenvermogen [%]	20%
Projectfinanciering – duur lening [y]	15
Projectfinanciering – afschrijvingsperiode voor belasting[y]	15

Figuur 2 beschrijft de resultaten van de performance analyse uitgevoerd met referentie waarden uit Tabel 1. Omdat voornamelijk de investeringskosten

¹ Gebaseerd op put met een diameter van 9 5/8 inch

(boorkosten) toenemen met de diepte zal, om te voldoen aan de minimale kostprijs per GJ, ook het minimale vereiste debiet (en zo de totale warmte productie) toenemen met de diepte. Uit het debiet is de minimale transmissiviteit en COP bepaald bij de maximale toelaatbare pompdruk.

De minimale transmissiviteit is ca. 120 Dm op 400 - 800 meter. Boven de 400m neemt de minimaal vereiste transmissiviteit toe omdat er minder pompdruk toegepast mag worden om het vereiste debiet te halen. De toename van de minimale transmissiviteit in het domein dieper dan 800m is toe te schrijven aan hogere wrijvingsverliezen in de putten, en een lagere efficiëntie (COP) van het systeem op grotere diepte.



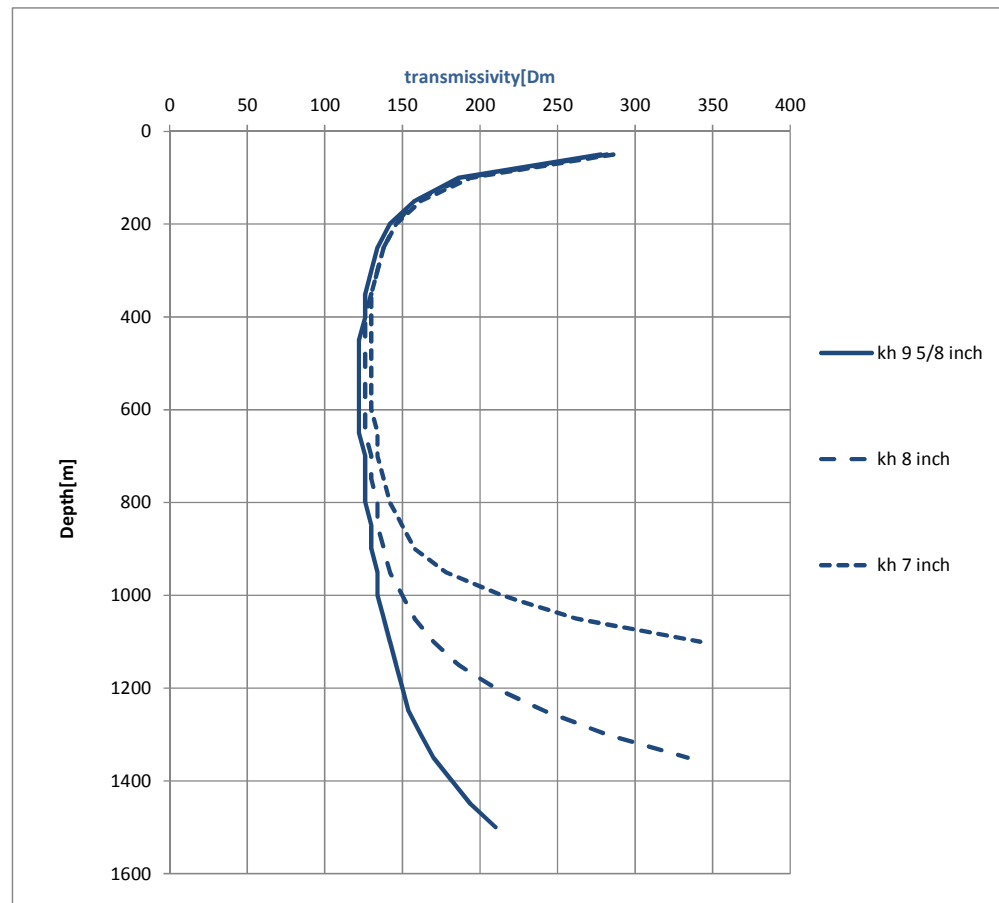
Figuur 2: Transmissiviteit (blauw), debiet (rood) en COP (paars) uitgezet tegen de diepte.

Om de (economische) gevoeligheid van een HTO systeem nader te onderzoeken is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met betrekking tot variaties in:

- Put diameter
- Temperatuur buffer water
- Vollast uren
- Elektriciteitsprijs
- Maximale kostprijs (LCOE)

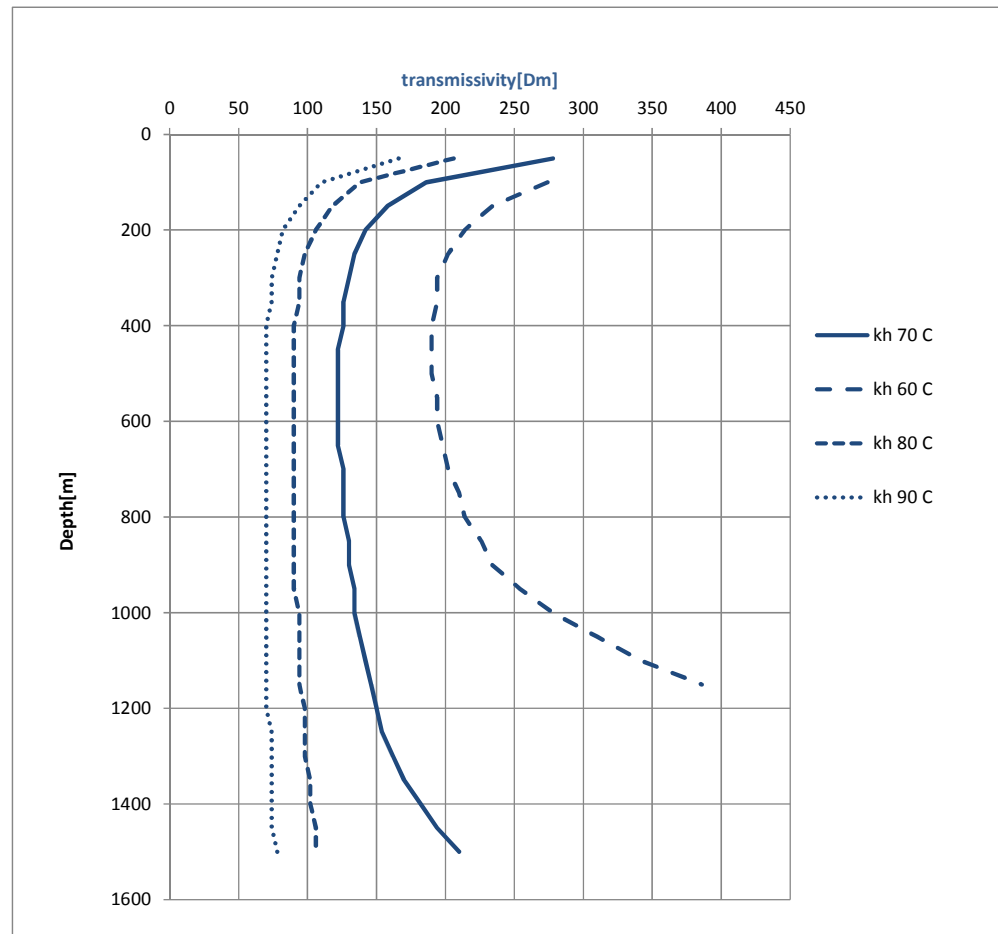
Figuren 3 tot en met 6 geven de resultaten van de gevoeligheidsanalyse. In elke figuur wordt de referentie case aangegeven met de doorgetrokken lijn, en de variatie in minimale transmissiviteit als gevolg van de gevoeligheidsanalyse in onderbroken lijnen.

Variatie in putdiameter (Figuur 3) heeft beperkte invloed op de performance van het systeem tot een diepte van 800 m. Alleen bij hogere debieten ($> 250 \text{ m}^3/\text{h}$) en grotere dieptes beperken kleinere putdiameters (7-8 inch) het systeem. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door hogere wrijvingsverliezen bij kleinere diameters.



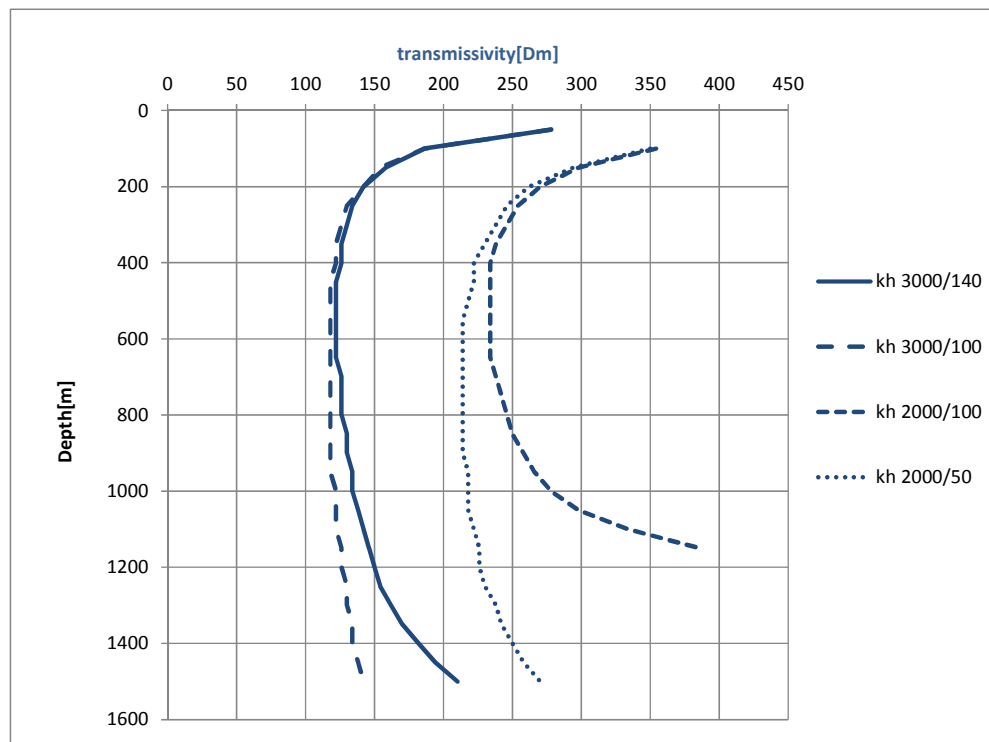
Figuur 3: Performance analyse met betrekking tot variatie in put diameter (7- 9 5/8 inch).

Variatie in temperatuur van het opslagwater (Figuur 4) heeft sterke invloed op de performance van het systeem. Hoe hoger de temperatuur van opslagwater, hoe beter de performance. Bij een opslagtemperatuur van 90°C wordt de minimale transmissiviteit gereduceerd tot minder dan 70 Dm, vergeleken met een minimale transmissiviteit van 120 Dm bij 70°C . Bij een opslagtemperatuur onder de 70°C verslechtert de performance van het systeem aanzienlijk.



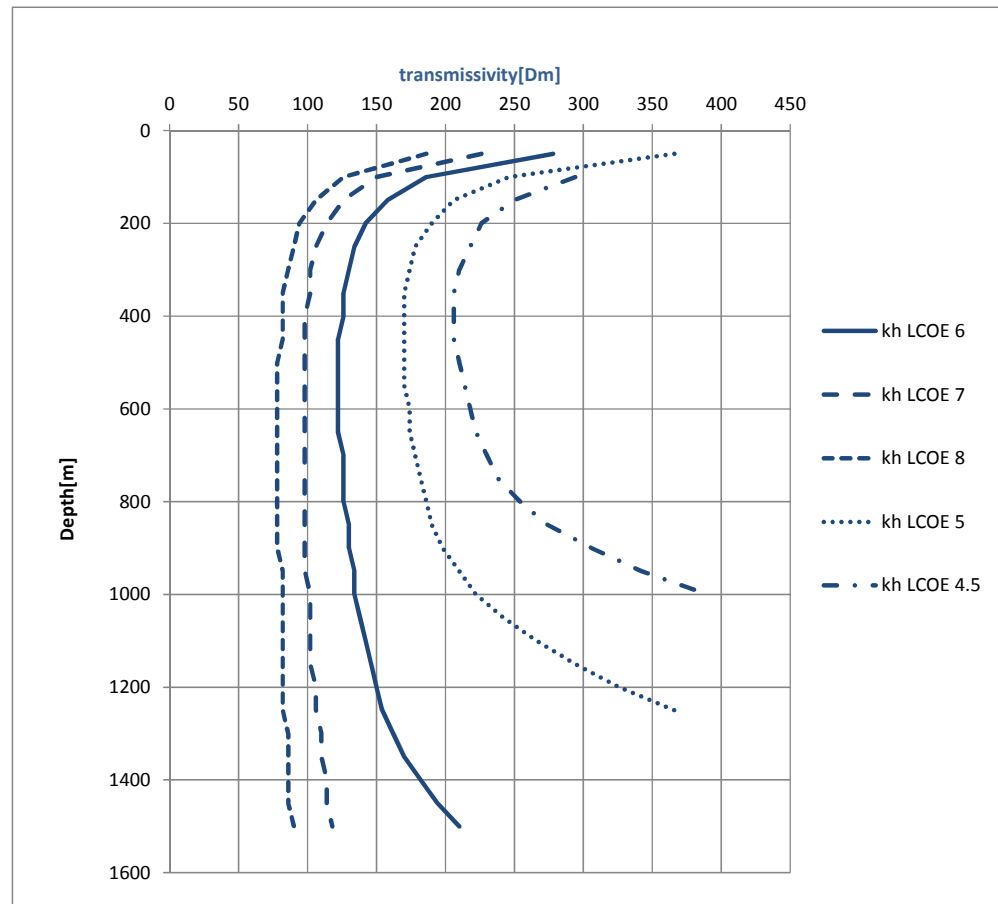
Figuur 4: Performance analyse met betrekking tot variatie temperatuur opslagwater (60-90C).

Variatie in vollast uren en elektriciteitsprijs is weergegeven in Figuur 5. Variatie in elektriciteitsprijs heeft beperkte invloed op de performance. Echter het aantal vollast bedrijfsuren van een HTO systeem heeft veel invloed op de performance. Een lager aantal bedrijfsuren van het systeem is ongunstig voor de performance.



Figuur 5: Performance analyse met betrekking tot variatie van vollast uren (3000 vs 2000 uur) en elektriciteitsprijs (140-50 EUR/MWh).

In Figuur 6 is het resultaat weergegeven van het effect van de minimale transmissiviteit op de kostprijs. Een toename van de transmissiviteit van 80 Dm naar 170 Dm resulteert in een verlaging van de kostprijs van 8 EUR/GJ naar 5 EUR/GJ.



Figuur 6: Performance analyse met betrekking tot variatie in maximale toelaatbare kostprijs (4.5-8 EUR/GJ)

2.3 Conclusie

De doorlatendheid van de aquifer, de temperatuur van het opslag water en het aantal vollast bedrijfsuren zijn belangrijke performance indicatoren voor een HTO systeem.

De uitgevoerde gevoeligheidsanalyse laat een minimale ondergrens voor de doorlatendheid zien van ca. 120 Dm. De minimale noodzakelijke doorlatendheid in het domein tussen 100-200 meter is aanzienlijk hoger: ca. 200 Dm. Naast de ondergrondse randvoorwaarden wordt de economische haalbaarheid ook sterk beïnvloed door de temperatuur van het opslag water en het aantal vollast bedrijfsuren. Hoe hoger de temperatuur en het aantal vollast uren, hoe lager de kostprijs per eenheid warmte.

3 Kartering

3.1 Randvoorwaarden

Voor de selectie van potentieel geschikte gebieden zijn de volgende randvoorwaarden aangenomen:

- Minimale aquifer diepte van 150m (ivm opwarming oppervlakte temperatuur)
- Maximale aquifer diepte van 1500m (ivm boorkosten)
- Minimale aquifer dikte van 20m
- Minimale aquifer transmissiviteit van 100Dm (oftewel ongeveer 100 m²/dag)

Naast bovenstaande aquifer eigenschappen is interferentie met grondwater beschermingsgebieden niet gewenst (Figuur 8). Tevens wordt als extra randvoorwaarde gesteld dat een HTO systeem zich niet in het zoet water domein bevindt (Figuur 8).

3.2 Werkwijze

De potentie kaarten zijn gebaseerd op de bij TNO aanwezige (openbare) data sets. Dit betreft het REGIS-II hydrologisch model voor de ondiepe ondergrond (tot maximaal 500m) en het ThermoGIS model voor aquifers dieper dan 1000m. Dit zijn modellen met stromings eigenschappen.

Kartering (van met name stromingseigenschappen) in het ondergrondse domein tussen 500-1000m is onderwerp van de huidige (nog niet afgeronde) karteerprogramma's.

De volgende werkwijze is toegepast voor het maken van de potentie kaarten. Alle aquifers zijn vooraf gescreend op de minimale dikte van 20m. Dunne watervoerende pakketten zijn uitgesloten. Vervolgens zijn de transmissiviteits kaarten als uitgangspunt genomen, en getrunceerd waar niet aan de randvoorwaarden werd voldaan. Het resultaat is geaggregeerd tot een potentie kaart. Voor formaties met meerdere (dunne) watervoerende lagen is de totale transmissiviteit genomen van alle afzonderlijke lagen samen.

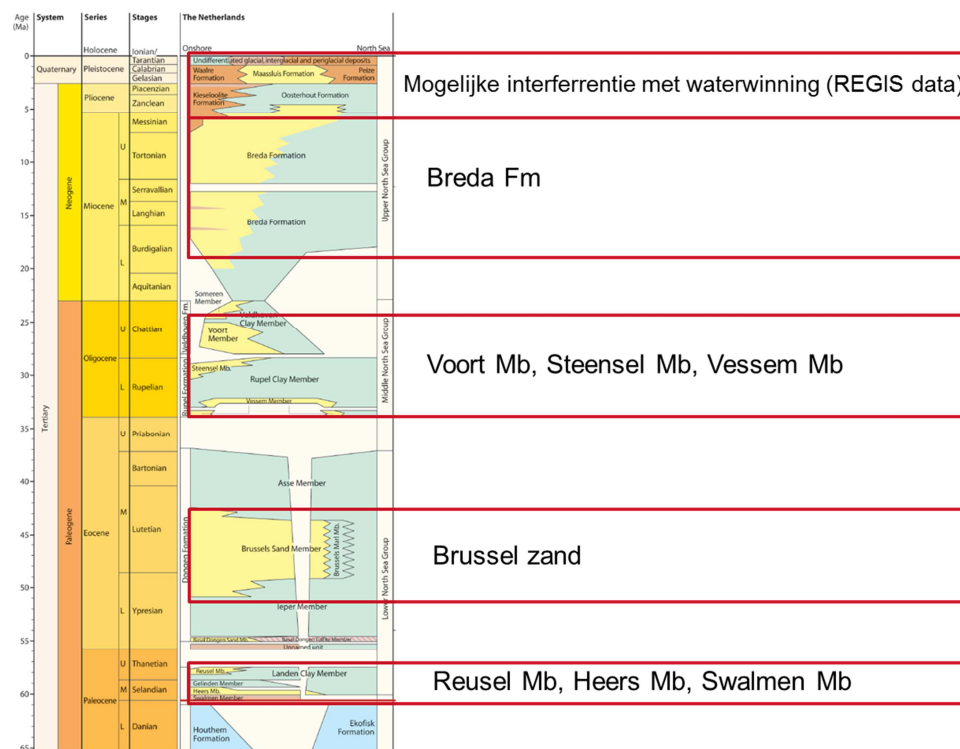
3.3 HTO Potentie kaarten

Voor de selectie van geschikte aquifers is uitsluitend gekeken naar de sedimenten uit de Noordzee Supergroep (Tertiair; Figuur 7). Geschikt geacht zijn de Maassluis (Figuur 9) en Oosterhout (Figuur 10) formaties in het ondiepste interval. In deze formaties kan interferentie met grondwaterwinning optreden van wege de geringe diepteligging. Ook de Breda formatie (Figuur 11) heeft goede potentie.

Voorts zijn geëvalueerd: de Voort, Steensel en Vessem members, het zand van Brussel en de Reusel, Heers en Swalmen members.

Van het zand van Brussel zijn helaas geen gegevens beschikbaar m.b.t. de stromingseigenschappen. Daarom is hiervan alleen een verbreidingskaart beschikbaar waar de aquifer aanwezig is, en mogelijk potentie heeft (Figuur 12).

Van de overige geëvalueerde zand members heeft alleen de Voort member (Figuur 13) enige potentie. Van de overige members is de transmissiviteit lager dan de minimale waarde van 100 Dm.



Figuur 7: Overzicht van aquifers uit de Noordzee Supergroep (Tertiair)

Het totaal aan potentiële gebieden is weergegeven in Figuur 14, waar ook de mogelijk geschikte gebieden aangegeven zijn. In deze gebieden zijn de Breda formatie en Zand van Brussel aanwezig, maar zijn er in beperkte mate stromingseigenschappen bekend. Nadere studie van de stromingseigenschappen kan in deze gebieden resulteren in een mogelijke HTO potentie.

5.2.8 References

- Drijver, B., Middelhoge en hoge temperatuur warmteopslag in de ondergrond (MTO en HTO), Presentatie, via http://www.energiek2020.nu/fileadmin/user_upload/energiek2020/docs/Presentaties/2012-10-02-Warmte_in_de_bodem-Benno_Drijver.pdf, visited 28-2-2013
- Drijver, B., 2012, Meer met Bodemenergie Hogetemperatuuropslag Kennisoverzicht en praktijkmetingen rondom hogetemperatuurwarmteopslagsystemen, Rapport 6 – Hogetemperatuuropslag Kennisoverzicht en praktijkmetingen rondom hogetemperatuuropslagsystemen, via http://www.meermetbodemenergie.nl/rokdownloads/upload_bestanden/rapport_ages/Rapport%206.pdf, bezocht 25-2-2013
- Hellebrand, K., R. Post, B. in 't Groen, 2012, Kansen voor ondiepe geothermie voor de glastuinbouw, via <http://www.tuinbouw.nl/sites/default/files/documenten/1-%20rapport%20ONDIEPE%20GEOTHERMIE.pdf>, bezocht 17-04-2013
- IFTechnology, 2012, Thermisch opslagrendement, Deelrapport Werkpakket III, via <http://www.soilpedia.nl/Bikiviki%20documenten/SKB%20Projecten/2068%20Hogetemperatuuropslag%20in%20de%20bodem/26.764%20HTO%20WP3%20Thermisch%20opslagrendement%202012.06.30.pdf>, bezocht 17-04-2013
- Provincie Zuid-Holland, 2012, Besluit van Gedeputeerde Staten van Zuid-Holland, Onderwerp van de vergunningaanvraag.
- Seibt, P., F. Kabus, Aquifer Thermal Energy Storage in Germany, presentation <http://www.os.is/gogn/flytja/JHS-Skjol/UNU%20Visiting%20Lecturers/PSLecture03.pdf>, bezocht 26-3-2013
- Sanner, B., K. Knoblich, 1999, Advantages and problems of high temperature underground thermal energy storage, Bulletin d'Hydroge'ologie No 17 (1999) Centre d'Hydrogdologie, Universite' de Neuchlitel, via <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/EGC/1999/Sanner.pdf>, visited 15-2-2013
- Sanner, B., F. Kabus, P. Seibt, J. Bartels, 2005, Underground Thermal Energy Storage for the German Parliament in Berlin, System Concept and Operational Experiences, via <http://sanner-geo.de/media/1438.pdf>, visited 26-3-2013
- Snijders, A.L. (2000). Lessons from 100 ATEs projects - The developments of aquifer storage in the Netherlands. Proceedings TERRASTOCK 2000, Stuttgart, Germany.