

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 Vandeweijer
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

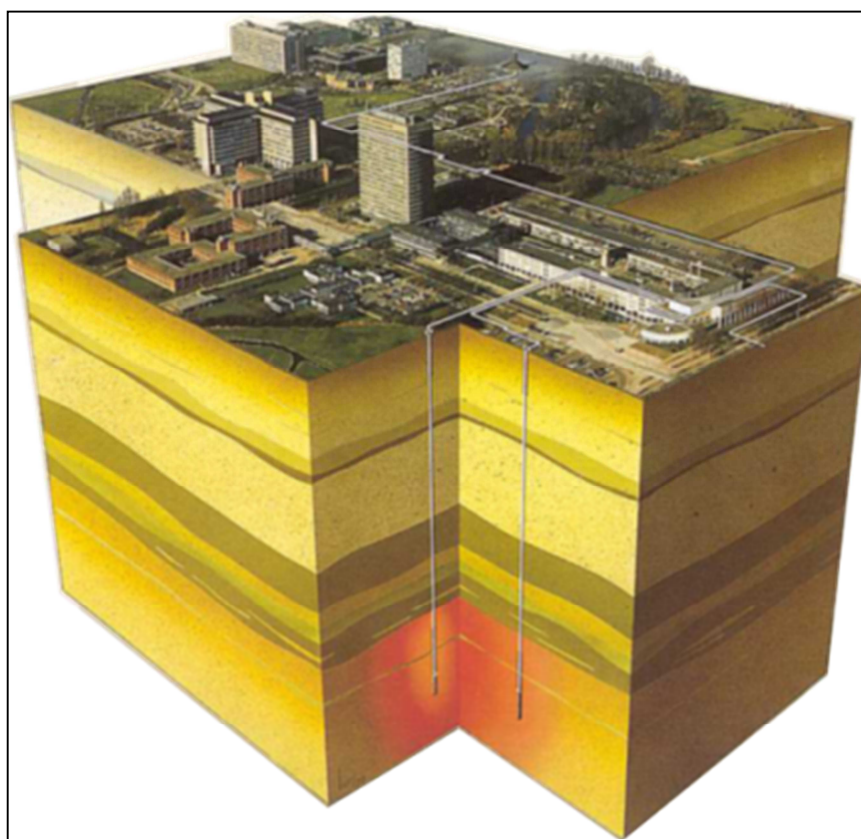
1 Inleiding

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 $8760 \text{ uur} / (1 + 1.33) = 3760$ 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 x $(1 + 1/0.75=2.34)$)
- Het benodigd pompvermogen (P_{pomp}) 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 $(T_{\text{prod}} - T_{\text{out}}) * C_p / (P_{\text{pomp}} * (1 + 1/0.75=2.34) / \text{Pompefficiëntie})$. 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

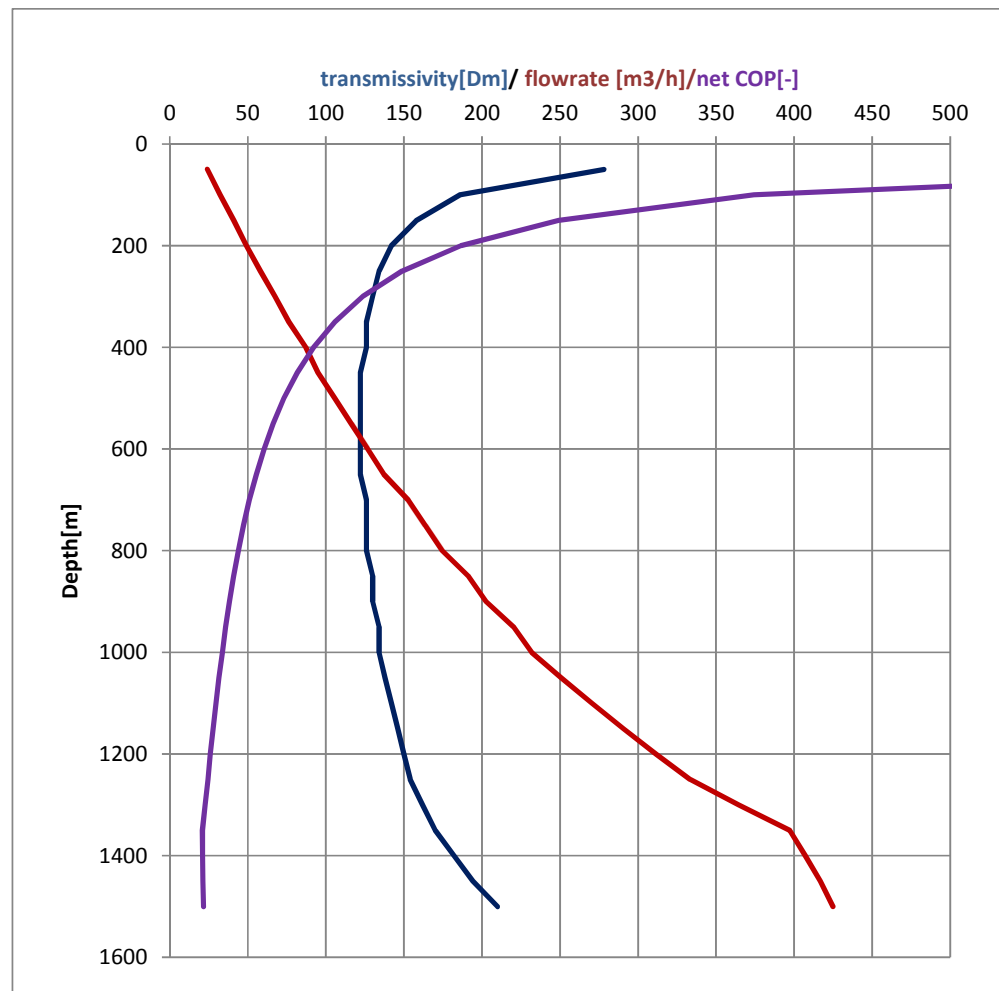
Parameter	
Maximaal toegestane LCOE [EUR/GJ]	6
Effectieve productie temperatuur [C]	70
Project duur [y]	15
Uitkoelingstemperatuur [C]	35
putkosten [EUR/m]	1000 ¹
Pomp investeringskosten	0.1
Pomp workover kosten/interval [mln/y]	0.1 per 5 jaar
Electriciteisprijs voor aandrijving van de pompen [EUR/MWhe]	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.



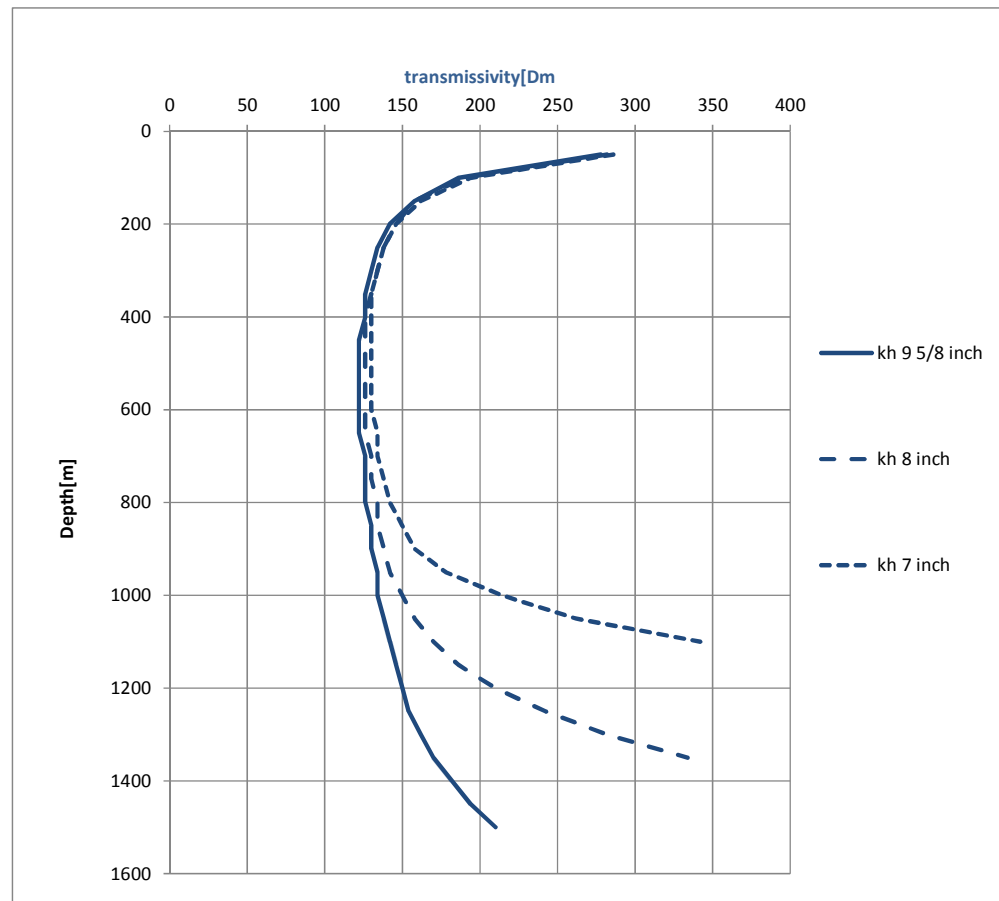
Figuur 2: Transmissiviteit (blauw), debiet (rood) en COP (paars) uitgezet tegen de diepte.

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)

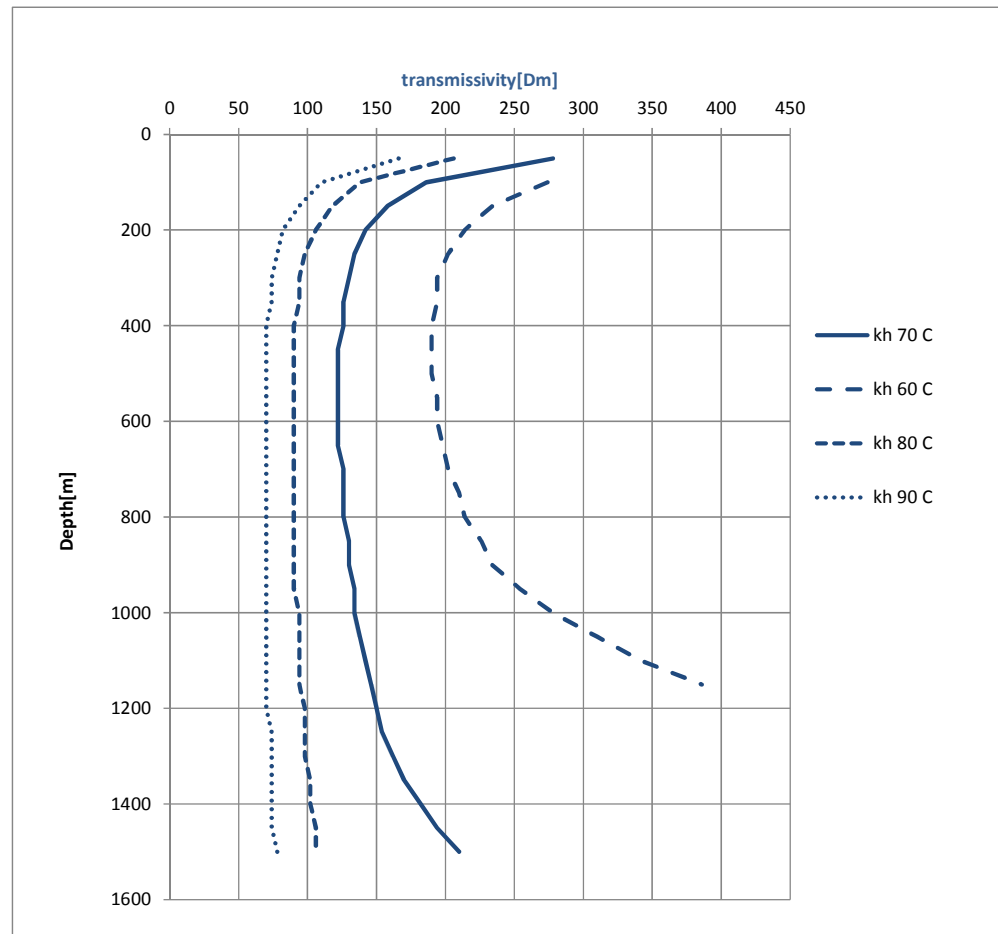
Figuren 3 tot en met 6 geven de resultaten van de gevoeligheidsanalyse. In elke figuur wordt de referentie case aangegeven met de doorgetrokken lijn, en de variatie in minimale transmissiviteit als gevolg van de gevoeligheidsanalyse in onderbroken lijnen.

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 m³/h) en grotere dieptes beperken kleinere putdiameters (7-8 inch) het systeem. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door hogere wrijvingsverliezen bij kleinere diameters.



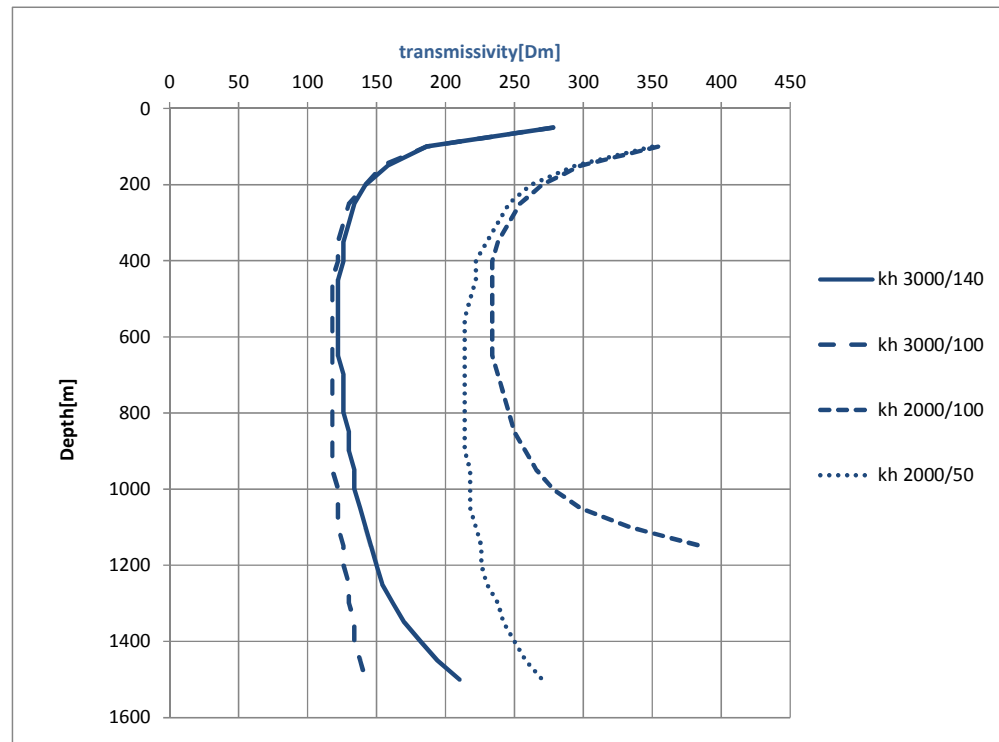
Figuur 3: Performance analyse met betrekking tot variatie in put diameter (7- 9 5/8 inch).

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 90C wordt de minimale transmissiviteit gereduceerd tot minder dan 70 Dm, vergeleken met een minimale transmissiviteit van 120 Dm bij 70C. Bij een opslagtemperatuur onder de 70C verslechtert de performance van het systeem aanzienlijk.



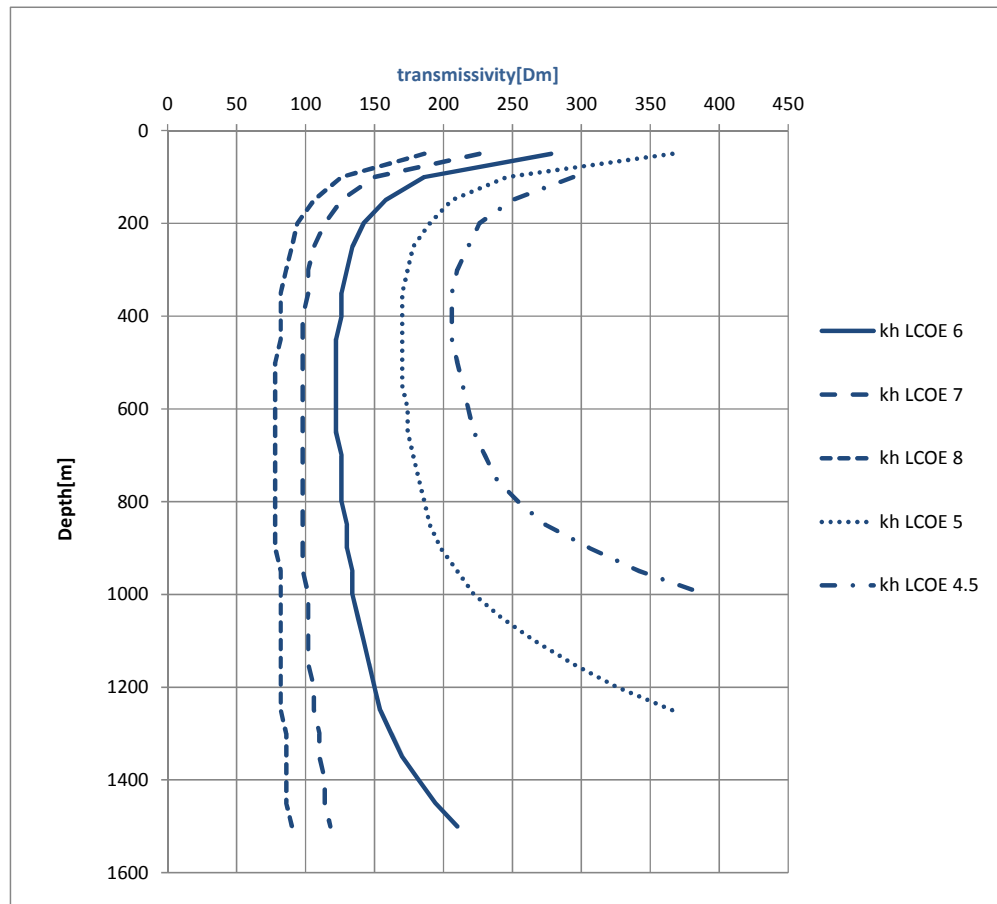
Figuur 4: Performance analyse met betrekking tot variatie temperatuur opslagwater (60-90C).

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) karterprogramma'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.

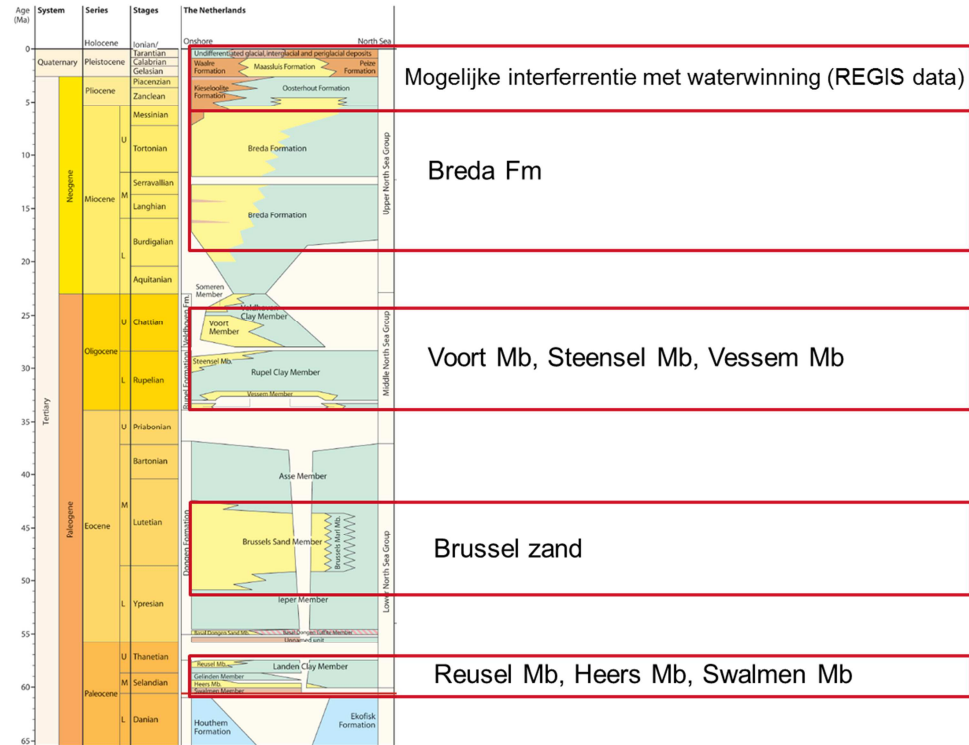
3.3 HTO Potentie kaarten

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.

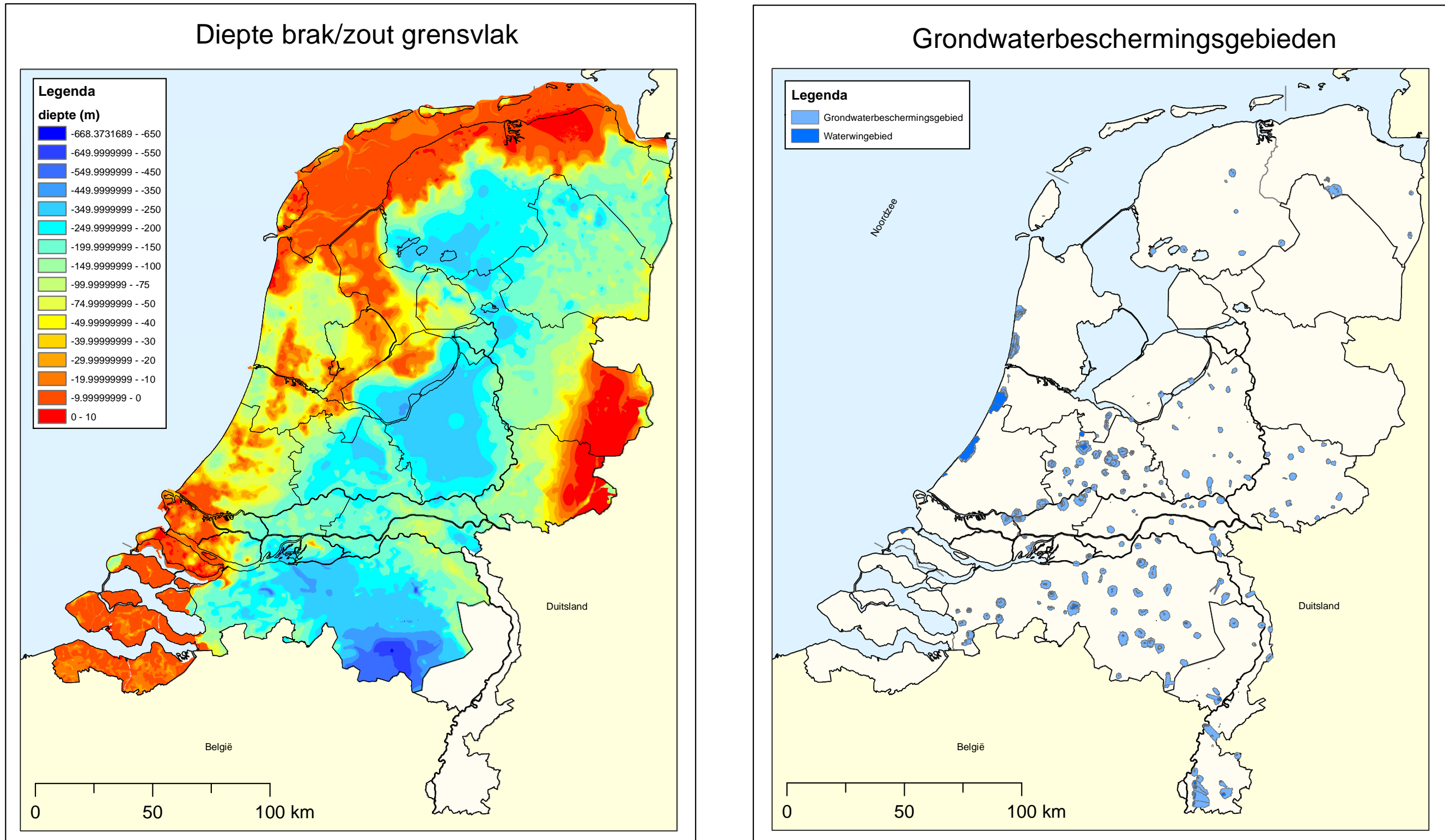
Van het zand van Brussel zijn helaas geen gegevens beschikbaar m.b.t. de stromingseigenschappen. Daarom is hiervan alleen een verbreidingskaart beschikbaar waar de aquifer aanwezig is, en mogelijk potentie heeft (Figuur 12).

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.

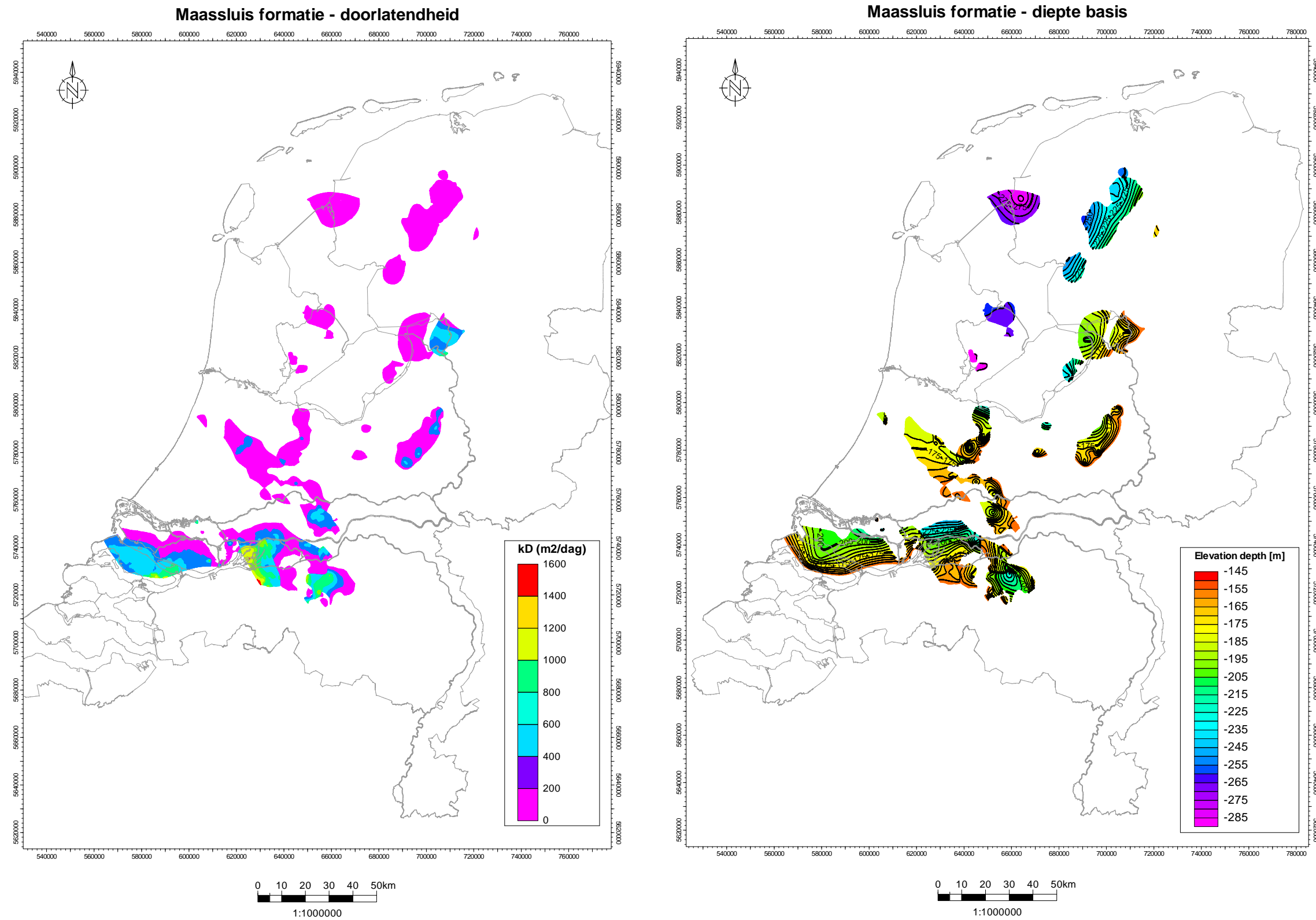


Figuur 7: Overzicht van aquifers uit de Noordzee Supergroep (Tertiair)

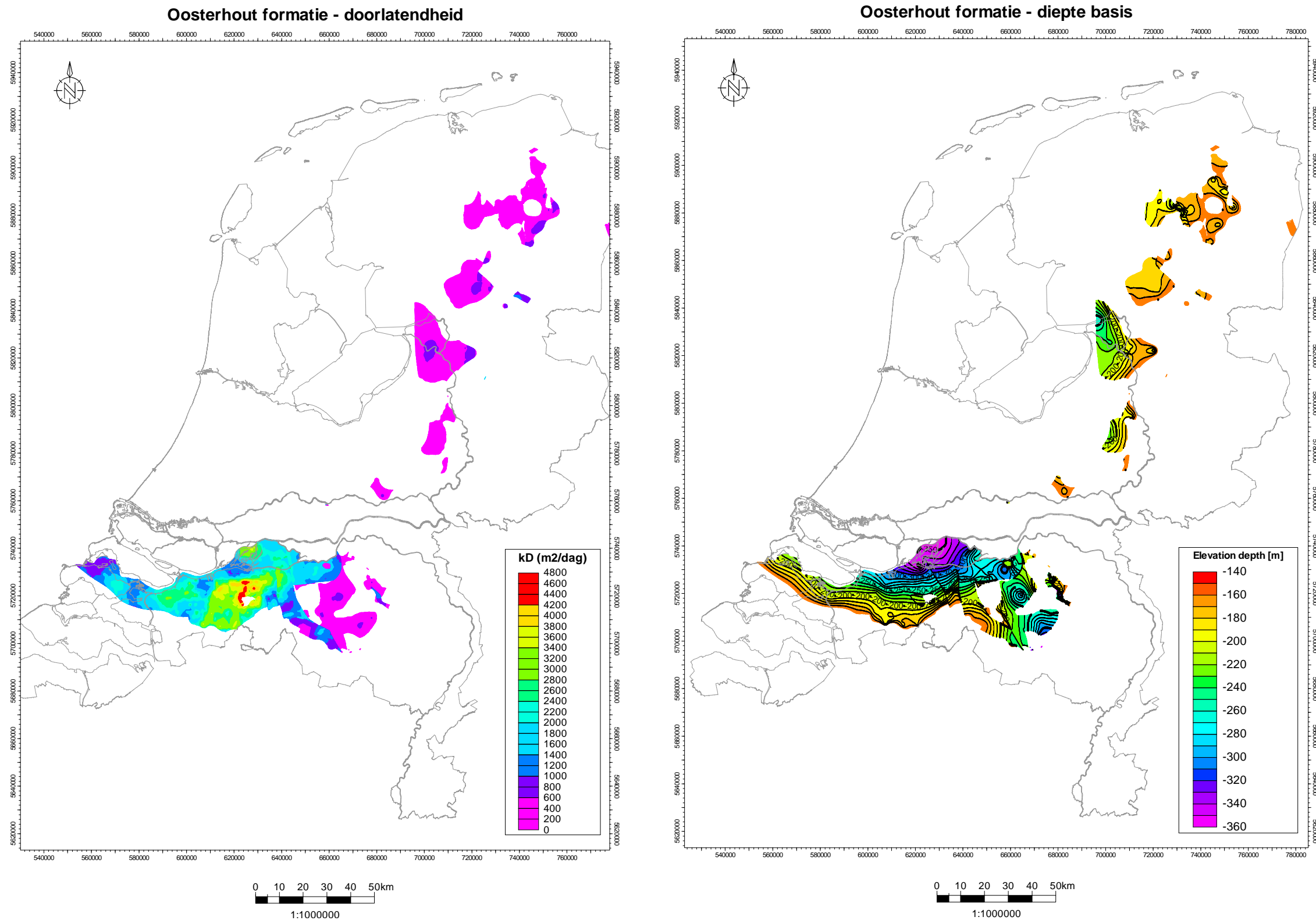
Het totaal aan potentiële gebieden is weergegeven in Figuur 14, waar ook de mogelijk geschikte gebieden aangegeven zijn. In deze gebieden zijn de Breda formatie en Zand van Brussel aanwezig, maar zijn er in beperkte mate stromingseigenschappen bekend. Nadere studie van de stromingseigenschappen kan in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



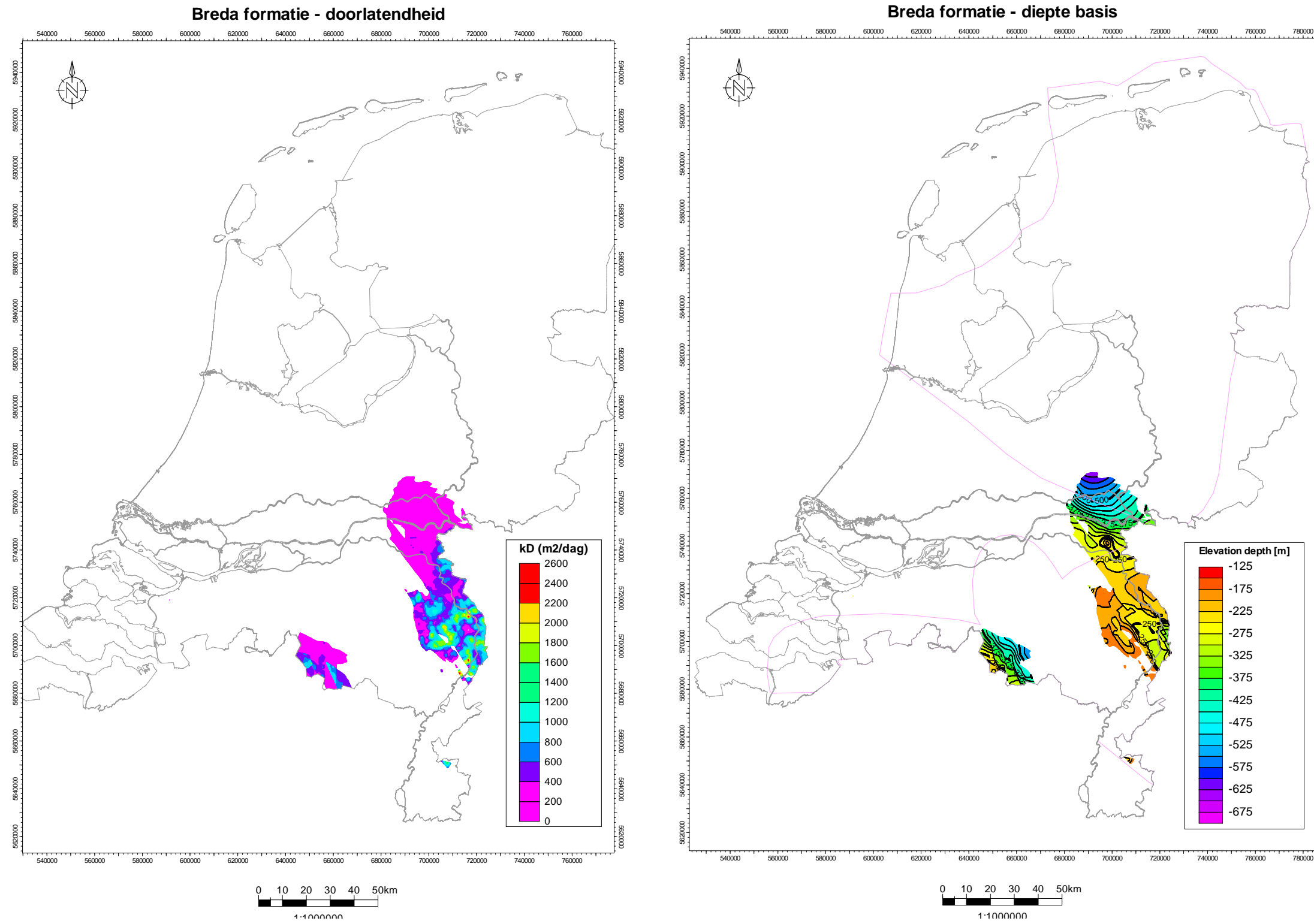
Figuur 8: Diepte van het brak/zout grensvlak (rechts) en grondwaterbeschermingsgebieden (links)



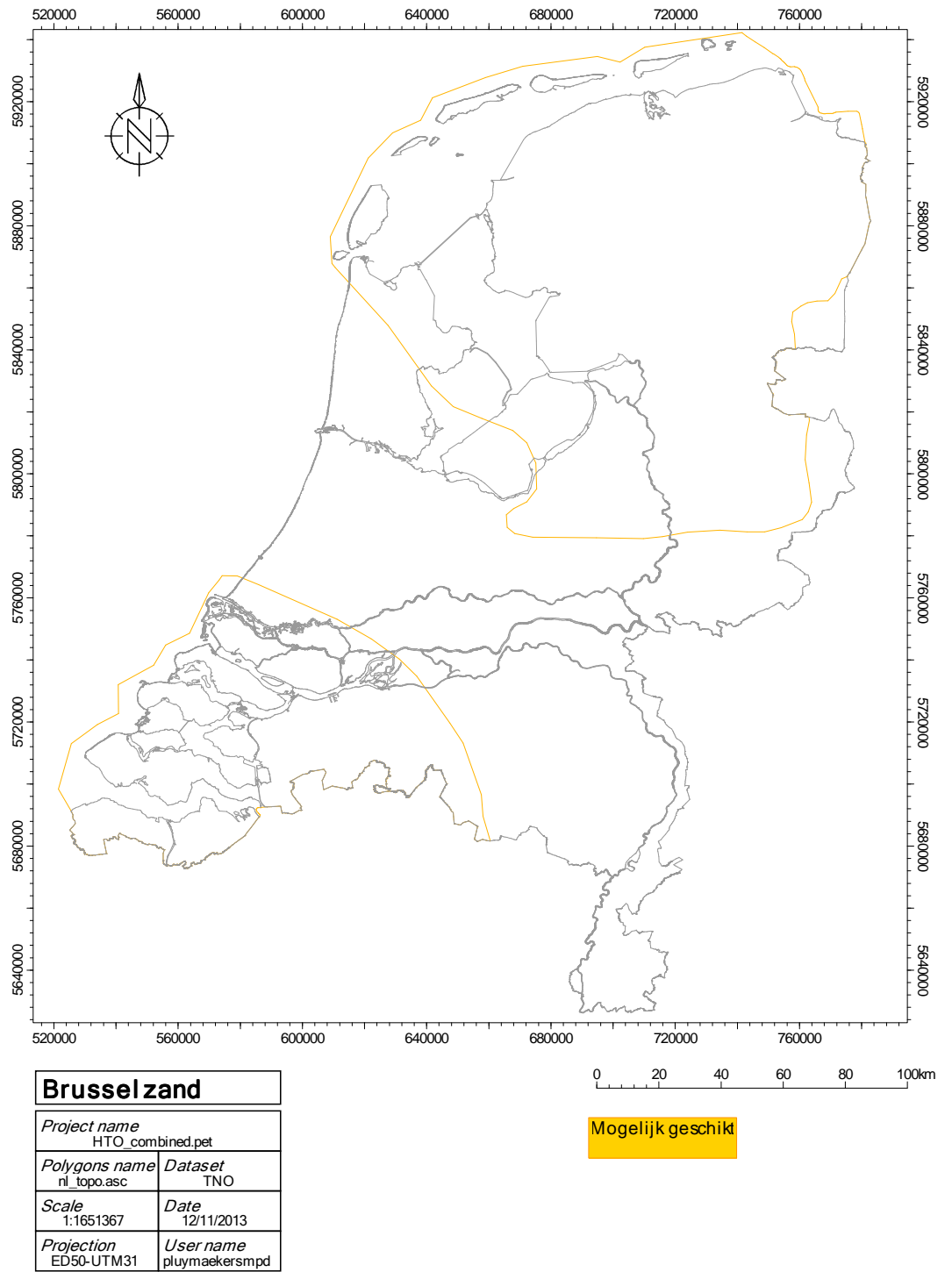
Figuur 9: Potentie Maassluis formatie



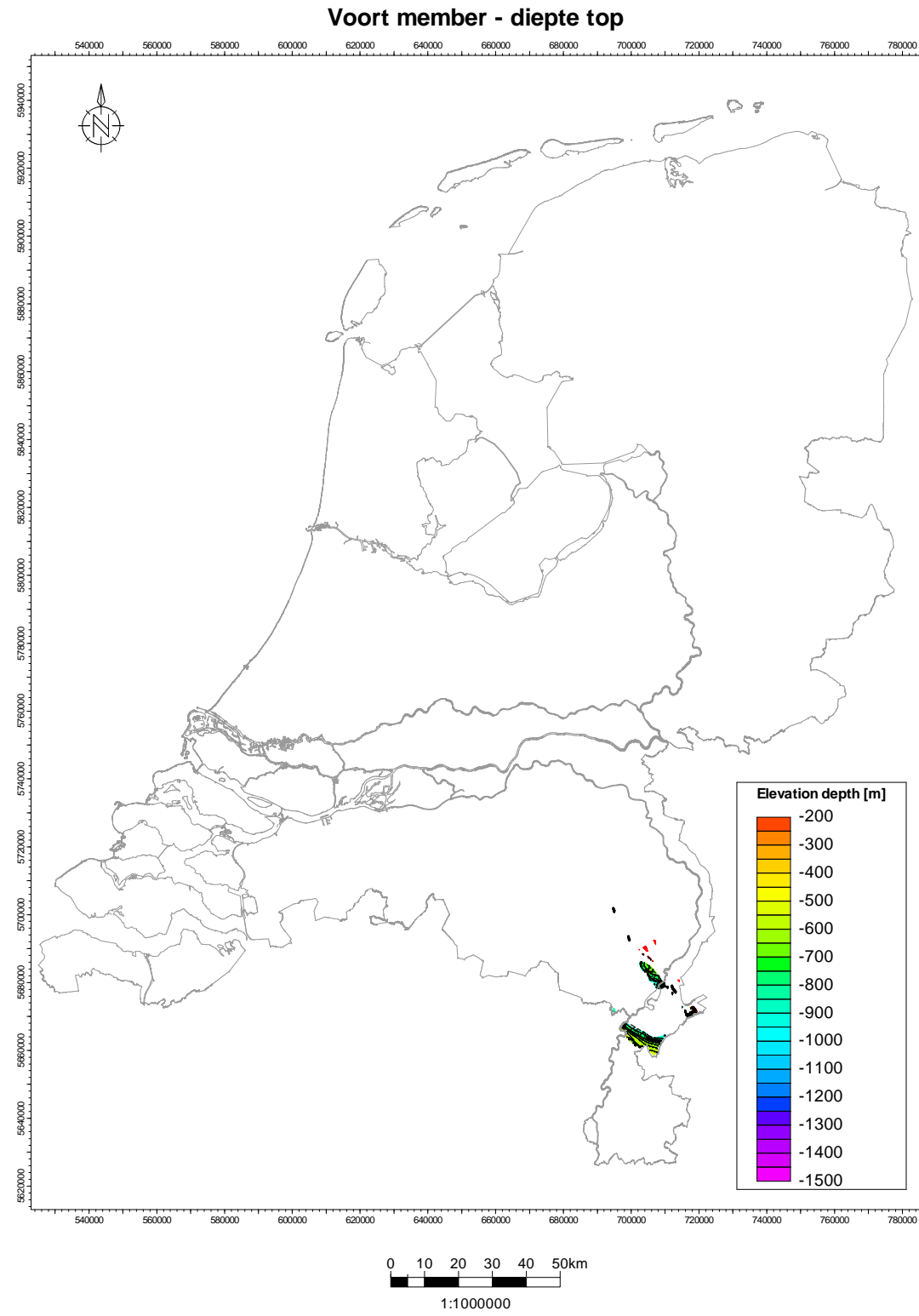
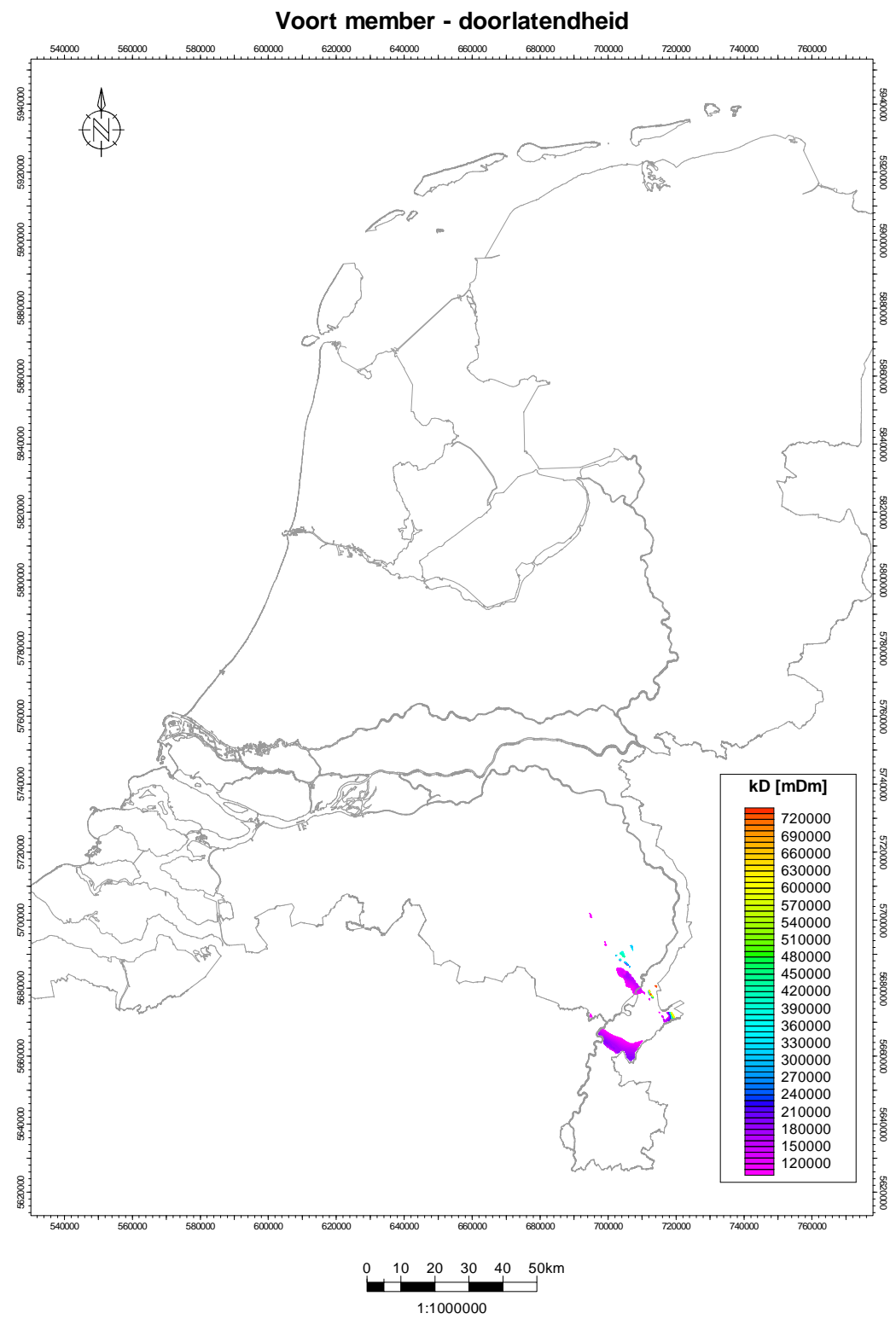
Figuur 10: Potentie Oosterhout formatie



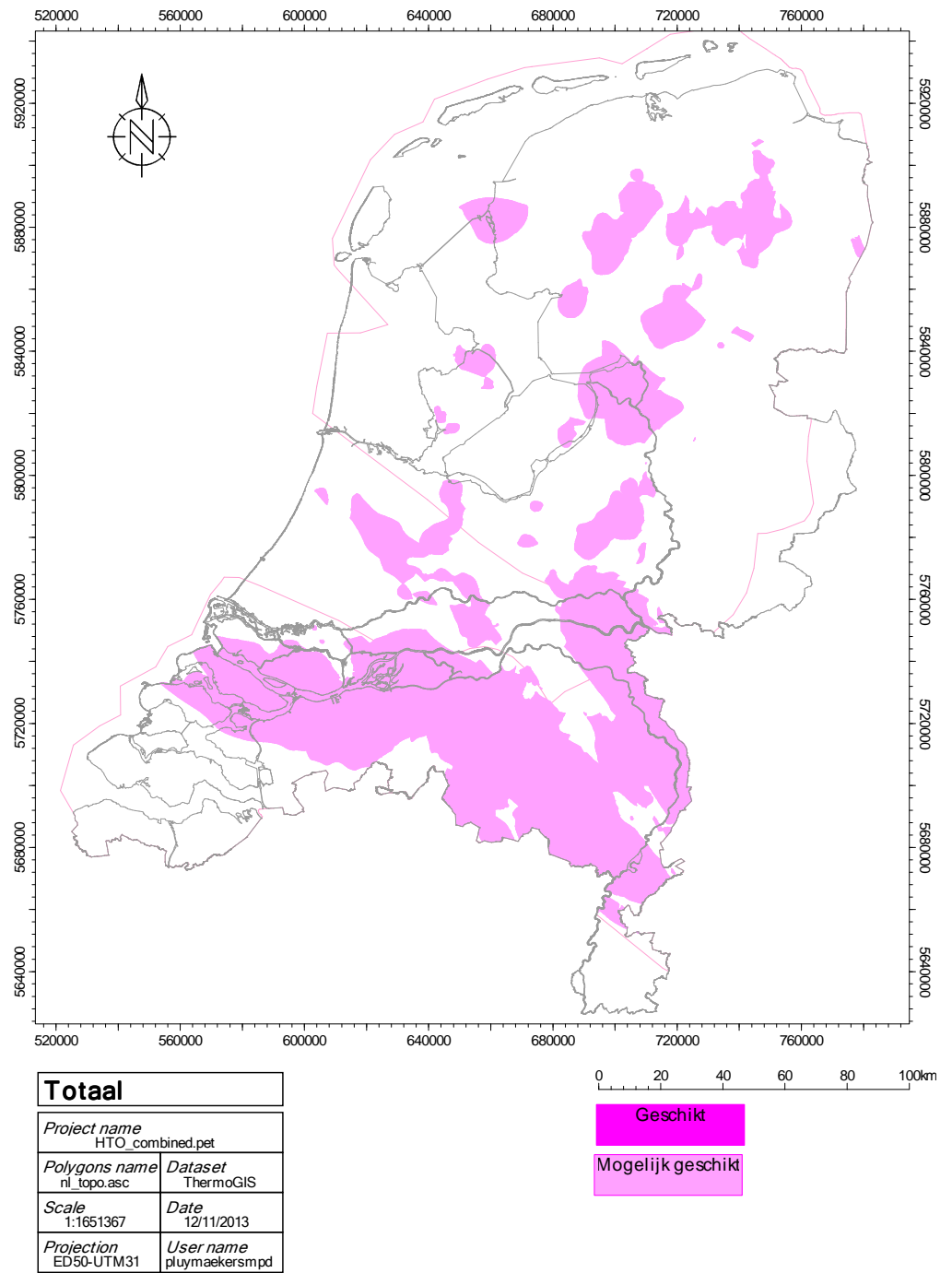
Figuur 11: Potentie Breda formatie. Roze gebieden op de rechter kaart geven gebieden met mogelijke potentie weer.



Figuur 12: Mogelijke potentie Zand van Brussel



Figuur 13: Potentie Voort member



Figuur 14: Totale HTO potentie

4 Kosten/baten analyses

4.1 Koekoekspolder

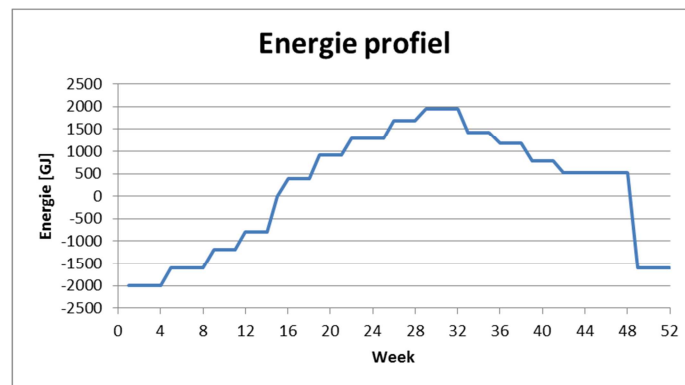
4.1.1 Beschrijving Business case

De business case betreft seizoenbuffering van het geothermisch doublet Koekoekspolder. In de zomer is er een warmte overschot, in de winter is er een warmte tekort. Door het overschot te bufferen in de zomer, kan dit in de winter terug gewonnen worden, waardoor er geen gas meer bijgestookt hoeft te worden om de piekbelasting op te vangen.

4.1.2 Randvoorwaarden HTO Koekoekspolder

Het water wordt aangeleverd met een temperatuur van 72 °C. Het warmte overschot is 35700 GJ en de vraag is 26800 GJ (zie Figuur 15).

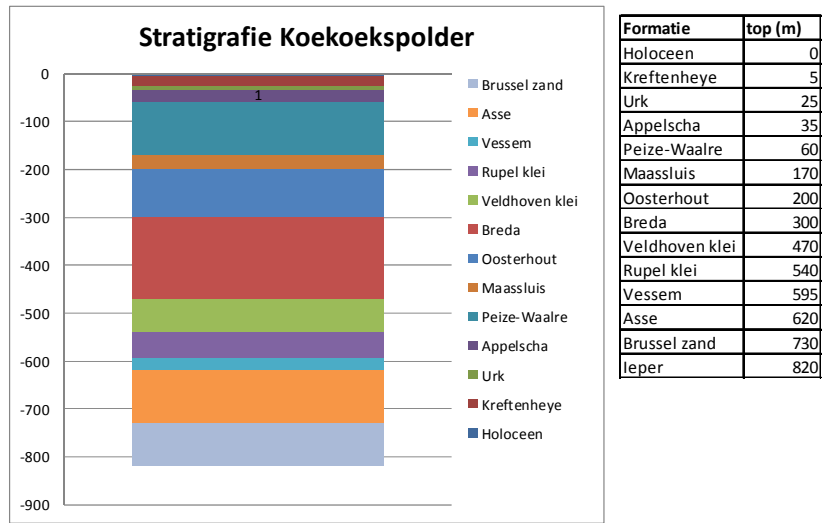
Aan het leveren van extra warmte (overschot) uit het geothermisch doublet zijn kosten verbonden. Bij een hoger debiet is het systeem minder efficiënt (COP van de pomp is ca. 7). De prijs voor het oppompen per extra geleverd GJ is ca. 3.14 euro. (na efficiëntie correctie is dit 4.19 EUR per teruggewonnen GJ)



Figuur 15: Energie vraag (negatief) en aanbod (positief) Koekoekspolder

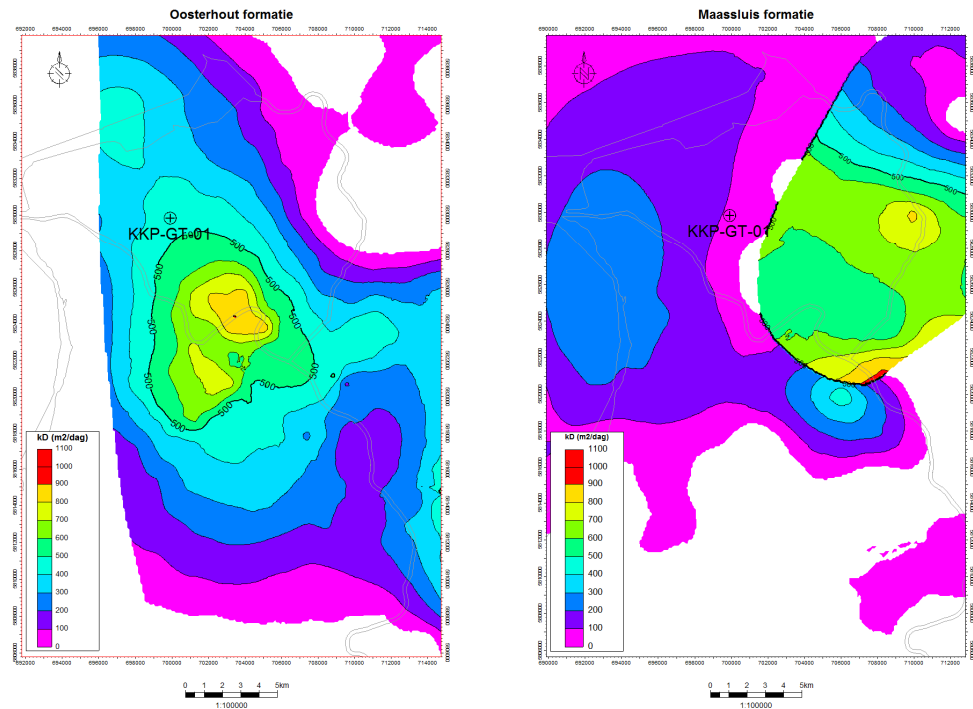
4.1.3 Ondergrond

Op basis van de ondergrondse inventarisatie komen 3 aquifer formaties in aanmerking voor HTO. Dit zijn de Maassluis formatie (ca. 170m), Oosterhout formatie (ca. 200m) en het Zand van Brussel (ca. 800m). De volledige stratigrafische onderverdeling (tot 820 m) in weergegeven in Figuur 16. De doorlatendheid van de Maassluis en Oosterhout formatie varieert tussen de 400 en 800 m²/dag (zie Figuur 17).



Figuur 16: Vereenvoudigde stratigrafie in de omgeving Koekoekspolder

Voor de business case wordt uitgegaan van een aquifer op 200m diepte met een doorlatendheid van 600m²/dag. Dit is equivalent met een doorlatendheid van 444 Dm (gecorrigeerd de dichtheid en saliniteit van het buffer water). Het maximale debiet wat behaald kan worden bij deze doorlatendheid met 2 Bar pomp druk (10% van reservoir druk) is 32 L/s (115 m³/h).



Figuur 17: Doorlatendheid van de Oosterhout en Maassluis formaties in de omgeving van Koekoekspolder.

Er zijn geen beperkingen m.b.t. grondwaterwinningsgebieden. Het grensvlak brak/zout water ligt op ca. 180 meter (varieert tussen 150 en 200m in de omgeving)

Het zand van Brussel heeft een gemiddelde doorlatendheid van 42 Dm. Bij een maximale pomp druk van 8 bar kan er maar een debiet van 12 L/s behaald worden. Gezien het beperkte debiet, en de hoge investeringskosten vanwege de diepte van de putten wordt het zand van Brussel verder buiten beschouwing gelaten.

4.1.4 Case specifieke aannames

De economische randvoorwaarden weergegeven in Tabel 2 zijn gebruikt voor de haalbaarheid berekeningen.

Er wordt een warmte verlies tijdens productie van 1°C verondersteld. Dit zijn de warmte verliezen in de productie buis. Verondersteld wordt dat er geen afkoeling in de ondergrond is tijdens de periode van opslag. Echter doordat het grensvlak tussen het aanwezige (koude) water en het geïnjecteerde (warme) water niet verticaal verloopt, maar met een zekere hellingshoek, kan er maar 75% van het geïnjecteerde water terug gewonnen. Om 26800 GJ aan energie terug te produceren moet er dus $26800 \cdot 133\% = 35700$ GJ geïnjecteerd worden.

Om aan de vraag van 26800 GJ per seizoen te voldoen is een gemiddeld productie debiet van 16.5 L/s bij een pomp druk van 1 Bar vereist.

Tabel 2: Economische randvoorwaarden

Parameter	Waarde
Project duur [y]	15
Putkosten [EUR/m]	1000 ²
Pomp investeringskosten [mln EUR]	0.1
Pomp workover kosten/interval [mln EUR/y]	0.1 per 5 jaar
Elektriciteitsprijs voor aandrijving van de pompen [EUR/MWhe]	80 ³
Effectieve Productie uren [h]	3000
Opslag uren [h]	4000
Warmtewisselaar investering [kEUR/MWth]	150
Warmtewisselaar fixed operating kosten [% van capex]	1%
Project financiering – rente op lening[%]	6%
Project financiering – return on investment [%]	15%
Project financiering – percentage eigenvermogen [%]	20%
Project financiering – duur lening [y]	15
Project financiering – afschrijvingsperiode voor belasting[y]	15

1 Resultaten

De resultaten van de techno economische doorrekening zijn weergegeven in Tabel 3. De kostprijs per geleverde GJ uit de buffer komt neer op 4.89 EUR. Dit is vergelijkbaar met de kosten voor een gasgestookte ketel (ca. 0.15 EUR per m3 gas equivalent). Echter, de extra kosten voor de levering van warmte van 4.19 EUR per

² Gebaseerd op put met een diameter van 9 5/8 inch

³ 22 EUR/GJ

geproduceerd GJ maakt de business case niet haalbaar. Totale kosten weergegeven als m3 gas equivalent komen dan uit op 0.28 EUR.

Tabel 3: Resultaten

Parameter	Waarde
Effectieve productie temperatuur [C]	71
Uitkoelingstemperatuur [C]	35
Debiet [L/s]	16.5
Jaarlijkse energie productie [GJ]	26800
Investing doublet [mln EUR]	0.5
Investing warmtewisselaar [mln EUR]	0.37
Jaarlijkse operationele kosten [kEUR]	10
Energie prijs geleverde warmte [EUR/GJ]	4.89
Energie prijs geleverde warmte [EUR/m3 gas equivalent]	0.15
Kosten extra geothermische productie [EUR/GJ]	4.19
Energie prijs incl. extra kosten [EUR/m3 gas equivalent]	0.28

4.1.5 Aanbevelingen

Er zijn een aantal mogelijkheden om de kostprijs per eenheid geleverde warmte te reduceren. Dit zijn vrij generieke oplossingen, maar geven een beeld van de gevoeligheid van het systeem.

1. Het verhogen van de buffer capaciteit. Bij injectie met het maximale debiet van 32 L/s wordt er 2x meer energie opgeslagen. De kostprijs zakt dan van 4.89 EUR/GJ naar 3.50 EUR/GJ.
2. Het verlagen van de investeringskosten. Hoewel de kosten voor boren, pomp en warmtewisselaar realistisch zijn ingeschat, heeft een verlaging van deze investeringskosten een direct positief effect op de kostprijs.

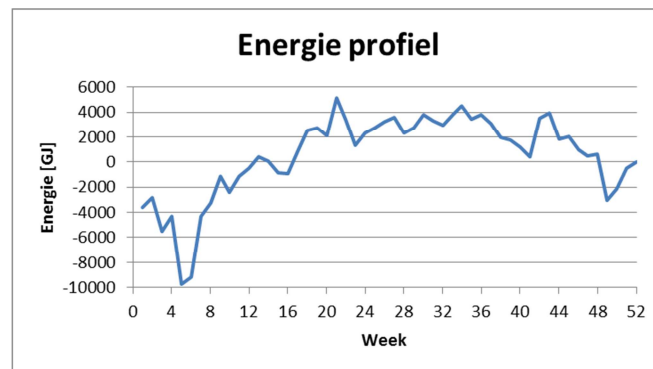
4.2 Bergerden

4.2.1 Beschrijving Business case

De business case betreft seizoenbuffering van de WKK installaties binnen cluster ECGE Bergerden. In de zomer is er een warmte overschot, in de winter is er een warmte tekort. Door het overschot te bufferen in de zomer, kan dit in de winter terug gewonnen worden.

4.2.2 Randvoorwaarden HTO Bergerden

Het water wordt aangeleverd met een temperatuur van 85 °C. Het jaarlijkse warmte overschot is 82600 GJ en de vraag is 55500 GJ (zie Figuur 18).



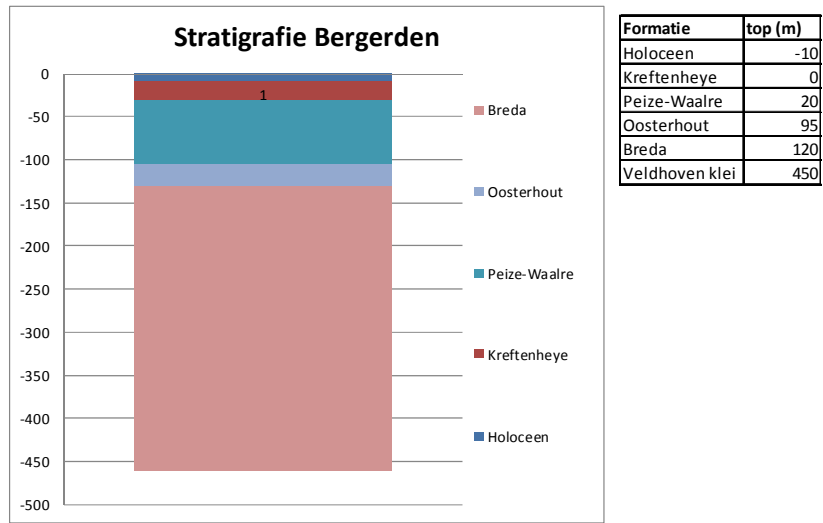
Figuur 18: Energie vraag (negatief) en aanbod (positief) Bergerden

4.2.3 Ondergrond

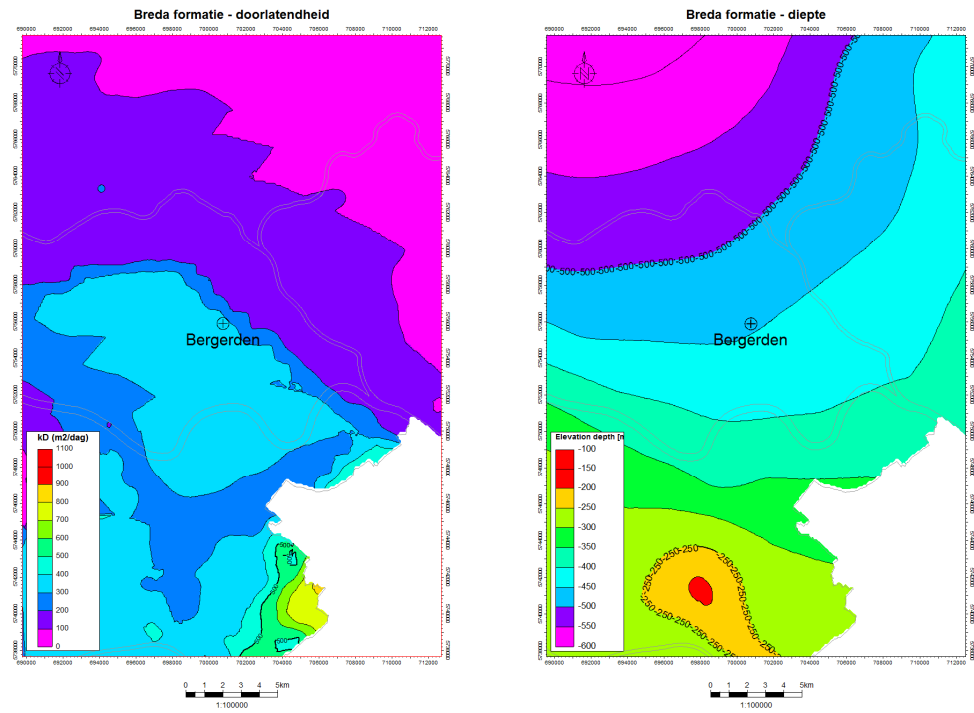
Op basis van de ondergrondse inventarisatie komt slechts de formatie van Breda in aanmerking voor HTO. Hoewel de Oosterhout formatie (ca. 95m) goede stromingseigenschappen heeft, bevindt deze zich ruim boven het brak/zout water grensvlak. De volledige stratigrafische onderverdeling (tot 450 m) is weergegeven in Figuur 19.

De basis van de Breda formatie ligt op ca. 450m diepte. De doorlatendheid van het zandpakket wordt geschat op 350 m²/dag (zie Figuur 20). Dit is equivalent met een doorlatendheid van 153 Dm (gecorrigeerd de dichtheid en saliniteit van het buffer water, in dit geval zoet water).

Het maximale debiet wat behaald kan worden bij deze doorlatendheid met 4.5 Bar pomp druk (10% van reservoir druk) is 42 L/s (150 m³/h).



Figuur 19: Stratigrafische onderverdeling regio Bergerdien



Figuur 20: Doorlatendheid en diepte van de Breda formatie in de omgeving van Bergerdien.

Er zijn geen beperkingen mbt grondwaterwinningsgebieden. Het grensvlak brak/zout water ligt op ca. 140 meter.

4.2.4 Case specifieke aannames

De economische randvoorwaarden weergegeven in Tabel 4 zijn gebruikt voor de haalbaarheid berekeningen.

Er wordt een warmte verlies tijdens productie van 1°C verondersteld. Dit zijn de warmte verliezen in de productie buis. Verondersteld wordt dat er geen afkoeling in de ondergrond is tijdens de periode van opslag. Echter doordat het grensvlak tussen het aanwezige (koude) water en het geïnjecteerde (warme) water niet verticaal verloopt, maar met een zekere hellingshoek, kan er maar 75% van het geïnjecteerde water terug gewonnen. Om 55500 GJ aan energie terug te produceren moet er dus $55500 \cdot 133\% = 74000$ GJ geïnjecteerd worden (82600 GJ is er beschikbaar).

Om aan de vraag van 55500 GJ per seizoen te voldoen is een gemiddeld productie debiet van 26 L/s bij een pomp druk van 2.8 Bar vereist.

Tabel 4: Economische randvoorwaarden

Parameter	Waarde
Project duur [y]	15
Putkosten [EUR/m]	1000 ⁴
Pomp investeringskosten [mln EUR]	0.1
Pomp workover kosten/interval [mln EUR/y]	0.1 per 5 jaar
Elektriciteitsprijs voor aandrijving van de pompen [EUR/MWhe]	50
Effectieve Productie uren [h]	2900
Opslag uren [h]	4866
Warmtewisselaar investering [kEUR/MWth]	150
Warmtewisselaar fixed operating kosten [% van capex]	1%
Project financiering – rente op lening[%]	6%
Project financiering – return on investment [%]	15%
Project financiering – percentage eigenvermogen [%]	20%
Project financiering – duur lening [y]	15
Project financiering – afschrijvingsperiode voor belasting[y]	15

4.2.5 Resultaten

De resultaten van de techno economische doorrekening zijn weergegeven in Tabel 5. De kostprijs per geleverde GJ uit de buffer komt neer op 4.59 EUR. Dit is lager dan de kosten voor een gasgestookte ketel (ca. 0.25 EUR per m3 gas equivalent). Totale kosten weergegeven als m3 gas equivalent komen dan uit op 0.14 EUR.

Tabel 5: Resultaten

Parameter	Waarde
Effectieve productie temperatuur [C]	84
Uitkoelingstemperatuur [C]	35
Debiet [L/s]	26
Jaarlijkse energie productie [GJ]	55600
Investering doublet [mln EUR]	1.0
Investering warmtewisselaar [mln EUR]	0.8
Jaarlijkse operationele kosten [kEUR]	21
Energie prijs geleverde warmte [EUR/GJ]	4.59
Energie prijs geleverde warmte [EUR/m3 gas equivalent]	0.14

⁴ Gebaseerd op put met een diameter van 9 5/8 inch

4.2.6 *Aanbevelingen*

Er zijn een aantal mogelijkheden om de kostprijs per eenheid geleverde warmte te reduceren. Dit zijn vrij generieke oplossingen, maar geven een beeld van de gevoeligheid van het systeem.

1. Het verhogen van de buffer capaciteit. Bij volledige inzet van het warmte overschot kan er 62000 GJ worden terug geproduceerd. Het gemiddelde debiet bedraagt dan 29 L/s. De kostprijs zakt dan van 4.59 EUR/GJ naar 4.32 EUR/GJ. De buffer capaciteit kan nog verder worden verhoogd (tot 42 L/s) bij een toename van vraag en aanbod (kostprijs 3.63 EUR/GJ).
2. Het verlagen van de investeringskosten, met name de boorkosten, de pompkosten en de warmtewisselaarkosten. Hoewel deze kosten realistisch zijn ingeschat, heeft een verlaging van deze investeringskosten een direct positief effect op de kostprijs.

5 Appendices

5.1 Appendix - Handleiding tool

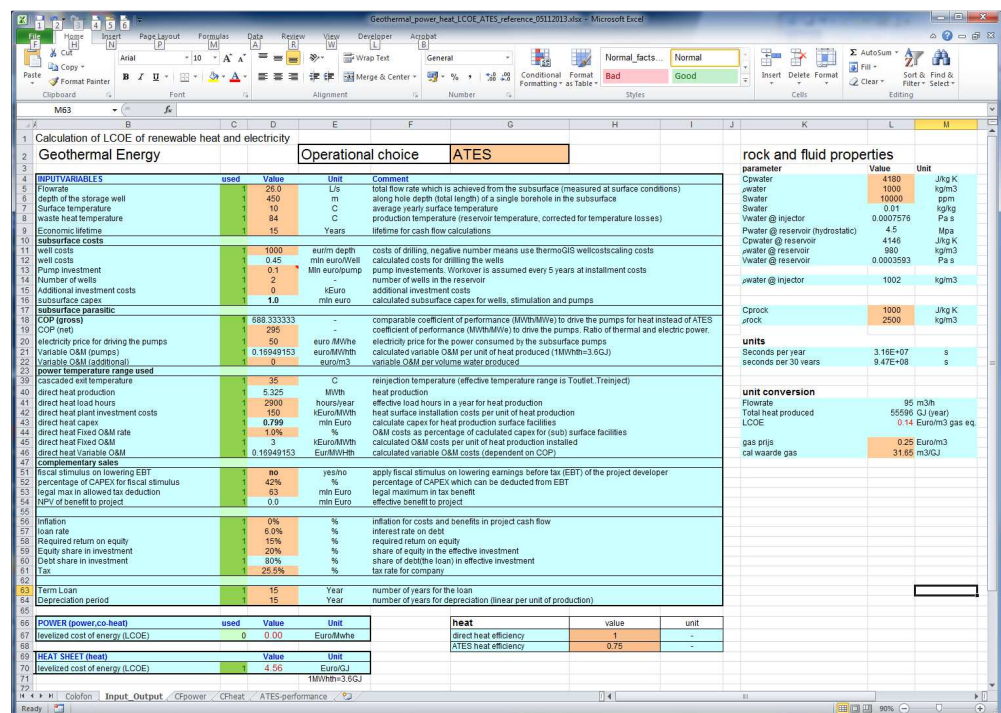
De HTO rekentool bestaat uit een MS Excel spreadsheet met de belangrijkste parameters voor een kosten-baten van analyse. In de spreadsheet wordt een berekening gemaakt van de kosten en baten over de projectduur, met als resultaat de *Levelized Cost of Energy* uitgedrukt in EUR/GJ. Deze berekening is gebaseerd op kostenberekeningen zoals die voor de SDE regeling zijn gemaakt door ECN.

De rekentool met onderstaande naam en versie wordt besproken:
Geothermal_power_heat_LCOE_ATES_reference_09122013.xlsx

Invoer parameters, samen met de uitvoer worden zijn weergegeven in het tabblad *Input_Output*.

Details betreffende de cashflow berekeningen kunnen worden ingezien in het tabblad *ICFheat*.

Het tabblad *ATES-performance* is een rekenhulp ten aanzien van de bepaling van het debiet op basis van ondergrondse parameters. Berekeningen in dit tabblad hebben geen invloed op de HTO kostenberekeningen.



Figuur 21: Input_Output tabblad HTO rekentool.

Input en Output

De vereiste input variabelen zijn aangegeven met oranje velden. Input waarden in de blauwe velden zijn berekende (afgeleide) waarden en mogen niet gewijzigd worden (zie Figuur 21 & Figuur 22). De vooraf ingevulde economische parameters zijn zorgvuldig en realistisch gekozen, maar kunnen gewijzigd worden voor specifieke business cases.

Calculation of LCOE of renewable heat and electricity			
Geothermal Energy		Operational	
INPUT VARIABLES	used	Value	Unit
Flowrate	1	26.0	L/s
depth of the storage well	1	450	m
Surface temperature	1	10	C
waste heat temperature	1	84	C
Economic lifetime	1	15	Years
subsurface costs			
well costs	1	1000	eur/m depth
well costs	1	0.45	mIn euro/Well
Pump investment	1	0.1	MIn euro/pump
Number of wells	1	2	-
Additional investment costs	1	0	kEuro
subsurface capex	1	1.0	mIn euro
subsurface parasitic			
COP (gross)	1	688.3333333	-
COP (net)	1	295	-
electricity price for driving the pumps	1	50	euro /MWhe
Variable O&M (pumps)	1	0.169491525	euro/MWth
Variable O&M (additional)	1	0	euro/m3
power temperature range used			
cascaded exit temperature	1	35	C
direct heat production	1	5.325	MWth
direct heat load hours	1	2900	hours/year
direct heat plant investment costs	1	150	kEuro/MWth
direct heat capex	1	0.799	mIn Euro
direct heat Fixed O&M rate	1	1.0%	%
direct heat Fixed O&M	1	3	kEuro/MWth
direct heat Variable O&M	1	0.169491525	Eur/MWth
fiscal stimulus			
fiscal stimulus on lowering EBT	1	no	yes/no
percentage of CAPEX for fiscal stimulus	1	42%	%
legal max in allowed tax deduction	1	63	mIn Euro
NPV of benefit to project	1	0.0	mIn Euro
Inflation	1	0%	%
loan rate	1	6.0%	%
Required return on equity	1	15%	%
Equity share in investment	1	20%	%
Debt share in investment	1	80%	%
Tax	1	25.5%	%
Term Loan	1	15	Year
Depreciation period	1	15	Year
POWER (power,co-heat)			
levelized cost of energy (LCOE)	0	0.00	Euro/Mwhe
HEAT SHEET (heat)			
levelized cost of energy (LCOE)	1	4.56	Euro/GJ
1MWth=3.6GJ			

Figuur 22: Detail Input_Output tabblad

Het eerste blok input variabelen betreft:

1. Flowrate (gemiddelde productie debiet van het systeem)
2. Depth of the storage well (aquifer diepte)
3. Surface temperature (oppervlakte temperatuur; niet van belang voor de berekingen)
4. Waste heat temperature (Temperatuur van het buffer water)

5. Economic lifetime (Geplande economische levensduur van het project)

Het 2^e blok betreft de investeringskosten mbt de ondergrond.

6. Well cost (Boorkosten per meter boordiepte)
7. Well cost (Totale kosten per put)
8. Pump investment (kosten voor een pomp, elke 5 jaar wordt de pomp vervangen)
9. Number of wells (Aantal putten; 2 voor een standaard doublet)
10. Additional investment cost (Additionele kosten voor R&D, vergunnings traject etc.)
11. Subsurface capex (Totale ondergrondse investering)

Het 3^e blok betreft operationele kosten mbt het ondergrondse systeem.

12. COP - gross (Bruto Coefficient Of Performance voor een HTO systeem)
13. COP - net (Netto COP, ratio tussen energie verbruik pomp en warmte productie; deze kan met behulp van het *ATES-performance* tabblad bepaald worden.
14. Electricity price for driving the pumps (Elektriciteitsprijs voor pompaandrijving)
15. Variable O&M - pumps (Totaal van variable kosten voor de pompaandrijving)
16. Variable O&M - additional (Additionele kosten per m3 geproduceerd water, bijvoorbeeld voor waterbehandeling)

Het 4^e blok betreft de kosten voor het bovengrondse systeem.

17. Cascaded exit temperature (Uitkoelingstemperatuur van de warmtewisselaar, welke terug geïnjecteerd wordt)
18. Direct heat production (vermogen van het systeem)
19. Direct heat load hours (Vollast draaiuren van het systeem)
20. Direct heat plant investment cost (Bovengrondse investeringskosten voor oa warmtewisselaar, leidingwerk, etc.)
21. Direct heat capex (Totale investeringskosten voor het bovengrondse systeem)
22. Direct heat fixed O&M rate (Operationele en onderhoudskosten van het bovengrondse systeem als percentage van de totale investering)
23. Direct heat fixed O&M (Totale jaarlijkse vaste operationele en onderhoudskosten van het bovengrondse systeem)
24. Direct heat variable O&M (Totaal jaarlijkse variabele operationele en onderhoudskosten van het ondergrondse systeem)

Het 5^e blok betreft de fiscale parameters

25. Fiscal stimulus on lowering EBT (Is de Energie Investerings Aftrek van toepassing op dit project?)
26. Percentage of CAPEX for fiscal stimulus (Percentage van de investering dat van toepassing is op de EIA regeling)
27. Legal max in allowed taks deduction (Maximum bedrag beschikbaar voor belasting reductie)
28. NPV of benefit to project (Effectieve bijdrage van de EIA op het project)
29. Inflation (Jaarlijkse inflatie)
30. Loan rate (Rente percentage lening)

31. Required return on equity (vereist rendement van het geïnvesteerde vermogen)
32. Equity share in investment (Percentage eigenvermogen tov de totale investering)
33. Debt share in investment (Percentage lening tov de totale investering)
34. Tax (Winst belasting)
35. Term loan (Periode waarvoor de lening aangegaan is)
36. Depreciation period (Economische afschrijvings periode)

Het resultaat van de kostenberekening is weergegeven als Levelized Cost Of Energy (LCOE) in EUR/GJ

Voor het gemak zijn nog een aantal kengetallen omgezet in verschillende eenheden (zie Figuur 23)

unit conversion	
Flowrate	95 m ³ /h
Total heat produced	55596 GJ (year)
LCOE	0.14 Euro/m ³ gas eq.
gas prijs	0.25 Euro/m ³
cal waarde gas	31.65 GJ/m ³

Figuur 23: Eenheid conversie van een aantal kengetallen

ATES-performance

De invoerwaarden voor debiet en COP kunnen in dit tabblad bepaald worden (Figuur 24).

Calculation of reservoir performance			
INPUTVARIABLES	Value	Unit	Comment
kH (Transmissivity)	153	Dm	
Pump pressure	2.80	Bar	Max 10% hydrostatic pressure
Well distance	1000	m	
Well diameter	9.625	inch	
Pipe roughness	1.38	milli inch	
Well skin	0	-	
Pomp efficiëntie	63%	%	63% (KEMA/SDE+)
Depth	450	m	Change in Input/Output sheet
Storage temperature	84	C	Change in Input/Output sheet
Reinjection temperature	35	C	Change in Input/Output sheet
RESULTS	Value	Unit	Comment
Flowrate	26.399	L/s	
COP	185.7	-	
Pressure loss pipe friction	0.093	Bar	
Temperature loss pipe	1.2	C	

Figuur 24: ATES-performance hulp berekeningen voor de bepaling van het debiet

Op basis van de invoerwaarden transmissiviteit en pompdruk wordt het debiet en bijhorende netto COP berekend. Put eigenschappen zoals diameter, ruwheid van de buis, en skin kunnen aangepast worden.

De invoer parameters voor diepte en temperatuur worden overgenomen uit het *Input_Output* tabblad.

Als aanvulling worden kengetallen berekend voor de druk en temperatuursverliezen in de buis tijdens productie.

Een extra rekenmodule is beschikbaar voor het omrekenen van transmissiviteit in m²/dag naar Darcy meter (Figuur 25). Deze omzetting is deels afhankelijk van de watereigenschappen zoals viscositeit en dichtheid.

Deze water eigenschappen worden berekend aan de hand van in de *Input_Output* aangegeven waarden voor saliniteit, temperatuur en druk.

WATER PROPERTIES	Value	Unit	Comment
Salinity	10000	ppm	Change in Input/Output sheet
Salinity	0.01	kg/kg	
Temperature	84	C	Change in Input/Output sheet
Pressure	4.50	Mpa	Hydrostatic
Density	980	kg/m ³	
Viscosity	0.0003593	m	
g	9.80665	m/s ²	
Hydraulic transmissivity	350	m ² /d	
kH	153.47596	Dm	

Translation from K to kappa:

$$K = \left[\frac{m}{s} \right] = [m^2] \cdot \frac{[kg/m^3] \cdot [m/s^2]}{[Pa \cdot s]}$$

With:

- K = hydraulic permeability in m/s
- κ = intrinsic permeability in m²
- ρ = fluid density in kg/m³
- μ = dynamic viscosity in Pa.s
- Pa = $\frac{kg \cdot (\frac{m}{s^2})}{m^2}$

g = 9.80665 m/s² for the Netherlands
for water next values are a good estimate:
ρ = 1000 kg/m³

Figuur 25: Omzetting van transmissiviteit van m²/dag naar Dm

5.2 Appendix - Overzicht literatuur onderzoek

5.2.1 *Terminologie van hoge temperatuur opslag volgens IEA [Sanner, et al., 1999]*

- UTES: Underground Thermal Energy Storage; elke opslag van warmte, koude of beide in de bestaande ondergrond (i.e. in gesteente, ondergrond, grondwater, cavernen, putten, etc.). Artificiële (gebouwde) structuren vallen hier niet onder, zoals tanks die worden begraven
- HT-UTES: High Temperature Underground Thermal Energy Storage: hieronder valt HTO en heeft betrekking op opslag met een minimum opslagtemperatuur van 50 °C.
- De opslag kan van korte duur zijn (zelfs een dag) of een seizoensopslag betreffen. Bij een seizoensopslag wordt uitgegaan van een opslagtermijn van ten minste 3 maanden na opslag.

5.2.2 *Voordelen [Drijver, 2012]*

- Bij opslag van warmte met een hoge temperatuur, kan de inzet van de warmtepomp worden beperkt of zelfs overbodig worden gemaakt. Zodoende kan de energiebesparing fors worden verbeterd ten opzichte van lage temperatuur WKO.
- Naast de energetische voordelen is ook het temperatuurverschil tussen de warme en de koude bron bij hoge temperatuur warmteopslag aanzienlijk groter dan bij lage temperatuur WKO, zodat bij eenzelfde waterverplaatsing veel meer energie kan worden geleverd.
- Als in de zomer bronnen van (rest)warmte beschikbaar zijn en in de winter de warmtevraag groter is dan het aanbod, dan kan hoge temperatuur warmteopslag interessant zijn. Vooral hoge temperatuur geproduceerd met schone bronnen, zoals geothermische warmte, heeft de voorkeur.

5.2.3 Toepassing in de praktijk [Drijver, 2012]

Tabel 6: Overzicht hoge temperatuur ATES systemen tot 1999

Jaar	naam/locatie	opmerkingen	waterbehandeling
1976	Auburn Univ. Aquifer Storage Field Experiment, Mobile Al., USA	experimenten met opslag restwarmte (37-88 °C) uit een elektriciteitscentrale, later uit een oliegestookte ketel, project afgesloten	filtering, later geen waterbehandeling gerapporteerd
1982	University of Minnesota ATES Field Test Facility, St. Paul, USA	experiment met een aantal cycli hoge temperatuur warmteopslag (89-131 °C), warmte uit stoom, project afgesloten	Ca-Na-ionenwisseling
1982	SPEOS, Lausanne-Dorigny, Zwitserland	experimenten met waterbehandelingsmethoden in combinatie met warmtelevering aan gebouwen, opslag 50-80 °C, project afgesloten	HCl-dosering en ontgassing, later wervelbed-warmte-wisselaar en andere methoden
1982	Hørsholm, Denemarken	experimenten met opslag 100 °C, warmtelevering aan stadsverwarming, warmte uit verbrandingsinstallatie, project afgesloten	HCl-dosering en ontgassing
1987	Le Plaisir, Thiverval-Grignon, Frankrijk	experimenten met zeer hoge temperatuur warmteopslag (55-180 °C), warmte uit verbrandingsinstallatie, project afgesloten	Ca-Na-ionenwisseling en toevoeging NaHSO ₃
1988	Lomma Pilot ATES Plant, Lomma, Zweden	klein experiment warmteopslag (37-82 °C) met betrekking tot chemie, mineraalneerslag en corrosie, project afgesloten	geen (onderzoek naar mineraalneerslag en corrosie)
1991	De Uithof, Universiteit Utrecht (NL)	restwarmte uit een WKK-installatie, opslag 90 °C, project afgesloten	Ca-Na-ionenwisseling
1998	Zorginstelling Hooge Burch, Zwammerdam (NL)	restwarmte uit een WKK-installatie, opslag 90 °C, project afgesloten	HCl-dosering
1998	Gebouw van de Rijksdag en kantoren, Berlijn, Duitsland	restwarmte uit een WKK-installatie (opslag 70 °C) aangesloten op groot distributienet, project nog actief	geen, systeem onder stikstofoverdruk

Voor zover bekend is er wereldwijd op dit moment (2013) één open hoge temperatuur warmteopslagsysteem actief: De Rijksdag in Berlijn (80 °C, >1200m diep).

5.2.4 Toepassing in Nederland

Utrecht en Zwammerdam

In Nederland zijn er in het verleden twee projecten met hoge opslag temperaturen (>80 °C) gerealiseerd, in Utrecht (~220m diep) en Zwammerdam (~150 m diep).

In Utrecht werd het systeem gebruikt om een teveel aan warmte vanuit de WKK installatie op te slaan en te gebruiken voor gebouwverwarming.

In Zwammerdam werd het systeem ingezet voor het verwarmen van een tehuis voor verstandelijk gehandicapten de Hooge Burch (Inmiddels heet de zorginstelling De Bruggen). De warmte werd geproduceerd door een WKK installatie.

Functionaliteit

Beide systemen zijn momenteel niet meer in gebruik. Technisch gezien hebben beide systemen grotendeels goed gefunctioneerd. De belangrijkste reden om de systemen te sluiten waren:

- Utrecht: geen goede afstemming van de installaties in het gebouw op de warmteopslag; de temperatuur van het water vanuit de gebouwen was te hoog. Hierdoor zijn de minimale vereisten voor de terugvoertemperaturen niet gehaald. De vraag naar lagere temperaturen bleek niet zo hoog te zijn als wel was voorzien. NB: het thermisch rendement van de opslag gedurende 2 jaar was wel hoog, nl. 68% en 80%. Het gemiddeld lage opslagrendement van 27% is dus het gevolg geweest van de (kwaliteit van de) warmtevraag uit het gebouw en niet van verliezen in de bodem. Het thermisch gedrag van de warmteopslag in de bodem heeft voldaan aan de verwachtingen.
- Zwammerdam: de warmteopslag is vanwege financiële redenen uit bedrijf genomen. De WKK wordt ingezet op basis van de elektriciteitsvraag dat tegen een gunstig tarief teruggeleverd wordt aan het net. De overtollige warmte die daarbij wordt geproduceerd wordt opgeslagen voor later gebruik. Uit monitoringgegevens is gebleken dat de terugleververgoeding voor de elektriciteitsproductie en de winst uit de warmteopslag financieel niet tegen elkaar hebben opgewogen. Daarom is besloten om de WKK in draaiuren terug te brengen en de warmteopslag niet meer in te zetten. Het opslagrendement van deze HTO installatie is berekend op circa 65%. Hierbij moet worden vermeld dat de warmteopslag een relatief kleine opslag betrof en dus meer hinder ondervond door verliezen in de bodem. Bij een grotere opslag wordt een hoger opslagrendement verwacht.

Gemeente Brielle

In het Zuid-Hollandse Vierpolders wordt momenteel een project voorbereid dat gebruik gaat maken van een geothermische bron, voor het verwarmen van een tiental glastuinbedrijven (~60 ha), en een seizoensopslag op diepte van 85 - 200 meter voor het overtollige geproduceerde warmte uit de bron. De planning is dat in 2014 het systeem in werking is. De infiltratietemperatuur van het warme water is in de zomer 84 °C in de warme bronnen en in de winter 43 °C in de koude bronnen. De maximale capaciteit is geraamd op 600 m³ per uur. Het grondwatersysteem bestaat uit 6 putten (3 doubletten). De afstand tussen de warme en koude bronnen bedraagt niet minder dan 100 meter. De bodemopbouw en geohydrologie is bekend en weergegeven in de vergunning.

Op dit moment zijn de volgende vergunningen aangevraagd:

- De omgevingsvergunning voor het aanleggen van de verhardingen ten tijde van het boren van de putten (EZ), met de Gemeente als adviseur en Welstand is betrokken geweest bij het ontwerp van het gebouw: toegekend.
- De watervergunning voor het realiseren en exploiteren van de seizoensopslag. toegekend
- Bestemmingsplanwijziging: nadat de Raad van State het ingediende beroep heeft afgewezen is ook het bestemmingsplan definitief vastgesteld.
- De WABO-vergunning voor het gebouw en de installaties die nodig zijn voor de warmtewinning en -distributie: nog niet toegekend

De vergunning is tijdelijke voor 6 jaar.

Voor het project wordt ondersteund door middel van subsidie van een aantal instanties en overheden, zoals de UKR en de Provincie Zuid-Holland, de regeling SEI. In de voorfase van het project is subsidie verkregen vanuit het "Europees Landbouwfonds voor Plattelandsontwikkeling" onder regeling SBI (Samenwerking bij Innovatie). Dit onder de noemer "Europees Landbouwfonds voor Plattelandsontwikkeling: "Europa investeert in zijn platteland".

5.2.5 *Problemen/aandachtspunten en mogelijke oplossingen*

Hoge temperatuur warmteopslagprojecten zijn technisch gezien complexer dan een lage temperatuur opslag. Sinds de jaren 80 zijn tijdens experimenten en

proefprojecten met hoge temperatuur warmteopslag vele problemen opgetreden en deze zijn de reden dat HTO systemen (nog) niet (veelvuldig) worden toegepast [Drijver, 2012; Sanner, 1999]:

Temperatuurveranderingen in de bodem [Drijver, 2012]

Eén van de belangrijkste aspecten die in de praktijk een rol spelen is in hoeverre de temperatuurveranderingen ook in bovenliggende watervoerende pakketten merkbaar zijn. Om overschrijding van de temperatuurgrens te voorkomen moet de dikte van de scheidende laag minimaal 20 à 30 m zijn. Een inventarisatie van uitgevoerde berekeningen in het kader van hoge temperatuur warmteopslagprojecten geeft aan dat ook de weerstand van de bovenliggende laag hierbij bepalend is. Voor een grootschalig project in de provincie Zuid-Holland (opslagtemperatuur 84 °C) is voor verschillende weerstandswaarden de temperatuur in het bovenliggende watervoerende pakket na 20 jaar warmteopslag berekend. De bovenliggende scheidende laag is in dit geval 45 m dik. Bij een (zeer lage) weerstandswaarde van 500 d zou de temperatuur oplopen naar ongeveer 40 °C en bij een weerstand van 2.500 d bleef de temperatuur net onder de 25 °C.

Geschikte watervoerende pakketten in Nederland [Drijver, 2012]

Doordat water met een hoge temperatuur een lagere dichtheid heeft dan het water in de gebruikte watervoerende pakketten, heeft het warme water de neiging om naar het bovenste deel van het watervoerende pakket te stromen. Dit proces kan grote nadelige gevolgen hebben voor het opslagrendement. De mate waarin dit proces optreedt, is vooral afhankelijk van de doorlatendheid van het gebruikte watervoerende pakket en het temperatuurverschil tussen het opgeslagen water en het omringende grondwater.

Het blijkt dat watervoerende pakketten geselecteerd moeten worden met een lage doorlatendheid. Nadeel van deze matig doorlatende watervoerende pakketten is dat de huidige ontwerpnormen lage debieten per bron aangeven, wat de economische haalbaarheid van projecten in deze watervoerende pakketten nadelig beïnvloedt. De vraag is echter in hoeverre de bestaande ontwerpnormen van toepassing zijn op dit type watervoerende pakketten en of dit perspectief biedt voor hogere debieten per bron.

In een afgerond SKB-onderzoek naar hoge temperatuur warmteopslag en ondiepe geothermie zijn de bodemlagen geïnventariseerd die in aanmerking komen voor ondiepe geothermie [Hellebrand, et al., 2012]. Uit dit onderzoek komen het Zand van Brussel en de Formaties van Breda, Oosterhout en Maassluis als meest interessante bodemlagen naar voren. Op de meeste locaties bevinden deze lagen zich tussen 150 en 1.000 m diepte. Hoewel de doorlatendheid van deze lagen meestal niet goed bekend is, is wel duidelijk dat de doorlatendheden relatief laag zijn in vergelijking met de ondieper gelegen watervoerende pakketten. De betreffende lagen zijn daardoor in potentie niet alleen geschikt voor ondiepe geothermie, maar ook voor hoge temperatuur warmteopslag. Vrijwel overal in Nederland zijn meerdere van deze bodemlagen aanwezig en zijn er dus mogelijkheden om hoge temperatuur warmteopslag toe te passen [Hellebrand, et al., 2012].

Het opslagrendement wordt bepaald door de warmteverliezen die optreden onder invloed van verschillende processen. Het gaat hierbij om warmtegeleiding, dispersie, grondwaterstroming en dichtheidsgedreven grondwaterstroming ('vrije convectie'). De relatieve grootte van de warmteverliezen door deze processen wordt bepaald door een aantal kenmerken van het hoge temperatuur warmteopslagsysteem (b.v. infiltratietemperatuur, opslagvolume en filterlengte) en door de eigenschappen van de ondergrond (b.v. dikte en permeabiliteit van het gebruikte watervoerende pakket en de eigenschappen van de scheidende lagen). Uit zowel de uitgevoerde literatuurstudie als de modelberekeningen bleek dat de factoren die invloed hebben op de dichtheidsstroming het meest bepalend zijn voor

het rendement bij hogetemperatuuropslag. De factoren die invloed hebben op de dichtheidsstroming zijn het meest bepalend zijn voor het rendement bij hogetemperatuuropslag [IFTTechnology, 2012].

Pakketten met een lage doorlatendheid hebben als nadeel dat de capaciteit per bron relatief laag zal zijn. Nader onderzoek naar ontwerpnormen voor slecht doorlatende watervoerende pakketten en de mogelijkheden om het debiet per put te verhogen is wenselijk.

Involed op de grondwaterkwaliteit [Drijver, 2012]

De hoge temperaturen van een HTO systeem hebben tot gevolg dat de effecten op de chemie en de microbiologie van het grondwater duidelijk groter zijn dan bij "lage temperatuur" WKO.

Chemie

Doordat de hogere temperatuur de oplosbaarheid van carbonaten verlaagt, zijn in veel gevallen maatregelen nodig (waterbehandeling) om putverstopping door neerslag van carbonaatmineralen tegen te gaan. Het uitgevoerde onderzoek geeft aan dat deze waterbehandeling nodig kan zijn bij temperaturen boven de 40 à 60 °C, afhankelijk van de waterkwaliteit. Ook de samenstelling van het kation uitwisselingscomplex wordt beïnvloed door de temperatuur. Bij een verhoging van de temperatuur neemt daardoor de concentratie van Ca^{2+} in het grondwater af en nemen de concentraties K^+ en NH_4^+ toe.

Een indirect gevolg van de hoge temperaturen kan zijn dat dieper grondwater wordt aangetrokken als gevolg van de veroorzaakte dichtheidsstroming. Invloed op de grondwaterkwaliteit kan dan optreden als het diepere grondwater een andere samenstelling heeft (bv. zouter is).

Het risico op carbonaatneerslag is afhankelijk van de kalkverzadigingsgraad van het oorspronkelijke grondwater, de mate waarin de temperatuur wordt verhoogd en de aanwezigheid en concentraties van stoffen die de neerslagreacties vertragen. Aangezien de aanwezigheid van kalkverzadigd grondwater in de meeste watervoerende pakketten in Nederland aannemelijk is en sprake is van opslag van warmte bij hoge temperaturen, is carbonaatneerslag in veel gevallen waarschijnlijk als geen tegenmaatregelen worden genomen. De volgende mogelijkheden kunnen overwogen worden om carbonaatneerslag te voorkomen;

- Waterbehandeling kan worden voorkomen door het temperatuurniveau van de opgeslagen warmte te verlagen. Het energierendement van het systeem verlaagd hierdoor en dit zal zodoende op basis van een afgewogen keuze actueel kunnen worden.
- In de praktijk is zoutzuurdosering een geschikte waterbehandelingstechniek gebleken. Door de zoutzuurdosering treedt een beperkte pHdaling op waardoor sporenelementen gemobiliseerd kunnen worden. De door zoutzuurtoevoeging veroorzaakte stijging van het zoutgehalte is bij toepassing in zout grondwater te verwaarlozen. Bij toepassing in zoet grondwater is significant. Voor toepassing in zoet grondwater kan het daarom interessant zijn om nader onderzoek te doen naar alternatieve waterbehandelingstechnieken (bv. inhibitors). Toevoegen van andere zuren, zoals HNO_3 , H_3PO_4 , of H_2SO_4 , moet worden vermeden omdat deze als voeding kunnen fungeren voor bacteriën.
- [Sanner, 1999; Drijver, 2011a]:
 - o Bij FeMn-scaling en gasverstopping moet het systeem onder druk worden gehouden,
 - o ontgassingsinstallaties (als deze inmiddels mogelijk zijn),
 - o toevoeging van CO_2 ,
 - o gebruik van fluidized bed heat exchanger

Microbiologie

De invloed van HTO op de microbiologische diversiteit is niet geheel duidelijk. De onderzoeken die zijn uitgevoerd betreffen temperaturen < 39 °C. Algemeen wordt in dit onderzoek uitgegaan van het niet mengen van grondwater met het geïnjecteerde water. Het wordt zelfs afgeraden om een HTO systeem toe te passen als de mogelijkheid bestaat dat de watersystemen met elkaar in aanraking kunnen komen en er zodoende interferentie ontstaat [Sanner, 1999]. Hierdoor wordt interferentie en beïnvloeding tegengegaan. Wel is er meer duidelijkheid nodig over de microbiologische verschuiving die bij de aanleg en gebruik van de systemen kunnen voorkomen.

Zettingen door temperatuurveranderingen [Drijver, 2012]

De hoge temperaturen kunnen enerzijds zorgen voor uitzetting van de opgewarmde bodemdeeltjes en anderzijds voor het versneld uitdrijven van poriewater uit slecht doorlatende lagen (thermische consolidatie). Voor zandlagen volgt uit de literatuur een procentuele volumetoename van ongeveer 0,002% per °C opwarming. Voor kleilagen is dit een volumeafname van ongeveer 0,02% per °C opwarming.

HTO wordt altijd toegepast onder een scheidende laag, omdat anders de warmte ongehinderd naar boven zal stromen en onacceptabele verliezen optreden. Dit betekent dat beide effecten altijd tegelijkertijd optreden. Uit de beschikbare praktijkgegevens blijkt dat deze effecten elkaar grotendeels opheffen, waardoor de netto invloed op funderingsniveau relatief klein is. Wel is het van belang om de te verwachten effecten per geval te bepalen en te beoordelen.

Thermische effecten [Drijver, 2012]

De hoge temperatuur warmteopslag (80 à 90 °C) in Zwammerdam is in 1998 in gebruik genomen. In 2003 is nog maar nauwelijks water verpompt en de daaropvolgende jaren is het systeem niet meer gebruikt. Van de eerste vier jaar zijn gegevens bekend over de onttrokken en geïnfilteerde waterhoeveelheden en de bijbehorende temperaturen. Ook zijn bodemtemperatuurmetingen uitgevoerd in drie meetputten, zowel in de eerste 4 jaren als recentelijk in het kader van Meer Met Bodemenergie (20 april 2011). Op basis van de beschikbare informatie is een thermisch model gemaakt en doorgerekend, zowel voor de eerste vier jaren als de daaropvolgende 96 jaar.

De metingen geven aan dat de temperatuur 8 jaar na stopzetting al is gedaald naar 28 °C. Volgens de berekeningen wijkt de temperatuur in de bodem circa 35 jaar na stopzetting niet meer dan 2 °C af en circa 70 jaar na stopzetting van de opslag niet meer dan 0,5 °C af van de natuurlijke grondwatertemperatuur.

Effecten waterbehandeling op waterkwaliteit [Drijver, 2012]

Tot op heden zijn (voor zover bekend) slechts twee waterbehandelingsmethoden toegepast op projectschaal, namelijk ionenwisseling (Universiteit Utrecht) en zoutzuurdosering (Zwammerdam). Ionenwisseling heeft echter een aantal belangrijke nadelen, het brengt een hoog zoutverbruik met zich mee, het is arbeidsintensief en er zijn verstoppingrisico's bij te veel en te weinig behandeling. In Zwammerdam is daarom gekozen voor zoutzuurdosering.

Met behulp van hydrochemische berekeningen is de invloed van de waterbehandeling bij Zwammerdam op de grondwaterkwaliteit berekend. Zoutzuur is weliswaar een agressieve stof, maar wordt in zeer lage concentraties toegevoegd (verdunding met een factor 5000). Hoewel zoutzuur geen natuurlijke stof is, komen zowel het zout (Cl⁻) als het zuur (H⁺) van nature in het grondwater voor: er is dus sprake van beïnvloeding van de natuurlijke concentraties. De berekeningen geven aan dat de pH-waarde daalt van 7,0 (natuurlijke pH-waarde) naar minimaal 6,6 (voor dosering) respectievelijk 6,2 (direct na dosering), wat goed overeen komt met de uitgevoerde metingen. Ter vergelijking: diep grondwater heeft meestal pH-waarden tussen 6 en 8. De beperkte pH-daling wordt veroorzaakt door de bufferende werking van de ionen in het grondwater, die bij zoutzuurdosering altijd aanwezig zullen in de vorm van carbonaat/bicarbonaat. De te verwachten pH-daling

zal daardoor ook in andere gevallen beperkt zijn. Desondanks kan de pH-daling gevolgen hebben voor de grondwaterkwaliteit door beïnvloeding van adsorptie/desorptie en het oplossen van mineralen die schadelijke sporenelementen bevatten. De metingen die in juni 2011 bij de hoge temperatuur warmteopslag in Zwammerdam zijn gedaan (ongeveer 8 jaar na stopzetting van de warmteopslag) geven aan dat de concentraties arseen, nikkel en zink in de warme bron verhoogd zijn ten opzichte van de koude bron en de referentieput. De drinkwaternorm wordt echter niet overschreden (het grondwater is overigens ook zout en daarom niet geschikt voor de drinkwatervoorziening). Deze verhoogde concentraties suggereren dat sprake is geweest van oplossing van pyriet onder invloed van de verlaagde pH als gevolg van de zuurdosering. De resultaten van kolomproeven door Bonte suggereren echter dat ook de verhoogde temperatuur hierbij een rol speelt (Bonte et al., 2011). Voor de monitoring van hoge temperatuur warmteopslagprojecten wordt daarom aanbevolen om deze parameters op te nemen in het monitoringsprogramma.

Het chloridegehalte van het grondwater neemt volgens de berekeningen toe van 3.900 mg/l (natuurlijke waarde) naar maximaal 4.100 mg/l op de lange termijn (direct na dosering): een stijging met 200 mg/l. De uitgevoerde metingen bevestigen dat in Zwammerdam geen noemenswaardig effect op het chloridegehalte is opgetreden. Het chloridegehalte van natuurlijk grondwater varieert meestal tussen 10 mg/l (zeer zoet) tot 20.000 mg/l (zeewater). Bij toepassing in zoet grondwater (chloridegehalte lager dan 150 mg/l) is de invloed van de zoutzuurdosering op het chloridegehalte dus groot: zoet grondwater wordt brak. Bij gebruik van zout grondwater (chloridegehalte hoger dan 1.000 mg/l) is de invloed klein: het zoute grondwater wordt slechts een fractie zouter. Voor zoet grondwater is onderzoek naar alternatieve waterbehandelingsmethoden daarom gewenst, waarbij het gebruik van inhibitoren het meest voor de hand ligt.

Als gevolg van zoutzuurdosering treedt dus een beperkte pHdaling op waardoor sporenelementen gemobiliseerd kunnen worden. De door zoutzuurtoevoeging veroorzaakte stijging van het zoutgehalte is bij toepassing in zout grondwater te verwaarlozen, maar bij toepassing in zoet grondwater significant.

Materiaalgebruik bij hoge temperaturen en corrosiegevoelige omstandigheden.

De materialen die bij lage temperatuuropslag worden toegepast (< 40 °C), zoals PVC, kunnen niet gebruikt worden bij de heersende temperaturen bij HTO. Corrosiebestendige materialen In eerdere HTO projecten (90 °C opslag) is gebruik gemaakt van de duurdere materialen RVS316 en GVK (Glasvezel Versterkt Kunststof). Deze materialen zijn economisch gezien minder aantrekkelijk voor kleinschalige projecten, waardoor in dat geval gekozen wordt voor lagere temperatuur opslag. Voor grootschalige projecten zijn hoge opslagtemperaturen eerder interessant, omdat de meerkosten die gekoppeld zijn aan de oplossingen van de problemen (groter aantal bronnen vanwege gebruik fijnzandige aquifers, waterbehandelingsvoorzieningen en duurdere materialen) sneller worden terugverdiend vanwege het hogere energierendement.

Juridisch kader.

Waterwet <500 meter [Drijver, 2012; IFTechnology 2012]

Tot 500 meter diepte voldoet het wettelijk kader van de Waterwet. HTO valt namelijk onder de term bodemenergie. Voor HTO is dus een vergunning benodigd als bedoeld in art. 6.4 van de Waterwet [IFTechnology, 2012].

Echter, in de Waterwet is een maximale infiltratietemperatuur van 25 °C vastgesteld, waar HTO (ver) boven ligt. Daarnaast kan HTO niet voldoen aan de in de Waterwet geëiste energiebalans, omdat zowel bij de "koude" als bij de warme bron sprake is van warmteverliezen.

Als aan deze instructievoorschriften wordt vastgehouden staat dat HTO in de weg. Van deze standaardvoorschriften kan wel, binnen de AMvB, onder omstandigheden

worden afgeweken. In de BesluitvormingsuitvoeringsMethode (BUM) provinciale taken is dit nader uitgewerkt. HTO lijkt nu alleen mogelijk door af te wijken van het beleid in de vorm van een pilot-project, waarbij extra eisen gesteld worden aan de monitoring van HTO systemen en/of worden pakketten gebruikt waarbij geen andere belangen, zoals drinkwater, aanwezig zijn. Per project zal een (integrale) afweging gemaakt moeten worden op basis van de voor- en nadelen. Een belangrijke reden om hoge temperatuur warmteopslag toch toe te staan zijn de kansen die deze techniek biedt op het gebied van energiebesparing [Drijver, 2012].

Uitkomsten van dergelijke pilots zijn van belang om meer kennis te verkrijgen de effecten van HTO, zoals de effecten van een opslagtemperatuur boven de 25 °C, (het monitoren van) de energiebalans en de retourtemperatuur en de effecten van het toevoegen van stoffen voor bijvoorbeeld waterbehandeling. Op basis van deze kennis kan het wettelijke kader uitgewerkt worden. Pilots met HTO vormen bouwstenen voor het ontwikkelen van beleid op het gebied van hoge temperatuur opslag [Provincie Zuid Holland, 2012].

Mijnbouwwet >500 meter

Vanaf 500 meter diepte is er meer onduidelijkheid over het juridisch kader van HTO. De criteria voor de vergunningverlening en de algemene regels voor opslag staan HTO vanaf 500 meter diepte niet in de weg. Ook worden geen beperkingen opgelegd door het wettelijk kader ten aanzien van belangrijke kenmerken van HTO zoals de hoge retourtemperatuur en het niet ontstaan van energiebalans. Wel lijken de eisen scherper te zijn dan voor HTO nodig is. Dit is in het algemeen begrijpelijk aangezien de algemene regels ontwikkeld zijn met het oog op andere technieken met (mogelijk) meer impact dan HTO. Momenteel kan dit echter wel een belemmering zijn voor de realisatie van HTO dieper dan 500 meter diepte. Wel kan gezegd worden dat de Mijnbouwwet momenteel voldoet en zal hieronder een opslagvergunning moeten worden aangevraagd. Bij het opslagplan zal de aandacht ook uit moeten gaan naar de mogelijke effecten van de eerste onttrekking.

Het afzwakken van de onnodig zware eisen en aanvullende eisen specifiek voor HTO zijn noodzakelijk in de komende discussie rondom de herziening van de Mijnbouwwet en de Omgevingswet.

Over het algemeen valt op te merken dat HTO niet voldoet aan de beleidsmatig vereiste energiebalans en maximale infiltratietemperatuur. Er kan niet worden voldaan aan de eis van een energiebalans omdat zowel de temperatuur van de warme bron als van de koude bron boven de natuurlijke grondwatertemperatuur ligt. Er is dus altijd sprake van netto warmteverlies. In de Grondwaterwet is de infiltratietemperatuur maximaal 25 °C . Dit is hoger dan toegestaan. Er bestaan overigens verschillen per provincie (tussen 25 en 30 °C). Daarnaast zijn de waterkwaliteitseffecten relatief groot, niet alleen door de grote temperatuurveranderingen, maar ook als gevolg van de noodzakelijke waterbehandeling.

Monitoren [Snijders, 1999]

Monitoren en evalueren is een belangrijk aspect bij HTO. Tijdens de operationele fase bleek dat het onduidelijk was of de systemen optimaal of minder dan optimaal functioneerden. Het doel van monitoren is om problemen vroegtijdig op te sporen in:

- design van het systeem
- constructie
- exploitatie
- optimalisatie van het systeem

Minimale monitoring vereisten betreffen monitoren in de oppervlakte installaties van:

- injectie en terugwinningstemperatuur

- waterstromen
- energiestromen

Een monitoring programma zal een vereiste zijn bij een HTO pilot project. In het voorgestelde HTO project in Zuid-Holland is de vergunning in het kader van de Waterwet afgegeven onder voorwaarde dat de volgende zaken worden gemonitord:

- a. *temperatuur*: mogelijke effecten van opslag van warmte in de ondergrond op circa 200 m beneden het maaiveld. In de eerstkomende 20 jaar na aanvang van de opslag van warmte in dit systeem mag niet leiden tot een temperatuur van meer dan 25 °C onderin het 1^e watervoerende pakket ter plaatse. Deze grens komt overeen met de bovengrens die landelijk wordt gehanteerd voor open bodemenergiesystemen in het 1^e watervoerende pakket.
- b. *energiebalans*: netto wordt meer 'warmte' geloosd in de bodem. Na beëindiging van de pilot en/of afbouw van de HTO moet er op termijn weer een temperatuur in het grondwater ontstaan, die - na een aantal jaren - gelijk zal zijn aan de oorspronkelijke temperatuur in de ondergrond. Op termijn moet worden gestreefd naar een evenwicht in de energiebalans tussen toevoer van warmte en onttrekking van warmte in de ondergrond.
- c. *grondwaterkwaliteit*: er geen onomkeerbare verandering van de (chemische) kwaliteit van het brakke grondwater in het beïnvloedingsgebied van de HTO op zal treden. Naar verwachting zal er door de forse temperatuurverhoging van het grondwater (van - aan het begin - circa 13 °C naar maximaal circa 80 °C bij het grondwater in de "warme" bron) op verschillende plaatsen in de ondergrond wel calcium in de vorm van CaCO₃ neerslaan. Ter voorkoming van mogelijke verstopping van leidingen in het systeem door deze kalkneerslag zal er echter regelmatig een - geringe - hoeveelheid zoutzuur (HCl) aan het te infiltreren (te retourneren) grondwater in de 'warme' bron worden toegevoegd. Daarmee wordt neerslag van calciumcarbonaat tegengegaan. Er treedt hierdoor echter wel enige toename in de concentratie van chlorideionen in het grondwater op. Deze toename zal echter gering (circa 10%) zijn ten opzichte van het chloridegehalte van het grondwater op 200 m diepte, waar dit water in wordt geloosd. Dat is een voorwaarde voor toepassing van HTO in de ondergrond waaraan naar verwachting zal worden voldaan. Door de temperatuurverhoging kunnen chemische evenwichten in de bodem verschuiven. Daarbij kunnen ook stoffen uit de bodem in oplossing komen en daarmee hogere concentraties in het grondwater voorkomen dan oorspronkelijk. Dit kan met name het geval zijn voor metalen en arseen.

In aanvulling is gebleken dat door de retournering van water met een temperatuur die veel hoger is dan in het grondwater ter hoogte van de lozing, er ook aan de bodem gebonden stoffen vrij kunnen komen in het grondwater. Daartoe kunnen onder andere ammonium, arseen, borium, sulfaat, lithium en andere metalen worden gerekend. Dit kan leiden tot een - naar verwachting geringe - verhoging van de concentratie van deze stoffen. In het grondwater op deze diepte. Deze stoffen zijn dan ook alle opgenomen in het monitoringprogramma voor dit project. Bij gemeten resultaten, die te veel afwijken ten opzichte van de verwachte ontwikkeling (zie hiervoor voorschrift 5.12d), biedt dit monitoringprogramma voldoende zekerheden om tijdig maatregelen te kunnen nemen om te grote negatieve effecten daarvan tijdig bij te kunnen sturen. De monitoring levert ook voldoende informatie op om de pilot, in het geval van een ontwikkeling die niet voldoende of niet tijdig genoeg bij kan worden gestuurd, te kunnen beëindigen.

- d. *microbiologische veranderingen*: het risico op het vrijkomen van - voor de mens - gevaarlijke micro-organismen tijdens uitvoering van de pilot naar verwachting erg gering is. Uit een speciaal door adviesbureau KRW opgestelde inventarisatie van de mogelijke effecten en risico's bleek, dat deze risico's erg klein zijn. Door een speciaal monitoringprogramma, dat gedurende de hele periode van uitvoering van de pilot wordt uitgevoerd, wordt de daadwerkelijke ontwikkeling van bepaalde microbiologische groepen nauwgezet gevolgd. Met

behulp van het monitoringprogramma worden de mogelijke effecten bewaakt van de pilot op de temperatuurontwikkeling, energiebalans, grondwaterkwaliteit en microbiologische processen in het bodemsysteem en in het grondwatersysteem."

Naast technische problemen worden ook economische randvoorwaarden tijdig gemeten in een monitoringprogramma. In het verleden is bij pilot projecten gebleken dat de berekende vraag naar energie niet overeenkwam met het werkelijke aanbod. Dit resulteerde in een afname van het opslagrendement. Voor een lange termijn duurzame prestatie van het HTO systeem met een zo hoog mogelijk opslagrendement moeten deze zaken gemonitord worden om vroegtijdig aanpassingen te kunnen doorvoeren.

Een monitoring periode moet op zijn minst 2 cycli van injectie en terugwinning omvatten. Uiteraard fungeert monitoren ook als een vroeg waarschuwingssysteem en kunnen problemen zoals putverstopping vroeg worden opgespoord [Sniijders, 1999].

Educatie [Sniijders, 1999]

Het is gebleken dat de gebruikers van de HTO systemen zelf veranderingen hebben doorgevoerd en dit niet hebben gecommuniceerd met de ontwerpers. Dit heeft wel positieve gevolgen gehad, vooral in Utrecht. Het is echter wel aan te raden om de gebruiker op te leiden en een goede communicatiebasis te creëren om gebruikersfouten tegen te gaan.

Economische aspecten

Bij een economische analyse zijn een aantal parameters van belang. Een eerste en korte weergave van de belangrijkste parameters die in overweging kunnen worden genomen:

- Exploratie
- Vergunningaanvraag
- Subsidies
- Exploitatie
 - o Warmtebron:
 - eventuele kosten voor aanpassing warmtebron. Deze kosten zullen gering zijn.
 - als de verhoging van de haalbaarheid van een geothermische bron doel is van een eventuele HTO, dan zal moeten worden bepaald in hoeverre dit inderdaad de haalbaarheid verbeterd.
 - o Opslagtemperatuur:
 - De keuze van de opslagtemperatuur hangt nauw samen met het temperatuurtraject van de afnemer. Het economische energetische optimum hangt af van het temperatuurniveau en zal moeten worden bepaald per project [Drijver, 2012].
 - o Opslagrendement
 - o Materiaalgebruik corrosiebestendig
 - o Transportafstand. De afstand tussen reservoir en aanbod cq. vraag:
 - kosten voor transport (pijpleiding);
 - warmteverliezen. Hoe groter de afstand, hoe groter de verliezen.
 - o Waterbehandeling
 - o Warmtepomp. In het geval er geen warmtepomp wordt ingezet zijn de kosten laag te houden. Dit is echter wel afhankelijk van:
 - de opslagtemperatuur van het water,
 - de reservoircondities (welk warmteverlies treedt op en dus welke temperatuur heeft het teruggeproduceerde water),
 - eventuele warmteverliezen door transport naar de afnemer, en,
 - de vraag naar een bepaalde temperatuur water.

- Afschrijving
- Verzekering
- Omgevingsfactoren
- Operationele en onderhoudskosten

Andere mogelijke technische problemen uit eerdere projecten [Sanner, 1999]:

- Controle systeem (in Utrecht later ge-upgraded door gebruiker)
- Deep shaft pumps (beter om submersible pompen te gebruiken)
- Frequency controllers with long cables (electromagnetisch geluid)
- Sensors (in particular flow meters)
- Connecties aan de oppervlakte (pijpleidingen)
- Problemen met de warmtepompen (e.g. in Lulea)
- Door hoge druk barsten van de afsluitende laag

5.2.6 Toepassing in Europa

Neubrandenburg

Momenteel is 1 project in werking in Europa. Dit betreft een opslag op de locatie van het Reichstag-gebouw in Berlijn. Bij dit project wordt een ondiepe aquifer voor koelingsdoeleinden ingezet, en een diepere (1300 m) opslag van heetwater (80 °C). Dit project is tot op heden in werking. De volgende tabel geeft de belangrijkste condities weer van de opslag.

Tabel 7: Condities van HTO in Neubrandenburg [Sanner, et al, 2005]

<u>Naam</u>	<u>Neubrandenburg</u>
Geologische formatie	Bovenste Postera zandsteen (by thick layer Rupelton)
Diepte	1,228 m – 1,268 m
Reservoir temperatuur	55 °C
Mineralisatie	135 g/l
Porositeit	26.6 %
Permeabiliteit	0.94 μm^2 – 2.8 μm^2
Aantal putten	2
Interne afstand	1,300 m
Productie and injectie flow rate	100 m ³ /h
Injectie temperatuur	80 °C
Productietemperatuur (5de jaar):	78 °C – 72 °C

Problemen

Putten

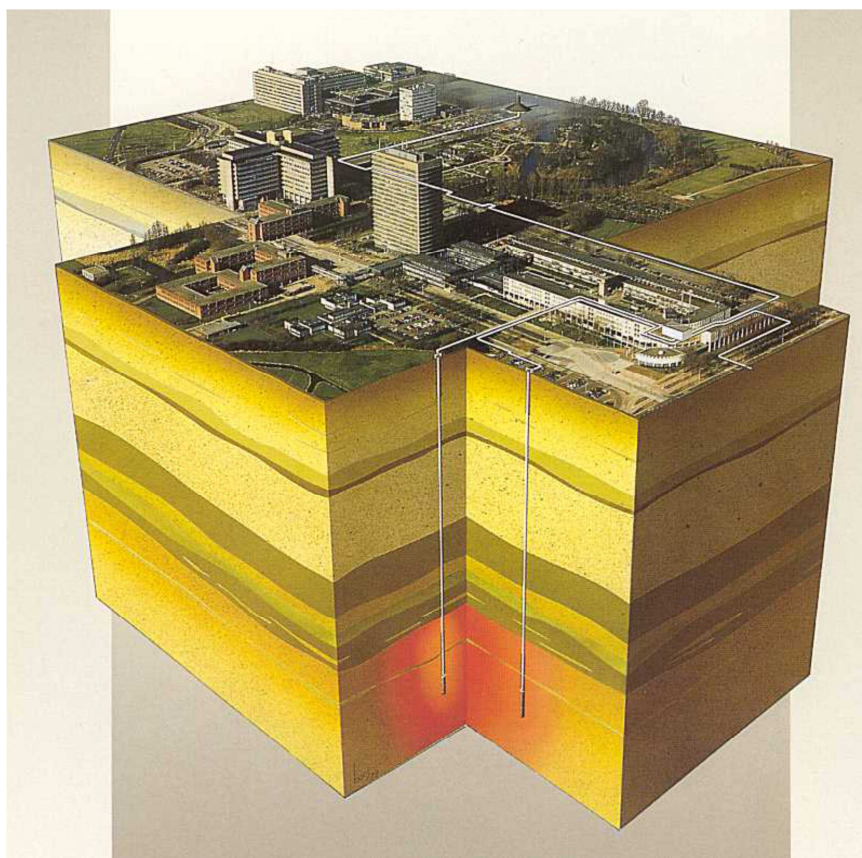
- Because of the salinity of the water in the heat storage ATES, and because of the higher temperatures in that circuit, the piping is made of glass-fibre-reinforced resins [Sanner, et al, 2005]
- To avoid clogging: always keep the piping under pressure at any time, and prevent oxygen from entering the groundwater. Even inside the wells a cushion of nitrogen is maintained on top of the water level to keep oxygen out. [Sanner, et al, 2005]

5.2.7 Afgesloten HTO projecten

Utrecht Uithof

Tabel 8: Conditie van HTO in Utrecht, Uithof [Drijver, 2012]

Naam	Utrecht Uithof
Diepte	220 m – 260 m
Reservoir temperatuur	55 °C
Mineralisatie	135 g/l
Porositeit	26.6 %
Permeabiliteit	0.94 μm^2 – 2.8 μm^2
Aantal putten	2
Interne afstand	1,300 m
Productie and injectie flow rate	100 m ³ /h
Injectie temperatuur	90 °C
Productietemperatuur (5de jaar):	78 °C – 72 °C
Warmtebron	WKK
Opslagvermogen	6 MWt
Opslaghoeveelheid	6.000 MWht/jaar – 21.600 GJ
Opslagrendement	27%
Waterbehandeling	Ca/Na ionenwisseling



Figuur 26: Impressie warmteopslag Universiteit Utrecht [Drijver, 2012]

Algemeen [Drijver, 2012]

Op technisch en energetisch gebied heeft de installatie goed gefunctioneerd. Zo is geen noemenswaardige corrosie waargenomen, de bronnen (stijgbuizen, filters, isolatie, bronkoppen etc.) en de voorgeïsoleerde leidingen hebben goed gefunctioneerd. Tevens waren er geen functionele problemen met betrekking tot de koppeling met de gebouwinstallaties en onderhoud en beheer.

Problemen [Drijver, 2012]Waterbehandeling

- De waterbehandeling van de warmteopslag (Ca/Na ionenwisseling) vergde veel aandacht omdat de intensiteit van de behandeling voortdurend moest worden bijgesteld op basis van handmatige metingen. Een hoge intensiteit was niet wenselijk in verband met het risico van kleizwelling, een te lage intensiteit niet in verband met het risico van kalkneerslag. Beide processen kunnen leiden tot verstopping van de bronnen.
- De warme bron is in de loop der jaren ernstig verstopt geraakt. De oorzaak van de verstopping is niet bekend. De kans is echter groot dat de kritische waterbehandeling de oorzaak is van de verstopping, maar bewijzen daarvoor ontbreken.
- De warme bron is in de zomer van 1999 gaan lekken. Belangrijkste oorzaak hiervan was het niet functioneren van de drukbeveiliging op de bronkop en het gebrek aan kennis bij de beheerder.

Economisch

- De investeringen van de opslag zijn circa 25% hoger uitgevallen dan begroot. Dit met name door de aanvullende meetvoorzieningen in het kader van de vergunningverlening en een onderschatting van de complexiteit van het project.
- Positief is dat de opslag financieel gezien ondanks de korte levensduur een gunstig resultaat heeft getoond. De exploitatie was met name gunstig doordat de inzet van de WKK's geoptimaliseerd kon worden; in de zomer was het mogelijk meer elektriciteit te produceren met de WKK's voor een gunstig tarief. Daarnaast hebben de subsidies van EG en NOVEM een positieve bijdrage geleverd.

Zwammerdam

De zorginstelling Hooge Burch (naam is later gewijzigd naar De Bruggen) in Zwammerdam heeft een warmtekracht installatie (WKK) voor productie van elektriciteit en warmte voor verwarming. Het project is gestart in 1998 en is 5 jaar aandachtig beheerd. Hierna is de warmteopslag omwille van financiële redenen uit bedrijf genomen: het tarief voor de teruggeleverde elektriciteit woog niet op tegen de kosten (winst) van de warmteopslag. De inzet van de warmteopslag is zodoende gestaakt.

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- de installatie heeft technisch goed gefunctioneerd,
- de kwaliteit van de bronnen is goed,
- de gekozen waterbehandelingsmethode is zoutzuurdosering (op basis van de beschikbare kennis bij de Universiteit van Utrecht). Hierdoor heeft zich geen bronverstopping door kalkneerslag of kleizwelling
- energetisch heeft de installatie goed gefunctioneerd.
- Het opslagrendement is berekend op circa 65%. Hierbij moet worden vermeld dat de warmteopslag een relatief kleine opslag betrof en dus meer hinder ondervond door verliezen in de bodem. Bij een grotere opslag wordt een hoger opslagrendement verwacht.

Tabel 9: Condities van HTO in Zwammerdam, Hooge Burch [Drijver, 2012]

<u>Naam</u>	<u>Zwammerdam, Hooge Burch</u>
Ingebruikname	1998
Geologische formatie	Met water gevulde zandlaag, zie geohydrologische schematisatie
Diepte	180 m-mv
Aantal putten	2 putten en 3 meetputten
Productie and injectie flow rate	25 m ³ /h

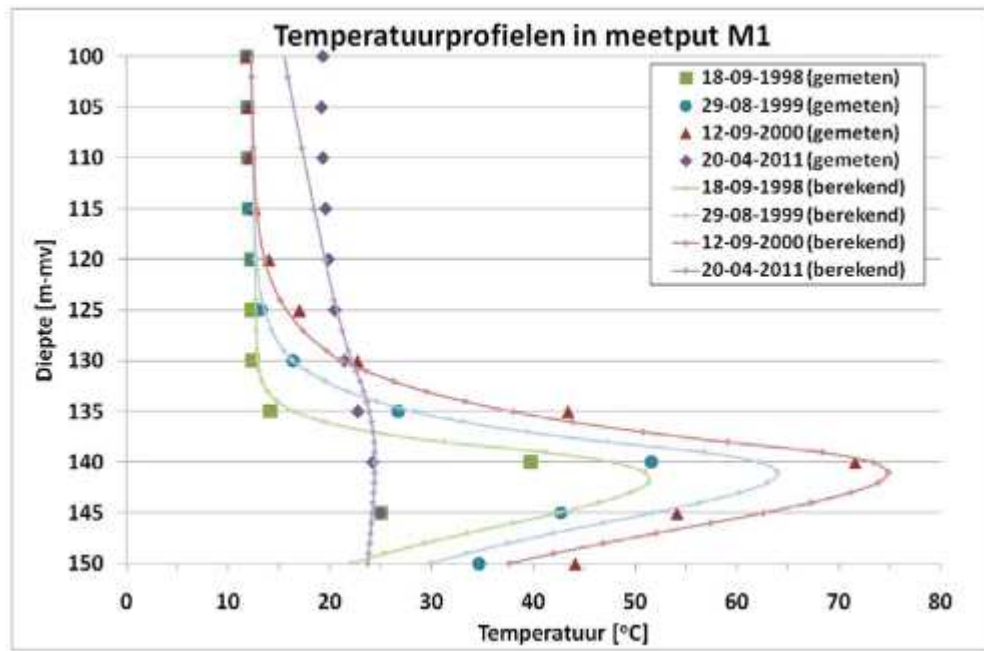
Injectie temperatuur	90 °C
Juridisch	Grondwaterwet: jaarlijkse monitoringsrapportages die in het kader van de vergunningen Grondwaterwet (onttrekking en infiltratie grondwater) en Wet Milieubeheer (toevoegen zoutzuur en "lozen" warmte in de bodem)
Warmtebron	WKK
Opslaghoeveelheid	± 20.000 m ³ /j
Opslagrendement	65%
Waterbehandeling	Zoutzuurdosering

Bodemopbouw

Geohydrologische schematisatie

Tabel 10

diepte [m-mv]	lithologie	geohydrologische benaming	doorlaatvermogen [m ² /d] of weerstand [d]
0 - 3	klei	deklaag	300 d
3 - 33	matig grof tot grof zand	eerste watervoerende pakket	580 m ² /d
33 - 57	klei met enkele veenlagen	eerste scheidende laag	2.250 d
57 - 130	matig-zeer grof zand, kleilenzen	tweede watervoerende pakket	800 m ² /d
130 - 138	klei	scheidende laag binnen pakket	500 d
138 - 151	matig fijn zand, enkele kleilenzen	tweede watervoerende pakket	140 m ² /d
151-170	klei en matig fijn zandige lagen	scheidende laag binnen pakket	750 d
170-181	matig grof zand	tweede watervoerende pakket	120 m ² /d
181-192	klei	scheidende laag binnen pakket	1.000 d
192-250	matig grof zand met schelpen- gruis en kleilenzen	tweede watervoerende pakket	300 m ² /d



Figuur 27: Temperatuurprofielen Zwammerdam

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 hogetemperatuuropslagssystemen, Rapport 6 – Hogetemperatuuropslag Kennisoverzicht en praktijkmetingen rondom hogetemperatuuropslagssystemen, 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
- IFTtechnology, 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'Hydrogeologie No 17 (1999) Centre d'Hydrogeologie, 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.

6 Ondertekening

Utrecht, 1 november 2013

Placeholder

Henk Pagnier

Maarten Pluymaekers

Afdelingshoofd

Auteur