



Data-acquisitie voor karakterisering van de ondergrond voor HTO: meetprogramma voor pilotlocaties WINDOW

door

KWR, IF Technology, Deltares, TNO, Shell, Eneco, TU Delft, EBN
3 februari 2022



3 februari 2022

Auteurs:

ir. Stijn Beernink (KWR/TUD), drs. Peter Oerlemans (IF Technology), ir. Marette Zwamborn (KWR), dr. Gilian Schout (KWR), drs. Mariëlle Koenen (TNO), dr. Pieter Pauw (Deltares), drs. Pieter Doornenbal (Deltares), dr. Johan Valstar (Deltares), dr.ir. Martin Bloemendal (KWR/TUD), drs. Frederik Jansen (IF Technology).

Kwaliteitsborger:

Dr. Niels Hartog (KWR)

Input vanuit kennisorganisaties en energiebedrijven

Raymond Godderij, Sebastiaan Jaarsma (EBN), Hilde Coppes, Eelco Veen (Shell), Maarten Koops, Lei Thewessem (Eneco), Phil Vardon (TU Delft).

Dit project is uitgevoerd als onderdeel van het Innovatieplan WarmingUP. Dit is mede mogelijk gemaakt door subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in het kader van de subsidieregeling Meerjarige Missiegedreven Innovatie Programma's (MMIP), bij RVO bekend onder projectnummer TEUE819001. WarmingUP geeft invulling aan MMIP-4 – Duurzame warmte en koude in gebouwde omgeving en levert daarmee een bijdrage aan Missie B – Een CO₂-vrije gebouwde omgeving in 2050.

Dit rapport is het resultaat van WarmingUP project 5A, onderdeel van thema 5 WINDOW. WINDOW is een acroniem voor Warmtevoorziening In Nederland Duurzamer met Ondergrondse Warmteopslag. Doel van het WINDOW-programma is het wegnemen van technische, juridische en bedrijfseconomische belemmeringen en beter inzicht krijgen in de effecten voor het verantwoord toepassen van ondergrondse warmteopslag, zodat ondergrondse warmteopslag na 2025 als bewezen techniek kan worden toegepast en kan bijdragen aan kostenreductie van collectieve warmtesystemen op systeemniveau

Projectnummer

KWR 403185-005, KWR Rapport 2022.008

Keywords

HTO, data-acquisitie, meetprogramma, pilots

Jaar van publicatie

2022

Meer informatie

Stijn Beernink

T 06 15605329

E Stijn.beernink@kwrwater.nl

2022/Februari ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Omslagfoto: <https://www.flickr.com/photos/hitchster/2767517636>, creative commons license, Old photograph of geologist downhole logging landslide deposits in large-diameter borehole, roughly 20 foot depth (2003).

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Inleiding	5
1.1 Leeswijzer	6
2 Overzicht pilotlocaties	7
2.1 Locatie Rotterdam	7
2.2 Locatie Delft	8
2.3 Locatie Leeuwarden	9
3 Generiek: belangrijke karakteristieken van de ondergrond bij HTO-toepassing	10
3.1 Beschrijving lithologie: opbouw aquifers en aquitards	10
3.2 Eigenschappen aquifers en aquitards	11
3.2.1 (geo)hydrologische parameters	11
3.2.2 Thermische parameters	12
3.3 Samenstelling grondwater en sediment	13
3.4 Heterogeniteit van de ondergrond	14
3.5 Prioritering eigenschappen ondergrond voor potentie HTO	15
4 Meetprogramma per locatie	16
4.1 Locatie Rotterdam	16
4.1.1 Locatie van de proefboring	17
4.1.2 Onderzoeksvragen	18
4.1.3 Meetactiviteiten tijdens en na de proefboring	19
4.2 Locatie Delft	25
4.2.1 Onderzoeksvragen	25
4.2.2 Meetactiviteiten tijdens en na de proefboring	26
4.3 Locatie Leeuwarden	29
4.3.1 Meetprogramma voor HTO tijdens geothermieboring	29
4.3.2 Resultaten geothermieboring, interpretatie en conclusies	30
Literatuurlijst	32
Bijlage 1 Methodes boorgatmetingen	33
Bijlage 2 Wateranalyses grondwaterkwaliteit KWR	34
Bijlage 3 Gasanalyses grondwaterkwaliteit TNO	35
Bijlage 4 Steekmonsters: procedure monsternamen en analyse	36

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft welke karakteristieken van de ondergrond bepalen of er potentie is voor Hoge Temperatuur Opslag (HTO) en hoe deze karakteristieken worden onderzocht voor de drie pilotlocaties binnen WarmingUP project 5A2: Nader onderzoek ondergrondse warmteopslag.

Het doel van dit rapport is drieledig:

- Ten eerste beschrijft dit rapport in generieke zin welke karakteristieken van de ondergrond bepalen of er potentie is voor HTO.
- Ten tweede vormen de uitgewerkte meetprogramma's voor de drie pilot-locaties van WINDOW een praktisch voorbeeld voor nader onderzoek van de ondergrond bij de ontwikkeling van HTO, dat als richtlijn kan worden benut voor nader onderzoek op andere locaties.
- Ten derde heeft dit rapport een praktisch nut binnen het WINDOW-consortium: de uitgewerkte meetprogramma's zijn bedoeld als onderbouwing en werkplan voor de proefboringen nog die binnen WINDOW worden uitgevoerd.

De karakteristieken van de ondergrond op een bepaalde locatie bepalen in grote mate de potentie van een locatie voor HTO. In het hier beschreven onderzoek is gekeken naar de methoden om de voor HTO toepassing belangrijke karakteristieken van de ondergrond in kaart te brengen om hiermee geohydrologische risico's en onzekerheden te kunnen verkleinen. Hierdoor kan de zekerheid worden vergroot waarop een beter besluit genomen kan worden om een demonstratieproject op de locaties uit te voeren.

In het projectplan van WINDOW waren twee diepe testboringen beoogd. In fase 1 van WINDOW is besloten om vooralsnog op drie locaties nader onderzoek uit te voeren, waarbij op één locatie volgens projectplan een proefboring wordt uitgevoerd (Rotterdam), en op twee andere locaties aangehaakt wordt bij lopende ontwikkelactiviteiten. In Delft betreft het de boring in het kader van het DAPwell onderzoekstraject. In Leeuwarden is gecombineerd onderzoek uitgevoerd bij de geothermie proefboring, mogelijk later alsnog gevolgd door een proefboring.

Het meetprogramma verschilt om die reden per locatie (bijv. proefboring, wel of geen pomptest, meten bij geothermieboring, etc.). De precieze invulling per locatie wordt uitgebreid beschreven in dit rapport, waarmee de basis wordt gelegd voor de uitwerking van de uitvoeringsplannen.

De drie beschreven cases in dit rapport kunnen in het vervolg gebruikt worden als een praktisch voorbeeld hoe data-acquisitie voor HTO uitgevoerd kan worden, en welke zaken daarbij van belang zijn.

De proefboring(en) zullen worden uitgevoerd door een boorfirma. Hiervoor wordt een Programma van Eisen (PvE) opgesteld. Het PvE is het hoofddocument bij de aanbesteding voor de boorfirma. Dit meetprogramma moet gezien worden als aanvullend document op een PvE, waarin specifiek wordt ingegaan op alle benodigde metingen die uitgevoerd worden door de boorfirma of anderen.

1.1 Leeswijzer

- In hoofdstuk 2 wordt de huidige stand van zaken van alle drie de locaties beschreven en wordt duidelijk wat de plannen zijn per locatie.
- Hoofdstuk 3 geeft een generieke beschrijving van de karakteristieken die de mogelijkheden voor een HTO bepalen (inzicht in prestaties & impact) en daarnaast belangrijk zijn voor het ontwerp van de HTO.
- Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 gedetailleerd beschreven per locatie welke meetmethodes worden toegepast. Vanwege het praktische doel van dit rapport binnen het WINDOW consortium, is in dit hoofdstuk voor ieder specifiek onderdeel (de specifieke meetmethode/analyse techniek) ook aangeduid welke partij binnen het WINDOW-consortium de metingen uitvoert en rapporteert.
- In de bijlagen 1 t/m 4 zijn de meetmethoden verder uitgewerkt voor boorgatmetingen, water- en gasanalyses en voor het nemen van steekmonsters.
- In bijlage 5 is een notitie met meetresultaten van Leeuwarden al opgenomen: ten tijde van het definitief worden van dit rapport over het meetprogramma waren deze resultaten al beschikbaar.

2 Overzicht pilotlocaties

De drie pilotlocaties die momenteel onderdeel zijn van het WINDOW project zijn gekozen in fase 1¹ van het WINDOW project. Het onderzoek naar, en ontwikkeling van, het warmteopslag systeem is voor iedere locatie in een ander stadium en wordt in dit hoofdstuk beschreven. Deze beschrijving is van belang om de invulling van het meetprogramma te kunnen duiden. Een kort overzicht van de meetmethodes die per locatie zullen worden toegepast in dit stadium zijn beschreven in Tabel 2-1.

Tabel 2-1 De verschillende meetmethodes binnen het WINDOW project voor de drie pilots.

Locatie	Proefboring	Boorgatmetingen	Pomptest	Plaatsen putfilters
Rotterdam	Ja	Ja	Ja, Maassluis	Ja
Delft	Ja	Ja (+)	Ja, Ommelanden	Nee
Leeuwarden	Screening bij geothermie boring ²	Ja (Gamma Ray, LWD)	Nee	Nee

2.1 Locatie Rotterdam

Locatie Rotterdam Nesseland is in WINDOW fase 1 bestempeld als zeer kansrijke locatie. De beoogde locatie van de HTO ligt nabij het meng-injectiestation van het warmtenet van Eneco, wat vanuit de bovengrond een goede integratie van de HTO met het warmtenet mogelijk maakt. Daarnaast biedt de ondergrond goede potentie voor warmteopslag. De potentie voor succesvolle toepassing van HTO is daarom hoog en daarom is er commitment uitgesproken door Eneco om deze HTO te gaan ontwikkelen.

Op basis van het onderzoek in WINDOW fase 1 is bepaald dat de Maassluis formatie (fm.) de meeste potentie voor de HTO heeft. Daarnaast is het mogelijk dat de fm. Van Oosterhout geschikt is voor HTO, deze kans wordt echter kleiner geschat.

Het doel van de proefboring in Rotterdam is om zo exact mogelijk te weten wat de eigenschappen zijn van het beoogde opslagpakket, zodat hierop het ontwerp van de HTO gebaseerd kan worden. In dit document is dus een meetprogramma opgesteld om zo efficiënt en doelgericht mogelijk de juiste eigenschappen van de Maassluis fm. (en mogelijk de Oosterhout fm.) in kaart te brengen. Als de warmteopslag in Rotterdam daadwerkelijk wordt gerealiseerd in de Maassluis fm. Dan kan de proefboring mogelijk worden benut als monitoringsbron voor de HTO. Bij de proefboring is hierop geanticipeerd. De proefboring staat gepland voor Q1 2022.

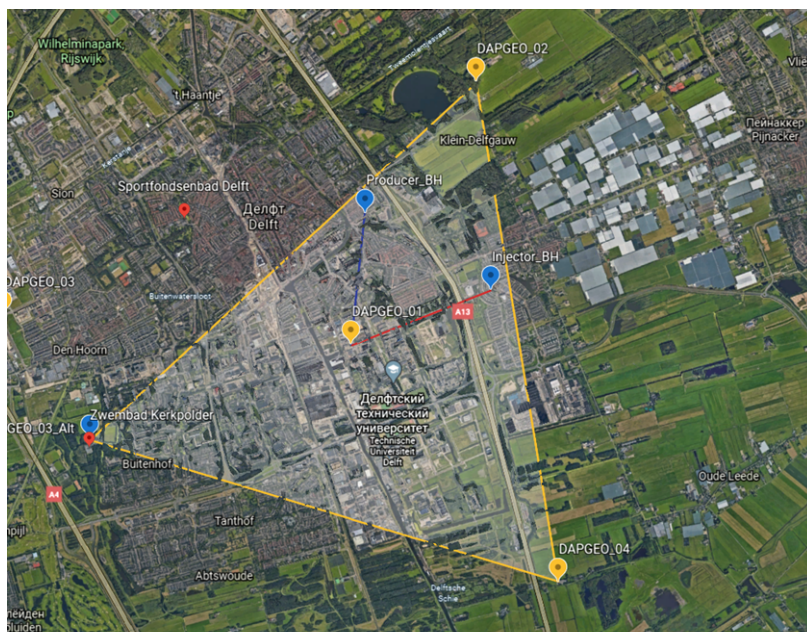
¹ <https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---a1---notitie-vergelijking-en-selectie-locaties.pdf>

² Indien de ondergronddata die verzameld wordt met de geothermieboring laat zien dat er potentie is voor warmteopslag kan er worden besloten dat voor locatie Leeuwarden alsnog een proefboring nodig is.

2.2 Locatie Delft

De potentie van de ondergrond voor HTO wordt op deze locatie onderzocht omdat een warmteopslag systeem van grote toegevoegde waarde kan zijn voor het optimale gebruik van het toekomstige geothermie systeem 'Delft Aardwarmte Project (DAPwell³). Daarnaast kan het voor een groter aandeel duurzame warmte voor het warmtenet van de universiteit zorgen. Uit de verkenning in WINDOW fase 1 is gebleken dat de potentie voor een inpassing van HTO in het TUD warmtenet groot is.

Drie monitoringsputten om seismische activiteit te kunnen meten zijn gepland binnen het DAPwell project in het verleden (Figuur 2-1). De meetactiviteiten voor de meest noordelijke monitoringsput (DAPGEO_02) zijn uitgebreid om ook HTO gerelateerde onderzoeksvragen te kunnen onderzoeken. Op basis van eerdere verkenningen is gebleken dat er in de ondergrond van Delft een aantal lagen zijn die mogelijk potentie hebben: de fm. Van Maassluis, de fm. Van Oosterhout. En de fm. Van Ommelanden. De DAPGEO_02 proefboring zal tot een diepte van 500m gaan, al deze formaties zullen dus doorboord, en onderzocht worden. De locatie van deze proefboring is ongeveer 2.5km ten noordoosten van de geplande locatie van de geothermiebron. In dit stadium is een locatie van de HTO nog niet bepaald. De DAPGEO_02 boring is daarom niet ingestoken als een monitoringsbron voor de HTO, zoals wel in Rotterdam het geval is; de proefboring wordt niet uitgevoerd in het verwachte beïnvloedingsgebied dicht bij een van de HTO putten. Meettechnieken zoals DTS (temperatuurmetingen) of peilfilters om het grondwater te kunnen bemonsteren zijn hier dus niet van toepassing.



Figuur 2-1 De geplande locatie van het DAPwell project en de drie monitoringsputten rondom en in Delft. De DAPGEO_02 monitoringsput zal gebruikt worden om data te verzamelen voor de potentie van HTO d.m.v. het WINDOW meetprogramma.

³ <https://www.stichtingdap.nl/>

2.3 Locatie Leeuwarden

Uit de verkenning van WINDOW fase 1 is gebleken dat er in Leeuwarden een grote potentie is voor HTO, voor wat betreft de inpassing in het warmtenet, in combinatie met de geothermiebron die in ontwikkeling is door Ennatuurlijk, Shell en EBN. Echter, in de WINDOW verkenning bleek ook dat de potentie van de ondergrond voor HTO momenteel erg onzeker is. Dit komt voornamelijk doordat er in de ondergrond van Leeuwarden relatief weinig diepe boringen zijn gedaan in het verleden. Daarnaast laten de boringen die aanwezig zijn, een opeenvolging van zandlagen zien, waarbij onzekerheid bestaat over afsluitende kleilagen, die voor HTO óók belangrijk zijn. Op basis van data analyse in WINDOW fase 1 is bepaald dat er mogelijk een bruikbare aquifer in de formatie van Maassluis en de formatie van Oosterhout aanwezig zou kunnen zijn.

In Q3 2021 is er een geothermieboring uitgevoerd in Leeuwarden. Deze boring is benut voor het WINDOW project door in het ondiepe domein extra data te verzamelen: tijdens het boren zijn metingen uitgevoerd in de doel aquifers van HTO. De metingen bestonden uit opname van Gamma Ray (Logging While Drilling) en de boorgruisbeschrijving uitgevoerd door de on-site geoloog. De beschrijving van de meetmethoden is in dit rapport opgenomen. Omdat de resultaten van deze metingen al beschikbaar waren bij het definitief worden van dit rapport, zijn in hoofdstuk 4.3 en in bijlage 5 deze resultaten al beschreven.

3 Generiek: belangrijke karakteristieken van de ondergrond bij toepassing HTO

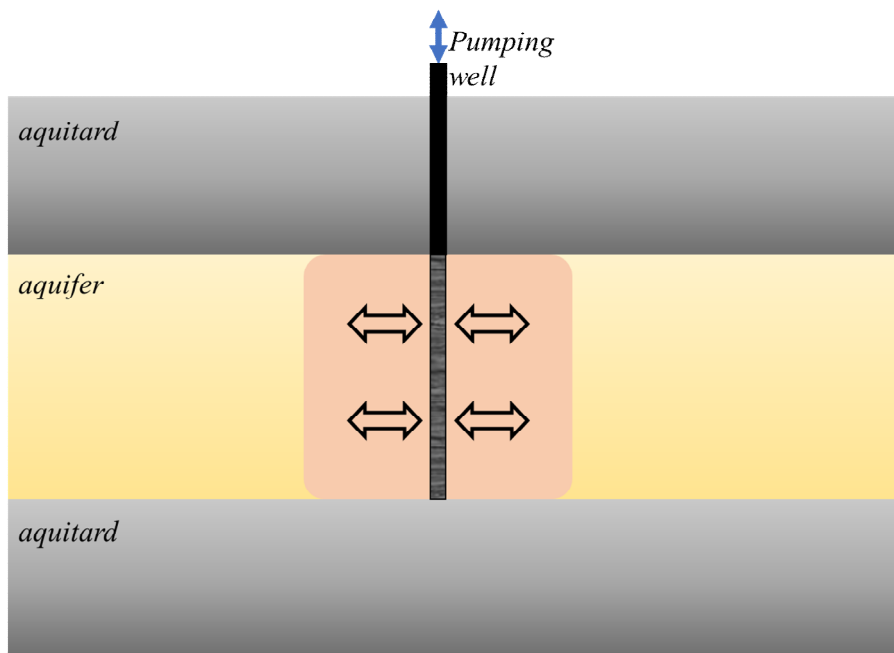
In dit hoofdstuk beschrijven we welke karakteristieken van de ondergrond de toepassing en prestaties van HTO beïnvloeden en welke aspecten in het ontwerp en het functioneren van een HTO hierdoor beïnvloedt kunnen worden. Tenslotte worden de verschillende aspecten die beschreven worden in dit hoofdstuk samengevat in paragraaf 3.5 met een prioritering van het belang van de verschillende ondergrond karakteristieken.

3.1 Beschrijving lithologie: opbouw aquifers en aquitards

Met lithologie wordt de opdeling van de ondergrond in verschillende lagen bedoeld: bijvoorbeeld zand- en kleilagen. Op basis van de lithologie kan de ondergrond worden ingedeeld in aquifers en aquitards (Figuur 3-1). Aquifers zijn lagen die geschikt zijn voor het opslaan van (opgewarmd) grondwater) en aquitards zijn lagen die niet of weinig doorlatend zijn en dus als afsluitende laag kunnen dienen om hydrologische en thermische effecten en verliezen van het opslagsysteem te minimaliseren). De eigenschappen van deze lagen beïnvloeden het ontwerp en prestaties voor een HTO:

- Zo zijn er in een dikkere en/of horizontaal meer doorlatende aquifer minder putten nodig om voldoende injectie- en onttrekkingscapaciteit te realiseren.
- Zo zorgt een dikkere aquitard de bovenkant (primair belang) en de onderkant (secundair belang) van de aquifer voor lagere hydrologische en thermische verliezen.

Voor grondwaterputten in Nederland worden vaak aquifers gebruikt tussen de 20 en 100m dikte (bijv. voor grondwaterwinning of WKO). Op basis van de lithologie wordt uiteindelijk de filterstelling bepaald voor bijv. de pompputten in het gekozen opslagpakket en de peilfilters in omringende watervoerende pakketten. Een gedetailleerde beschrijving van de lithologie is dus van groot belang. In Nederland zijn verschillende ondergrondmodellen en databases (bijv. Regis, DGM, dinoloket) beschikbaar die een regionaal beeld geven van de opbouw van deze lagen in de ondergrond. Echter, de daadwerkelijke geohydrologische opbouw die lokaal wordt aangetroffen kan sterk afwijken van deze gemodelleerde regionale opbouw. Daarnaast bevindt een deel van de mogelijk geschikte pakketten voor HTO zich op grotere diepte, waardoor hierover vaak minder bekend is. Voor het ontwerp van HTO is de onzekerheid in de regionale modellen vaak te groot om een besluit voor een HTO/een ontwerp te maken, en moet er dus in meer detail worden gekeken naar de lithologische opbouw door middel van karakterisatie van de ondergrond.



Figuur 3-1 Een schematische doorsnede van de ondergrond met een HTO-put waarvan de filters zijn gesteld in een aquifer die wordt afgesloten door twee aquitards.

3.2 Eigenschappen aquifers en aquitards

Verschillende eigenschappen van de aquifers en aquitards beïnvloeden samen de prestaties en impact van een HTO systeem. Een duidelijk beeld van de verschillende parameters is dus belangrijk voor een optimaal ontwerp.

3.2.1 (geo)hydrologische parameters

Doorlatendheid & porositeit

De doorlatendheid van het sediment is een eigenschap die weergeeft hoe gemakkelijk water zich verplaatst door een sediment. De porositeit van het sediment geeft aan hoeveel van het volume wordt ingenomen door grondwater en dus waar het water mogelijk door verplaatst kan worden. Vaak voorkomende waarden voor porositeit in watervoerende lagen zijn tussen de 30 tot 40%. De porositeit heeft een grote invloed op de 'gemiddelde' eigenschappen van de aquifer of aquitard; het representatieve gemiddelde tussen de eigenschappen van het grondwater en het sediment. De porositeit hangt vaak samen met de doorlatendheid en wordt hier vaak aan gelinkt met empirische relaties (zoals bijv. kozeny-carman). Bij een grotere porositeit wordt een grotere doorlatendheid verwacht. Hoewel dit gemiddeld klopt laten veel studies zien dat deze correlatie vaak (erg) onnauwkeurig is. Het is dus vaak noodzakelijk om de doorlatendheid (permeabiliteit) van de aquifer/aquitard te bepalen onafhankelijk van de porositeit.

De doorlatendheid is afhankelijk van de eigenschappen van het sediment (de permeabiliteit) en de eigenschappen van het (grond)water in de poriën van het sediment.

$$K = \frac{k \cdot \rho_w \cdot g}{\mu_w}$$

Met K de doorlatendheid in (m/s), k de permeabiliteit (m²), ρ_w de dichtheid van water, g de gravitatieconstante (9.81) m/s² en μ_w de viscositeit van water. De dichtheid en viscositeit van water

is niet constant, bij toenemende temperatuur nemen zowel de dichtheid en viscositeit van water af, netto zorgt dit er voor dat de doorlatendheid toeneemt met hogere temperatuur.

Voor de afsluitende lagen (aquitards) is het van belang dat de verticale doorlatendheid klein genoeg is, zodat er geen (of beperkte) verticale stroming van grondwater mogelijk is vanuit de opslag-aquifer richting boven en onderliggende lagen. Voor de opslag-aquifer is het gecompliceerder en is zowel de representatieve horizontale- en verticale doorlatendheid van belang om de prestaties van de HTO goed te kunnen voorspellen en het ontwerp te kunnen maken. De horizontale doorlatendheid moet groot genoeg zijn om voldoende grondwater te kunnen verpompen en bepaalt dus het haalbare debiet per meter bronfilter. Dit bepaalt dus uiteindelijk hoeveel pompputten er nodig zijn voor een specifiek systeem (Bloemendal et al., 2020). De doorlatendheid (voornamelijk verticale doorlatendheid) is daarnaast belangrijk om de mate van oprijving van het opgeslagen warme water (door de lagere dichtheid) van het opslagvolume te kunnen voorspellen. Een lage verticale doorlatendheid resulteert in een kleinere opwaartse beweging van het opslagvolume en kan dus een positief effect hebben op de efficiëntie van het warmteopslag systeem (Beernink et al., 2020).

Stijghoogte

De stijghoogte is de natuurlijke grondwaterdruk die aanwezig is in de aquifer. Voor sommige lagen kan de stijghoogte hoger dan maaiveld zijn. Hier moet rekening mee moet worden gehouden tijdens het boren, en dit heeft invloed op de aanleg en het technisch ontwerp van de HTO.

Natuurlijke grondwaterstroming

Natuurlijke grondwaterstroming in de opslag-aquifer kan er voor zorgen dat een deel van de opgeslagen warmte wegstroomt en heeft dus een negatieve invloed op de prestatie van HTO-systemen (Bloemendal & Hartog, 2018). De mate waarin natuurlijke grondwaterstroming in een opslag-aquifer de prestaties negatief beïnvloedt neemt af naarmate het opslagvolume groter wordt en wanneer de natuurlijke grondwaterstroming-snelheid af neemt. Voor de meest voorkomende grondwaterstromings- en opslagcondities in Nederland is het effect van grondwaterstroming relatief klein op de efficiëntie en de thermische verspreiding, dit moet echter wel per beoogd HTO systeem worden geverifieerd. Daarnaast heeft natuurlijke grondwaterstroming in boven en/of onderliggende aquifers ook invloed op de thermische impact van het HTO systemen naar die aquifers.

3.2.2 Thermische parameters

De thermische parameters van zowel de watervoerende lagen (aquifers) en de afsluitende lagen (aquitards) hebben invloed op de prestaties en impact van het HTO systeem. De bulk thermische warmtecapaciteit van de aquifer bepaalt de grootte van het thermisch volume in de ondergrond (retardatie, Bloemendal and Hartog (2018)). De bulk thermische geleidbaarheid bepaalt de verspreiding van warmte door conductie (thermische geleiding). Omdat de thermische geleidbaarheid van verschillende materialen slechts in relatief kleine mate varieert wordt dit niet vaak gemeten tijdens de karakterisatie van de ondergrond. Een realistische range aan waarden voor zand, klei en silt is bekend o.b.v. literatuur (Anderson, 2005). Voorafgaand en huidig onderzoek geeft aan dat de te verwachten variatie aan thermische parameter waarden een ondergeschikt effect heeft op de prestatie van de HTO t.o.v. de variatie aan doorlatendheden. Het bepalen van deze parameters is dus van secundair belang.

3.3 Samenstelling grondwater en sediment

Een toename van de temperatuur van grondwater veroorzaakt voor verschuivingen in geochemische evenwichten, wat zowel sorptieprocessen als mineraaloplossing en neerslag beïnvloedt (Schout & Hartog, 2021). Daarnaast versnelt het kinetisch gecontroleerde reacties, zodat bijvoorbeeld mineralen sneller kunnen oplossen. Deels worden deze processen ook gekatalyseerd door in het grondwater aanwezige micro-organismen, welke op hun beurt weer gevoelig zijn voor de temperatuursveranderingen. Dit kan niet alleen gevolgen hebben voor de grondwaterkwaliteit, maar kan ook leiden tot putverstopping. De grondwaterkwaliteit kan ook in lagen boven en onder het opslagpakket worden beïnvloedt indien de temperatuur daar oploopt door warmteverliezen uit het opslagpakket. Naast de direct door temperatuur veroorzaakte effecten zijn ook effecten mogelijk welke veroorzaakt worden door vermenging van verschillende watertypen binnen de opslag-aquifer als gevolg van de verplaatsing van het grondwater d.m.v. pompen en/of opdrijving. Het is daarom van belang om de grondwater- en sedimentsamenstelling vooraf goed te bepalen, zodat een schatting kan worden gemaakt van de te verwachten effecten. Daarbij zijn de volgende drie aspecten van belang:

Watersamenstelling (chemisch/microbiologisch)

Wateranalyse in combinatie met gasanalyse is nodig voor het bepalen van de watersamenstelling. De wateranalyse wordt uitgevoerd bij atmosferische druk, de opgeloste gassen met een partiele druk boven 1 atmosfeer zullen dan uit het monster ontsnapt zijn. Gasanalyses zijn nodig om de concentratie opgeloste gassen te bepalen. Het is dus belangrijk dat watermonsters t.b.v. de analyse van opgeloste gassen onder druk genomen worden zodat de gassen niet ontsnappen.

De natuurlijke watersamenstelling van de aquifer is belangrijk omdat dit inzicht geeft in de te verwachten impact van hogere temperatuur op de waterkwaliteit. Daarnaast dient dit als ijkpunt voor de monitoring tijdens gebruik van de HTO; welke veranderingen treden er op? Een uitgebreide beschrijving van de wateranalyses en gasanalyses die toegepast gaan worden voor dit onderzoek zijn beschreven in Bijlage 1 en Bijlage 2.

Sedimentsamenstelling (mineralogisch/organisch)

Vanzelfsprekend geldt dat de cumulatieve hoeveelheid stoffen die vanuit het sediment (vaste fase) in het grondwater terecht komt afhankelijk is van de mate waarin deze stoffen zich al in het sediment bevinden. Het is daarom vooral van belang dat een analysepakket wordt uitgevoerd waarmee de voornaamste reactieve fase van het sediment kunnen worden afgeleid. Hierbij moet onder andere gedacht worden aan de fracties reactief ijzer, carbonaat, pyriet, organisch materiaal, kleimineralen, en het kation-uitwisselingscomplex (CEC). Daarnaast moet onderscheid gemaakt worden tussen de soorten carbonaten (calciet, dolomiet, sideriet, magnesiet). Dit is belangrijk om de impact van temperatuurverhoging op de chemische effecten in de ondergrond en met name de mogelijke verstopping door neerslag van carbonaten te kunnen bepalen. Een analysepakket waarmee dit kan worden bereikt is als voorbeeld weergegeven in Tabel 3-1.

Natuurlijke grondwatertemperatuur in ondergrond

De natuurlijke grondwatertemperatuur neemt toe met de diepte, dit wordt ook wel de geothermische gradiënt genoemd. In Nederland is dit ongeveer 2.5°C/100 m. Het is belangrijk om de natuurlijke grondwatertemperatuur van het opslagpakket en de naburige lagen te meten zodat tijdens monitoring van de temperatuur tijdens gebruik van de HTO duidelijk is hoe groot de relatieve temperatuur toename is.

Tabel 3-1 Overzicht van analysepakket sedimentmonsters voor HTO WINDOW fase 2.

Analysepakket sedimentmonsters bij HTO proefboringen WINDOW fase II	
Analyse	Parameters
Korrelgrootteverdeling via laserdiffractie	Korrelgrootteverdeling
TGA (Thermo-gravimetrische analyse)	Sedimentary organic matter, total carbonate content
Totaal koolstof en totaal zwavel via CS-analyse	Total Carbon (CTOT), Total Sulfur (STOT)
Totaal elementgehalte van (hoofd)elementen via XRF	Concentraties elementen en reactieve fasen
Minerale compositie	O.a. samenstelling carbonaat mineralen

3.4 Heterogeniteit van de ondergrond

In Nederland bestaat de ondiepe ondergrond uit lagen/formaties die zijn gevormd door verschillende sedimentatieprocessen. Het afzettingsmilieu (e.g. marien of rivier) dat voor de sedimentatie van de formatie heeft gezorgd bepaalt in grote mate de karakteristieken van de ondergrond. Daarnaast zijn er processen die invloed hebben op de karakteristieken van de ondergrond na afzetting (e.g. compactie, breuken, vervorming). Samen bepaalt dit de variabiliteit in de ondergrond.

Alhoewel de ondergrond vaak wordt gepresenteerd als een opeenvolging van verschillende homogene lagen, is dit altijd een versimpeling van de werkelijkheid. De ondergrond is per definitie heterogeen, de eigenschappen van de ondergrond kunnen in alle richtingen verschillen. Deze heterogeniteit kan zich voordoen als bijv. een verticale opeenvolging van kleine zand/klei lagen of een horizontale overgang van goed naar slecht doorlatende zanden. De mate waarin, en de afstandsschaal waarmee, deze variabiliteit zich voordoet in de ondergrond is daarbij erg belangrijk. Voor HTO is het voornamelijk belangrijk om te weten hoe groot deze variabiliteit is op een schaal van enkele meters in de verticale richting en enkele honderden meters in de horizontale richting. Het is daarom goed om te kijken naar de variabiliteit die te verwachten is o.b.v. het specifieke afzettingsmilieu van de formatie. Ook kunnen eerdere boringen gebruikt worden om de te verwachten variabiliteit inzichtelijk te maken. De verwachte variabiliteit (en de richting) bepalen vervolgens hoeveel data er nodig is om representatieve waarden voor de eigenschappen van de ondergrond te bepalen. Hierbij kan een onderscheid worden gemaakt tussen additieve parameters en niet-additieve parameters (Nordahl & Ringrose, 2008). Additieve parameters zoals porositeit en thermische eigenschappen behoeven een minder grote dataset om representatieve waarden te bepalen. Voor niet-additieve parameters zoals de doorlatendheid is voor de meeste soorten afzettingen een groter meetvolume nodig om de invloed van heterogeniteit beter te kunnen bepalen.

De heterogeniteit van de ondergrond heeft dus invloed op hoe representatief de (beperkte) informatie over de ondergrond zijn voor het gehele volume in de ondergrond dat in invloed gaat hebben op de water- en warmteverplaatsing door de verschillende HTO putten. Wanneer de heterogeniteit klein is, kan er met minder metingen een representatief beeld van de ondergrond worden verkregen. Bij een zeer heterogene ondergrond is het moeilijker om representatieve waarden van de eigenschappen van ondergrond te krijgen. Uitgebreidere metingen, gedetailleerde analyses, of een combinatie van beiden kan dan nodig zijn.

Een proefboring geeft inzicht in de verticale heterogeniteit d.m.v. bijv. de boorbeschrijvingen, boorgatmetingen en analyse van steekmonsters. De horizontale (laterale) heterogeniteit is moeilijker te bepalen op basis van een verticale boring. Bestaande boringen, regionale modellen, (3D) seismiek en inzicht in het afzettingsmilieu (bijv. door outcrop-analyse) kunnen worden gedaan om hier inzicht in te krijgen. In het WINDOW wordt onderzoek gedaan om te bepalen hoe er beter omgegaan kan worden met heterogeniteit, en, hoe we de heterogeniteit beter kunnen meten. De formaties die in Nederland veelvuldig worden gebruikt voor OBES systemen (bijv. Waalre, Maassluis) laten over het algemeen een beperkte mate aan laterale heterogeniteit zien. De informatie die wordt verkregen bij één verticale proefboring blijken dus vaak representatief genoeg om een gedegen hydrogeologische karakterisatie te doen en een ontwerp te maken, ervanuit gaande dat het OBES systeem dicht bij de proefboring wordt geplaatst.

3.5 Prioritering eigenschappen ondergrond voor potentie HTO

Of de ondergrond geschikt is voor HTO wordt in 1^e instantie bepaald door de dikte en aanwezigheid van geschikte aquifers en aquitards (lithologische opbouw) en de doorlatendheid van deze lagen. Ook is een goed inzicht in de te verwachten heterogeniteit essentieel om de prestaties en impact van het systeem te kunnen waarborgen. Indien dit het geval is zijn de sedimentsamenstelling en grondwaterkwaliteit van groot belang omdat deze bepalen wat de impact van de HTO kan zijn en hoe groot de kans is op putverstopping door bijvoorbeeld chemische of microbiologische processen (Tabel 3-2).

Tabel 3-2 Prioritering van essentiële, zeer belangrijke en minder belangrijke eigenschappen van de ondergrond

Essentieel	Belangrijk	Minder belangrijk
Lithologische opbouw	Samenstelling grondwater en sediment	Porositeit
Horizontale doorlatendheid	Verticale doorlatendheid	Thermische eigenschappen sediment
Heterogeniteit	Natuurlijke grondwatertemperatuur	Stijghoogte in opslagpakket

4 Meetprogramma per locatie

Dit hoofdstuk beschrijft hoe de meetprogramma's per locatie zijn ontwikkeld, met als doel om inzicht te verschaffen in een, of meerdere, van de in hoofdstuk drie gedefinieerde karakteristieken van de ondergrond. De meetprogramma's zijn in chronologische volgorde van uitvoering beschreven. De belangrijkste vragen die hier worden behandeld zijn:

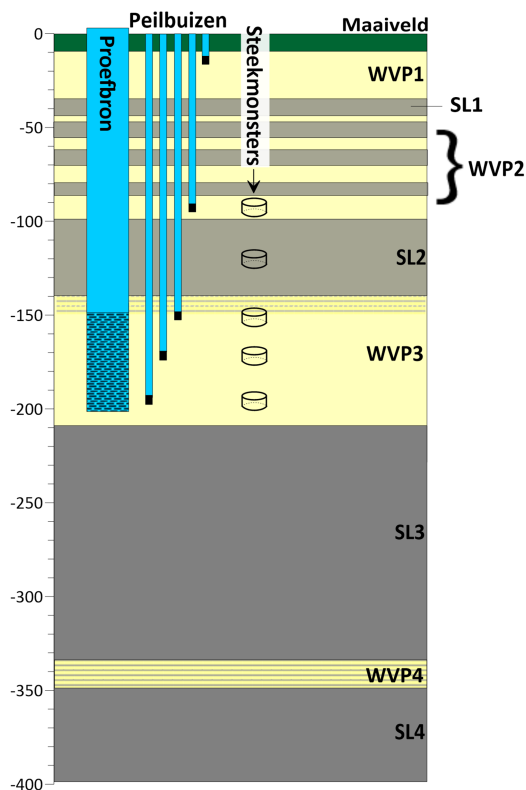
- Welke meting/methode wordt er uitgevoerd?
- In welke volgorden worden deze metingen uitgevoerd?
- Welke resultaten worden er behaald met de specifieke meting?
- Welke partij is verantwoordelijk voor de meting en het resultaat?
- Hoe worden de resultaten verwerkt (en door wie)?
- Welke conclusies worden er uit de metingen gehaald?

In het meetprogramma moet ook al goed worden nagedacht over de analyses en verwerkingsstappen die gedaan worden na het verzamelen van de nieuwe data. Dit wordt vaak al wel deels beschreven in deze hoofdstukken, maar het kan voorkomen dat hier nog definitieve plannen ontbreken.

Voor de locatie Leeuwarden zijn ten tijde van het afronden van dit rapport al resultaten beschikbaar, deze zijn al opgenomen, met een vooruitblik op vervolgonderzoek.

4.1 Locatie Rotterdam

Voor de WINDOW HTO-pilot in Rotterdam Nesseland wordt begin 2022 een proefboring uitgevoerd om meer detailinformatie over de ondergrond te verkrijgen. Daarmee kunnen risico's scherper worden ingeschat en kan in de toekomst een passend bronontwerp worden gemaakt. Hieronder zijn de onderzoeksvragen geformuleerd die tijdens de proefboring moeten worden geadresseerd en tevens zijn de meetactiviteiten beschreven die worden uitgevoerd om de onderzoeksvragen te beantwoorden. De minimale boordiepte is 250m. Indien mogelijk, afhankelijk van beschikbare financiering, zal er dieper worden geboord tot aan de formatie van Oosterhout (e.g. 350m). Gedurende de boring zullen er meerdere steekmonsters worden genomen. Na de boring zullen boorgatmetingen worden uitgevoerd. Het boorgat wordt uiteindelijk afgewerkt als monitoringsput met verschillende peilfilters voor het nemen van grondwatermonsters alsook een glasvezelkabel voor meting van bodemtemperaturen en akoestische signalen (Figuur 4-1).



Figuur 4-1 Verwachte bodemopbouw in Rotterdam Nesselande met daarin schematisch de beoogde filterstelling van bron en peilbuizen weergegeven, alsook de beoogde dieptes van de steekmonsters. WVP = Watervoerend pakket, SL = Scheidende laag.

4.1.1 Locatie van de proefboring

De monitoringsput moet worden geplaatst binnen de directe thermische invloedssfeer van de hete bronnen, de locatie van de proefboring moet hier dus op worden aangepast. De thermische straal die zal ontstaan bij gebruik van de HTO bepaalt dus waar de monitoringsput moet worden geplaatst. Een maximale en minimale thermische straal, die ontstaat na het eerste laadseizoen, is berekend o.b.v. de verwachte variatie aan aquifer dikte (L_{aq}) en opslagvolume (V_{in}), Tabel 4-1.

Tabel 4-1 Thermische straal rondom de hete bronnen aangenomen dat de 2 hete bronnen samen 1 circulair thermisch volume vormen. $C_w=4183000$ en $C_{aq}=2572080$ voor 2 uiterste scenarios (minimale en maximale grootte).

	V_{in}	L_{aq}	R_{th}
MIN R_{th}	100,000	30	41.54
MAX R_{th}	400,000	20	101.75

In het huidige ontwerp is de locatie van de monitoringsput geplaatst op circa 40 tot 50 m van de hete bronnen (Figuur 4-2). Dit ligt zeer waarschijnlijk binnen de verwachte invloedssfeer van de hete bronnen (Tabel 4-1). De kans dat de thermische straal vanuit de hete bronnen 40 m bedraagt, indien er slechts 100,000 m³ wordt geïnjecteerd, wordt klein geacht. Een afstand van 40 – 50 m vanaf de hete bron lijkt dus een geschikte afstand voor de monitoringsput.



Figuur 4-2 Overzicht van de projectlocatie bij de centrale van Eneco. Een inschatting van de huidige locatie van de monitoringsput is gedaan op 30 tot 50m afstand van de warme bron(nen).

4.1.2 Onderzoeksvragen

De vragen die beantwoord dienen te worden tijdens of na het uitvoeren van de proefboring zijn:

- 1 Op welke diepte in de formatie van Maassluis (en Oosterhout) zijn geschikte zandlagen aanwezig voor het plaatsen van bronfilter?
- 2 Op welke diepte in de formatie van Maassluis (en Oosterhout) zijn kleilagen aanwezig die kunnen dienen als afsluitende kleilaag boven (en onder) een opslagpakket?
- 3 Op welke diepte in het opslagpakket zijn stoorlaagjes (kleilaagjes) aanwezig, waar we voldoende afstand van moeten houden bij het plaatsen van het bronfilter?
- 4 Wat is de weerstand en dikte van de afsluitende laag boven het potentiële opslagpakket?
- 5 Wat is de horizontale doorlatendheid (m/d) van het opslagpakket, in de formatie van Maassluis (en Oosterhout)?
- 6 Wat is het maximale debiet dat door de toekomstige HTO putten kan worden geleverd? (optioneel: tot maximaal een factor 3 maal de NVOE-onttrekkingsnormen)
- 7 Wat zijn de natuurlijke stijghoogtes in het opslagpakket en bovenliggende watervoerende pakketten?
- 8 Wat is de waterkwaliteit in het potentiële opslagpakket en bovenliggende watervoerende pakketten? (chemische parameters/microbiologische samenstelling en opgeloste gassen).

- 9 Wat is de mineralogische (en organische) samenstelling van het sediment van het opslagpakket?
- 10 Wat is de natuurlijke temperatuurverdeling (verticaal) in de ondergrond?

4.1.3 Meetactiviteiten tijdens en na de proefboring

In Tabel 4-2 is aangegeven welke (meet)activiteiten tijdens de proefboring worden uitgevoerd, welke resultaten deze activiteiten opleveren en welke partij verantwoordelijk is voor het opleveren van de resultaten.

Tabel 4-2 Locatie Rotterdam: meetprogramma in chronologische volgorde

Wanneer in proces	NR.	Meting type / methode	Resultaat	Eindverantwoordelijk
Tijdens realisatie proefboring	1	Boorbeschrijving geroerde monsters	Geroerde monsters in boorbakken, nauwkeurige omschrijving grondlaag en M-waarde, per m	Boorbedrijf
	2	Steekmonsters nemen	Steekmonsters in steekbussen	Boorbedrijf
	3	Boorgatmetingen	Informatie over lithologie en variabiliteit op cm-dm schaal	Deltares
	4	Inbouwen bron, inclusief peilbuizen en glasvezelkabels		Boorbedrijf (eventueel i.s.m. andere partij)
	5	Testen bronkwaliteit	Broncapaciteit, zandlevering, skin op boorgatwand	Boorbedrijf
	6	Put ontwikkelen, capaciteitstest met stopproeven (optioneel overschrijding normen), peilbuizen schoonspoelen	Doorlaatvermogen en doorlatendheid, risico op zandlevering	Boorbedrijf
	7	Stijghoogtemetingen (in rust en tijdens testen)	Stijghoogtes en grondwaterstand	Boorbedrijf
	8	Flowmetingen	Flowverdeling langs filtertraject / verticale doorlatendheid	Boorbedrijf
	9	Afwerken put als monitoringsput	De monitoringsput is uitgerust om verschillende metingen uit te voeren na oplevering.	Boorbedrijf
Tijdens of na oplevering monitoringsput	10	Analyse steekmonsters	Chemische/microbiologische samenstelling sediment, bodemstructuur op cm-schaal	KWR, TUD
	11	Zeefkrommes opslagpakket	Korrelgrootte-verdeling	KWR, TUD
	12	Chemische analyse geroerde monsters	Chemische samenstelling sediment	KWR
	13	Grondwaterbemonstering (chemisch, microbiologisch, gas)	Chemische en microbiologische samenstelling grondwater	KWR (chemisch, microbiologisch) TNO (gas)
Verwerking en conclusies	14			IF Technology, met bijdragen van alle partners

Hieronder zijn de activiteiten tijdens de proefboring toegelicht, waarbij het nummer van de activiteit overeenkomt met de nummering in Tabel 4-2.

1. Boorbeschrijving van geroerde monsters | boorbedrijf

De proefboring wordt uitgevoerd met een boorgatdiameter van 450 á 500 mm, ten minste tot een diepte van 250 m-mv (basis van de formatie van Maassluis). Een alternatieve optie is om vanaf 250 m-mv door te boren met een kleinere boordiameter tot circa 350 m-mv, om te onderzoeken of er zich zandlagen in de formatie van Oosterhout bevinden. De toegepaste boortechniek is zuigboren met luchtliften. Tijdens het boren worden de doorboorde grondlagen nauwkeurig beschreven en de M50-waarde wordt gerapporteerd, per meter. De bodemopbouw wordt hiermee nauwkeurig in kaart gebracht.

Het boormateriaal wordt na opboren bewaard in monsterbakken van de booraannemer en beschikbaar gesteld om analyses op uit te voeren. De monsterbakken worden goed gevuld, zodat er voor elke meter voldoende materiaal beschikbaar komt voor zeefkromme-analyses en voor opslag van geroerde monsters in het kernhuis.

Voor de zeefkrommes worden monsters genomen van elke meter van het opslagpakket, en een aantal meter van de boven- en ondergelegen afsluitende laag. Op basis van de verwachte bodemopbouw wordt er dan voor elke meter een zeefkromme gemaakt van de monsters van circa 135 – 215 m-mv, wat neerkomt op circa 80 zeefkrommes. Voor elk monster waarop een zeefkromme-analyse plaatsvindt is circa 50 – 100 g geroerd monster nodig.

Organisatie metingen

- **IF Technology** informeert de onderzoekspartijen (TNO, KWR, Deltares) over wanneer de geroerde monsters beschikbaar komen in de monsterbakken.

- **Booraannemer** verzamelt het opgeboorde materiaal in de monsterbakken, en stelt het materiaal beschikbaar aan de onderzoekspartijen ten behoeve van de uit te voeren analyses en opslag van materiaal.

- **KWR** is verantwoordelijk voor de analyses van de zeefkrommes (opdrachtverlening, financiële organisatie, logistiek) en de afstemming met het zeefkromme-lab.

- **TNO** is verantwoordelijk voor het verzamelen van het overgebleven boormateriaal uit de monsterbakken, en de opslag ervan in het kernhuis. TNO neemt daarvoor zelf de benodigde zaken mee naar de boorlocatie (zakken, bakken, Excel-lijst met overzicht materiaal), en levert het materiaal af bij het kernhuis in Zeist.

- **KWR** zal de chemische analyses van de geroerde monsters uitvoeren. Daartoe zal KWR afsluitbare potten aanleveren aan de aannemer, eventueel met een vulinstructie. De potten zijn voorzien van een diepte-codering, en de booraannemer wordt gevraagd om per pot ten minste 1L geroerd monster op te vangen op de aangegeven diepte, de pot luchtdicht af te sluiten (met zo min mogelijke insluiting van bubbels) en gekoeld te bewaren. De dieptes waarop enkele van deze monsters worden genomen, zullen om en nabij overeenkomen met de dieptes waarop steekmonsters worden genomen (circa 5 stuks), en daarnaast zullen nog een aantal potten worden gevuld met bodemmateriaal van andere dieptes. De potten inclusief dieptecodering worden vóór de start van de werkzaamheden aangeleverd aan de aannemer, eventueel met een instructie voor het vullen van de potten. De chemische analyse van het sediment van deze monsters vindt in principe alleen plaats indien de monsternamen van de steekmonsters niet lukt.

2. Steekmonsters | boorbedrijf

Met een steekmonster kan een in-situ monster van het sediment en grondwater worden verkregen, wat in het lab geanalyseerd kan worden om de hydrogeologische eigenschappen en de (geo)chemische samenstelling van het sediment vast te stellen. Veranderingen van grondwatersamenstelling is mede afhankelijk van de samenstelling van het sediment, en daarom is het interessant om een beeld te hebben van de chemische samenstelling van het (ongeroerde)

sediment. Daarnaast kunnen steekmonsters inzicht geven in de bodemstructuur op centimeterschaal, en er kunnen tests op worden uitgevoerd om de verticale doorlatendheid van de ondergrond te meten.

Zowel steekmonsternamen, de opslag ervan, als de sedimentanalyse zijn relatief kostbaar.

Steekmonsters kunnen daarom niet zomaar elke meter genomen worden. De meest waardevolle analyses zullen die van steekmonsters uit de opslagformatie zijn. Het is daarom wenselijk om uit de opslagformatie (formatie van Maassluis, 140 – 210 m-mv) meerdere steekmonsters te nemen. Op die manier kan ook een goed beeld verkregen worden van de geochemische en hydrogeologische variabiliteit binnen het opslagpakket (Figuur 4-1).

Wanneer er technische en financiële ruimte voor bestaat tijdens de proefboring, is het wenselijk om extra steekmonsters te nemen uit bovengelige aquifers, omdat hier ook thermische effecten mogen worden verwacht. Daarbij heeft het de voorkeur om steekmonsters te nemen op dieptes waar naar verwachting ook een peilfilter zal worden geplaatst. Zodat analyseresultaten vergeleken kunnen worden. Voor chemische analyse van het gestoken materiaal is slechts een beperkte hoeveelheid steekmonster nodig (maximaal een kilo). Het overgebleven monstermateriaal zal door **KWR/TNO/TUD** worden bewaard en kan mogelijk goed ingezet worden voor toekomstig onderzoek naar de mogelijke effecten van HTO systemen.

Informatie voor de booraannemer (opnemen in PvE):

Om bovenstaande analyses te kunnen uitvoeren, worden tijdens de proefboring een aantal steekmonsters genomen. De steekmonsters worden bewaard in een luchtdichte container die wordt afgesloten met bijv. parafine. Het monster wordt eerst afgedekt met folie opdat er geen paraffine of was in het monster kan dringen. De monsters worden vervolgens gekoeld opgeslagen. Het steekmonster heeft een lengte van circa 1 meter, en een diameter van 10 cm.

De steekmonsters zullen hoofdzakelijk worden genomen van dieptes waarop zich ongeconsolideerd zand bevindt. De booraannemer wordt gevraagd om referenties op te nemen van recente succesvolle steekmonsternamen, en om in de aanbieding een beschrijving op te nemen van de steekmethodiek. De verwachte dieptes waarop de steekmonsters genomen moeten worden zijn hieronder indicatief weergegeven (zie ook Figuur 4-1):

- Onderkant 2^e watervoerende pakket, op circa 92 m-mv;
- De scheidende kleilaag tussen het 2^e en 3^e watervoerende pakket, op circa 130 m-mv;
- Bovenkant 3^e watervoerende pakket, op circa 155 m-mv;
- In het midden van 3^e watervoerende pakket, op circa 175 m-mv;
- Onderkant 3^e watervoerende pakket, op circa 195 m-mv

Naast steekmonsters op deze specifieke dieptes wordt de booraannemer ook verzocht om een eenheidsprijs op te nemen voor eventuele extra steekmonsters, die op basis van voortschrijdend inzicht tijdens de werkzaamheden nodig worden geacht.

Organisatie metingen

- **KWR** organiseert de analyse-activiteiten die op de steekmonsters worden toegepast (logistiek, opdrachtverlening, financiële organisatie en praktische eisen aan bemonsteringsmethode en formaat steekmonsters). Indien er, in aanvulling op bovenstaande, extra eisen van toepassing zijn op de steekmonsters wordt daarvoor contact opgenomen met IF Technology en de booraannemer.

3. Boorgatmetingen | Deltares

Aan het einde van de boring, wanneer de einddiepte is bereikt, worden de boorstangen gehesen en kunnen er boorgatmetingen worden uitgevoerd door logging-tools in het open boorgat te laten

afzakken. Er worden twee boorgatmeetsondes gebruikt, waarbij verschillende metingen worden verricht. Deze metingen zijn weergegeven in Tabel 4-3 en worden uitgevoerd door Deltares. Elke meting wordt uitgevoerd in twee richtingen: bij het afzakken en bij het terughalen van de tool. De GR, SONO, LONO en SPR metingen worden uitgevoerd met een snelheid van 6 m/min, de Spectraalgamma metingen vereisen een aanvullende boorgatmeting, met een snelheid van 2 m/min. Voor het in- en uitbouwen van de sondes moet men rekening houden met ongeveer een half uur. Na het trekken van de boorstangen dient het boorgat circa 7 – 9 uur beschikbaar te worden gesteld voor uitvoering van de boorgatmetingen (tijd is afhankelijk van de einddiepte 250 of 350 m). Meer informatie over de verschillende boorgatmetingen is aanwezig in Bijlage 1.

Tabel 4-3 Boorgatmetingen bij locatie Rotterdam

Boorgatmeting	Resultaat
SONO & LONO	Porositeit / klei gehalte / zoutgehalte grondwater
SPR	Indicatie formatiegrenzen
Spectraal en totaal GR	Afwisseling klei/zand, glauconiet

Algemene opmerkingen

De boorgatmetingen kunnen worden uitgevoerd in boorgaten vanaf ongeveer 150 mm tot zeker 1000 mm. De boordiameter en boorvloeistof kunnen een significante invloed hebben op de metingen. Voor de gammastraling geldt dat de straling afneemt met toenemende diameter van het boorgat. Hoe dikker de spoeling, hoe meer scattering plaatsvindt en hoe minder straling de sonde bereikt. De diameter heeft invloed op de elektrische metingen (SPR, SONO en LONO). Het zoete werkwater beïnvloedt de elektrische metingen, zeker wanneer de formatie zout grondwater bevat. Hier wordt niet voor gecorrigeerd. De sonde wordt ook niet gecentreerd in het boorgat. De interpretatie van de resultaten vindt vooral op basis van relatieve veranderingen plaats.

Organisatie metingen

- **Deltares** voert de boorgatmetingen uit na bereiken van de einddiepte.

4. Inbouwen van de bron, peilbuizen en DTS-kabel | Boorbedrijf i.s.m. IF & Deltares

Nadat het boorgat is geboord en de boorgatmetingen hebben plaatsgevonden, wordt bepaald op welke dieptes bronfilter en peilfilter wordt geplaatst (de filterstelling). Daarbij wordt zoveel mogelijk filter geplaatst in het opslagpakket. De bron wordt in het boorgat geplaatst, en de peilfilters in de omstorting. Tevens wordt een glasvezel-DTS kabel aan de bron vastgemaakt, opdat er continue temperatuurmetingen langs de put kunnen worden uitgevoerd.

Er worden peilfilters geplaatst op verschillende dieptes, waaruit grondwater kan worden bemonsterd en waarin divers kunnen worden gehangen (zie ook Figuur 4-1):

- Eerste watervoerende pakket
- Onderin het 2^e Watervoerende pakket, direct boven de kleilaag die als afsluitende laag boven het opslagpakket wordt gezien (circa 92 m-mv).
- Ter hoogte van de bovenkant van het filtertraject (circa 155 m-mv)
- ter hoogte van het midden van het filtertraject (circa 175 m-mv)
- Ter hoogte van de onderkant van het filtertraject (circa 195 m-mv)

Als er beperkte ruimte in het boorgat is voor het plaatsen van peilbuizen, dient voorrang te worden gegeven aan de peilfilters in het 2^e en 3^e watervoerende pakket.

Voor alle peilbuizen die in het 2^e watervoerende pakket (diepte basis is circa 100 m-mv) of ondieper zijn geplaatst, geldt dat er een pomp in moet kunnen afdalen en daarvoor moet de minimale diameter 2" zijn tot circa 30 m diepte. Dieper dan 30 m-mv mag de diameter kleiner zijn.

Voor de peilbuizen in het 3^e watervoerende pakket (opslagpakket in de formatie van Maassluis) dient een pompkamer aanwezig te zijn bovenin de peilbuis om gasanalyses mogelijk te maken. Deze pompkamers hebben een minimale diameter van 3", en reiken tot een diepte van 50 m-mv. Tevens dienen de peilbuizen in deze formaties luchtdicht te worden afgewerkt met een T-stuk met kogelkranen.

De peilbuizen zijn bestand tegen de omstandigheden (druk, temperatuur) die op die locatie verwacht mogen worden (drukclasses worden nader gespecificeerd door IF). Er wordt rekening gehouden met artesische stijghoogtes in het opslagpakket, zowel vóór als na opwarming.

Er wordt een glasvezelkabel (DTS en DAS) geïnstalleerd aan de stijgbuis, vóórdat de omstorting wordt gestort. Deze kabel kan functioneren bij temperaturen van 85°C. Er is met Deltares afgestemd dat de meetkabel voor akoestische metingen kan worden gecombineerd met de glasvezelkabel voor temperatuurmetingen.

De peilbuizen dienen na installatie te worden schoongespoeld, zodat zich natuurlijk grondwater in de peilbuizen bevindt bij oplevering.

5. Testen bronkwaliteit | boorbedrijf

Vóór en na het ontwikkelen van de bronnen wordt een capaciteitstest uitgevoerd, waarbij het maximaal toegepaste debiet overeenkomt met 2,0 x het maximale onttrekkingsdebiet volgens de NVOE onttrekkingsnorm. Hierbij wordt de verlaging gemeten in de bron en de peilbuizen in opslagpakket (t.b.v. bepaling skin), ook wordt de zandlevering en MFI gemeten.

6. Put ontwikkelen, capaciteitstesten | boorbedrijf

De put wordt ontwikkeld en de peilbuizen worden schoon gepompt. Pomp- en stopproeven uitvoeren, met divers in de verschillende peilbuizen om stijghoogteveranderingen te meten. Door het uitvoeren van deze proeven wordt het doorlaatvermogen en de doorlatendheid van het opslagpakket onderzocht en de afsluitende laag onderzocht.

7. Stijghoogtemetingen | boorbedrijf

Na het ontwikkelen van de put, wanneer het systeem tot rust is gekomen, kunnen stijghoogtes worden gemeten in de peilbuizen, om de natuurlijke stijghoogte op verschillende dieptes te achterhalen.

8. Flowmeting | boorbedrijf

Na het realiseren (en ontwikkelen) van de bron vindt een flowmeting plaats. Hiermee wordt de verticale verdeling van het debiet dat vanuit de put de aquifer wordt ingepompt inzichtelijk gemaakt. Dit geeft dus inzicht in de positie van goede en minder doorlaatbare laagjes in het opslagpakket. Daarnaast wordt er nagedacht of het mogelijk is om met een pompproef de verticale doorlatendheid in het opslagpakket te meten (bijv. met een packer 'dipole flow test'). Met deze methode kan de verticale doorlatendheid op verschillende dieptes rondom het putfilter worden berekend. Dit is mogelijk zeer interessant, maar kan ook lastig uit te voeren zijn.

9. Afwerken boorgat als monitoringsput | boorbedrijf

De put wordt netjes afgewerkt aan maaiveld. Daarmee wordt grondwaterbemonstering mogelijk.

10. Analyse steekmonsters / boorgruis (cuttings) | KWR/TUD

Er zullen analyses gedaan worden om de geochemische en hydrogeologische eigenschappen van de kernen te bepalen. Bij punt 2 is aangegeven op welke dieptes steekmonsters worden genomen en hoe de steekmonsternamen zijn georganiseerd. Meer informatie over de steekmonsternamen en -analyse is beschikbaar in Bijlage 4, maar de precieze werkmethode wordt nog nader vormgegeven.

11. Zeefkrommes opslagpakket | KWR/TUD

Zie ook punt 1: KWR coördineert de zeefkromme-analyses van de geroerde monsters uit de monsterbakken.

12. Chemische analyse geroerde monsters | KWR/TUD

Zie ook punt 1: Er zijn een aantal grondmonsters (geroerd materiaal) opgevangen in 1L-flessen van KWR. Hiermee kan de chemische samenstelling van het geroerde sediment worden bepaald. Of deze analyses ook daadwerkelijk plaatsvinden ligt nog niet vast: in de eerste plaats dient het materiaal als back-up wanneer de steekmonsters niet succesvol kunnen worden gestoken of geanalyseerd. Daarnaast bestaat de optie om de geroerde monsters wel te analyseren, om daarmee een vergelijking met de analyses van het gestoken materiaal mogelijk te maken.

- **KWR** levert de 1L-flessen aan op de boorlocatie en organiseert de analysewerkzaamheden met de laboratoria.

13. Nemen grondwatersamples | KWR/TNO

Nadat de meetput is afgewerkt, zullen grondwatermonsters worden genomen uit alle geïnstalleerde peilbuizen ten behoeve van een referentiemeting. Op de monsters worden chemische, gas- en microbiologische analyses uitgevoerd. Daarbij ligt de focus op de natuurlijke samenstelling van het beoogde opslagpakket. De referentiemeting zal ongeveer 8 weken na opleveren van de monitoringsput worden uitgevoerd. Bovendien zullen een aantal van de peilbuizen worden geselecteerd voor een duplo meting, om ook een beeld te krijgen van de natuurlijk variabiliteit en bandbreedte van mogelijke waarden. Deze duplometing kan bijvoorbeeld 4 weken na oplevering worden uitgevoerd. Vóór monsternamen zal minimaal drie maal het volume van de peilbuis worden afgepompt en gecheckt worden dat de EC, O₂ concentratie, en de pH stabiel zijn. In afstemming met het betreffende lab zullen monsters waar nodig worden aangezuurd en gefiltreerd. Meer informatie over de analyses die gepland zijn voor deze grondwatersamples is beschikbaar in Bijlage 2.

Organisatie metingen

- **KWR** staat aan de lat voor organisatie en uitvoering van de grondwateranalyses die worden uitgevoerd nadat de monitoringsput is afgewerkt, met uitzondering van de monsters en analyses t.b.v. de opgeloste gassen.
- **TNO** regelt de monsternamen en analyses voor de bepaling van de gassamenstelling.

14. Samenvatting en conclusie | IF Technology

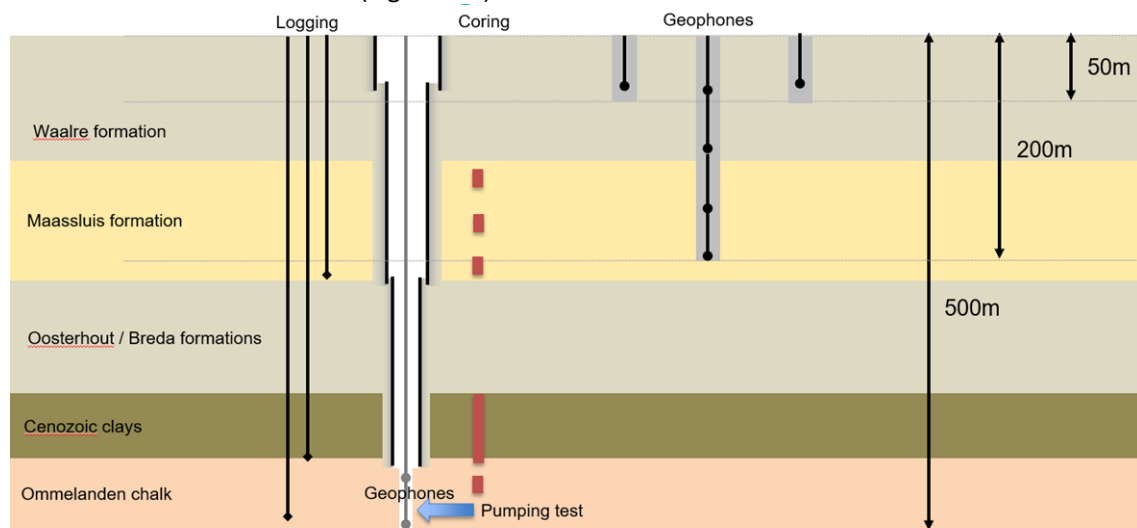
In Rotterdam zal een uitgebreide proefboring plaatsvinden, om de potentie van de ondergrond voor HTO inzichtelijk te maken, en, het definitieve ontwerp van de HTO te kunnen maken. De resultaten van de proefboring zullen zorgen voor de volgende resultaten:

- Gedetailleerd overzicht van de lithologische laagopbouw
- (Geo)hydrogeologische karakterisatie van de onderzochte lagen op basis van: cuttingsanalyse, boorgatmetingen, steekmonsteranalyses en pomptesten.
- Geochemische karakterisatie van de onderzochte potentiële opslaglagen.

Daarnaast zal de data worden gebruikt voor generiek onderzoek, uitgevoerd in het WINDOW project, naar optimale methodes voor karakterisatie van de ondergrond voor HTO. Dit wordt gerapporteerd in een overkoepelend document onder leiding van IF Technology.

4.2 Locatie Delft

Voor locatie delft wordt een multi-purpose proefboring gedaan in Q1 2022 (Figuur 4-3). Deze boring wordt in 3 fases uitgevoerd volgens het spoelboor principe, dit betekent dat water door de boorstangen naar onderen wordt geduwd en langs de boorstangen in het boorgat omhoog spoelt. Na iedere boorfase worden er boorgatmetingen verricht en vervolgens wordt het boorgat gecased (afgewerkt). Dit gaat door tot de einddiepte van 500 m-mv is bereikt. Tussen 450 en 500 m bevindt zich de formatie van Ommelanden, in deze formatie wordt na de boorgatmetingen ook een pomptest verricht (meten van doorlatendheid) en vervolgens worden er op die maximale diepte geophones geplaatst (op deze diepte zal de put niet worden gecased). Op 3 dieptes zullen er tijdens het boren, met 3 unieke methodes, meerdere steekmonsters worden genomen; in de formatie van Maassluis en Oosterhout, de cenozoïcum klei (Rupel / Boom klei) op ongeveer 400m diepte en in de formatie van Ommelanden (Figuur 4-3).



Figuur 4-3 Doorsnede ondergrond Delft en schematische weergaven van de verschillende werkzaamheden voor de multi-purpose boring in het Delftse hout. Er worden veel meer (>15) steekmonsters genomen in Fm. Van Maassluis dan in deze schematische doorsnede (3) is weergegeven.

4.2.1 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen bij locatie Delft zijn vergelijkbaar met de praktische onderzoeksvragen die zijn beschreven voor locatie Rotterdam.

1. Op welke diepte in de formatie van Maassluis, Oosterhout en Ommelanden zijn geschikte lagen aanwezig voor het plaatsen van bronfilter?
2. Op welke diepte in de formatie van Maassluis, Oosterhout en Ommelanden zijn afsluitende lagen aanwezig?
3. Op welke diepte in het opslagpakket zijn stoorlaagjes (kleilaagjes) aanwezig, waar we voldoende afstand van moeten houden bij het plaatsen van het bronfilter?
4. Wat is de weerstand en dikte van de afsluitende laag boven het potentiële opslagpakket?
5. Wat is de horizontale doorlatendheid (m/d) van het opslagpakket, in de formatie van Maassluis (en Oosterhout)?
6. Wat is het maximale debiet dat door de toekomstige HTO putten kan worden geleverd?
7. Wat zijn de natuurlijke stijghoogtes in het opslagpakket en bovenliggende watervoerende pakketten?
8. Wat is de waterkwaliteit in het potentiële opslagpakket en bovenliggende watervoerende pakketten? (chemische parameters/microbiologische samenstelling en opgeloste gassen).

9. Wat is de mineralogische (en organische) samenstelling van het sediment van het opslagpakket?
10. Wat is de natuurlijke temperatuurverdeling (verticaal) in de ondergrond?

Daarnaast zijn er aanvullende (wetenschappelijke) aspecten die bij deze locatie extra aandacht krijgen:

11. Hoe kunnen we representatieve parameterwaardes bepalen voor de lithostratigrafische eenheden (aquifers en aquitards) die potentieel gebruikt kunnen worden voor HTO?
12. Welke combinatie van innovatieve boorgatmetingen en/of steekmonsters is voor een specifieke formatie geschikt om de potentie van de aquifers/aquitards zorgvuldig in kaart te brengen?
13. Is de kalkformatie in Ommelanden een geschikte aquifer voor (warmte)opslag?

Het meetprogramma wordt voor deze locatie dus op een andere manier ingestoken. Leidend is wel dat op basis van de informatie die hier wordt verkregen een ontwerp voor de toekomstige HTO gemaakt kan worden.

4.2.2 Meetactiviteiten tijdens en na de proefboring

Tabel 4-4 Meetprogramma van belang voor HTO bij locatie Delft in chronologische volgorde

Wanneer in proces	NR	Meting type / methode	Eindverantwoordelijk
Tijdens proefboring	1	Boorbeschrijving cuttings & nemen samples in potten	Boorbedrijf / TUD
	2	Nemen steekmonsters	Boorbedrijf
	3	Verwerken steekmonsters	Panterra/TUD
	3	Boorgatmetingen	Deltares/Fugro
	4	Pomptest in Fm. Van Ommelanden	Boorbedrijf
	5	Plaatsen geophones	Boorbedrijf & TUD
Na proefboring	6	Analyse steekmonsters	TUD/KWR/TNO
	7	Analyse zeefkrommes opslagpakket	KWR/Boorbedrijf
Verwerking en conclusies	8		TUD, met bijdragen van alle partners

1. Boorbeschrijving geroerde monsters (cuttings) | Boorbedrijf

Het boorbedrijf maakt een boorbeschrijving van het opgeboorde materiaal tijdens de boring per meter. Daarnaast wordt er van iedere meter een representatief boorgruis monster genomen en opgeslagen in plastic potten. De bodemopbouw wordt hiermee nauwkeurig in kaart gebracht. Het boormateriaal (geroerde monsters per meter) wordt uiteindelijk, na verwerking en analyses, aan TNO ter beschikking gesteld, voor opname in de nationale database (kernhuis).

2. Nemen steekmonsters | Boorbedrijf

Bij de boring bij locatie Delft zullen meerdere type steekmonster worden gedaan, met ook andere doeleinden dan voor HTO, zoals eerder toegelicht. De steekmonsters in de formatie van Maassluis en de formatie van Ommelanden zijn voornamelijk van toepassing voor het HTO onderzoek. Voor de formatie van Maassluis en Oosterhout gaat het om een veelvoud van kernen van 1m lengte die op iedere willekeurige diepte gestoken kunnen worden. De exacte diepte van iedere kern is van tevoren moeilijk te bepalen. Op basis van de best beschikbare informatie over de ondergrond kan er nagedacht worden welke doellagen bemonsterd moeten worden. Vervolgens moet er een plan

worden bedacht hoe tijdens het boren deze lagen worden geïdentificeerd zodat op de juiste diepte een steekern kan worden genomen.

Tijdens de boring zal, aan de hand van het succes van de steekmonsternamen, besloten worden om de steekmonsters te nemen met of zonder een 'core-catcher' (een klep die de onderkant van de steekern afsluit). Monsternamen met een core-catcher verhoogt de kans op een succesvolle monsternamen, maar zorgt ook voor een kleine verandering (compressie) van het monster. Een definitief plan voor steekmonsternamen en analyse is momenteel in voorbereiding. Dit plan kan voor zowel locatie Delft als Rotterdam worden toegepast. Een uitgebreidere beschrijving hiervan is gegeven in Bijlage 4.

3. Verwerken steekmonsters | Panterra/TUD

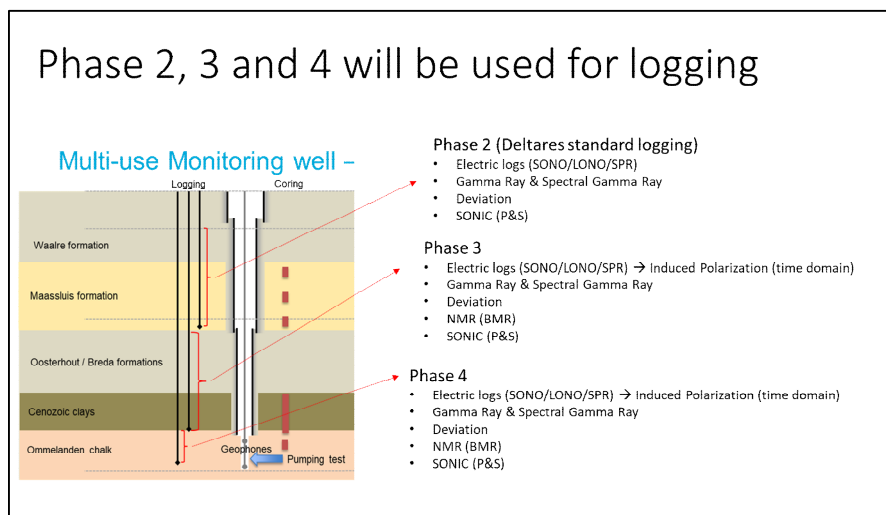
Nadat het boorbedrijf de steekmonsters neemt worden deze verwerkt door Panterra. Panterra zorgt voor het aanwezig zijn van de juiste materialen om de steekmonsters te verpakken, op te slaan op de boorlocatie en te transporteren naar het lab. Het is belangrijk dat de steekmonsters zo snel mogelijk na monsternamen luchtdicht worden verpakt, zodat de originele eigenschappen van het sediment en het grondwater behouden blijft. TU Delft zal de steekmonsters opslaan en analyseren in een van de geofysische labs in de faculteit civiele techniek en geowetenschappen.

4. Boorgatmetingen | Deltares/Fugro

Een uitgebreide en innovatieve set van logging-tools gaat worden gebruikt bij locatie Delft; 3 combinaties van logging tools (Tabel 4-5), totaal 8 metingen. De totale meettijd wordt ingeschat op zo'n 12 uur per boorfase.

Tabel 4-5 Boorgatmetingen bij locatie Delft

Boorgatmeting	Tijd	Boorfase	Resultaat
SONO & LONO		2,3,4	Porositeit & klei gehalte
SPR		2,3,4	Lithologie, waterkwaliteit, breuken
DEV		2,3,4	Afwijking boorgat(wand)
GR		2,3,4	Afwisseling zand/klei
SGR		2,3,4	Afwisseling zand/klei
NMR		3,4	Porositeit, permeabiliteit, anisotropie
Induced Polarization		3,4	Porositeit, permeabiliteit, anisotropie
Sonic (P and S wave)		2,3	Akoustische snelheden (27 interpretatieve seismiek)



Figuur 4-4 Overzicht van de logging-tools die toegepast gaan worden bij locatie Delft tijdens fase 2,3 en 4.

Daarnaast wordt er momenteel bekeken of er ook een density-neutron logging tool gebruikt kan worden. Deze boorgatmeting geeft inzicht in de dichtheid en porositeit. Deze type boorgatmeting wordt niet uitgevoerd door Deltares, maar zal indien dit doorgang gaat vinden, uitgevoerd worden door Fugro. Dit is momenteel nog niet zeker.

5. Pomptest formatie van Ommelanden | boorbedrijf/TUD

Wanneer de boring op einddiepte is, alle boorgatmetingen zijn gedaan en de steekmonster zijn genomen, wordt er een pomptest uitgevoerd in de formatie van Ommelanden. Dit is de diepste watervoerende laag die aangeboord gaat worden. Het gaat hier om een zacht kalkgesteente die slechts sporadisch eerder is onderzocht. De hydrogeologische eigenschappen van deze laag zijn dus van grote interesse, maar ook zeer onzeker. Momenteel wordt er nagedacht welk type pomptest er kan worden uitgevoerd (bijv. pomptest, slug-test, falling head test).

6. Plaatsen geophones | boorbedrijf/TUD

Nadat alle metingen in het boorgat zijn gedaan zal op de einddiepte (500m) een geophone worden geplaatst. Dit is verder niet van direct belang voor het WINDOW project.

7. Samenvatting en conclusie | KWR/TUD

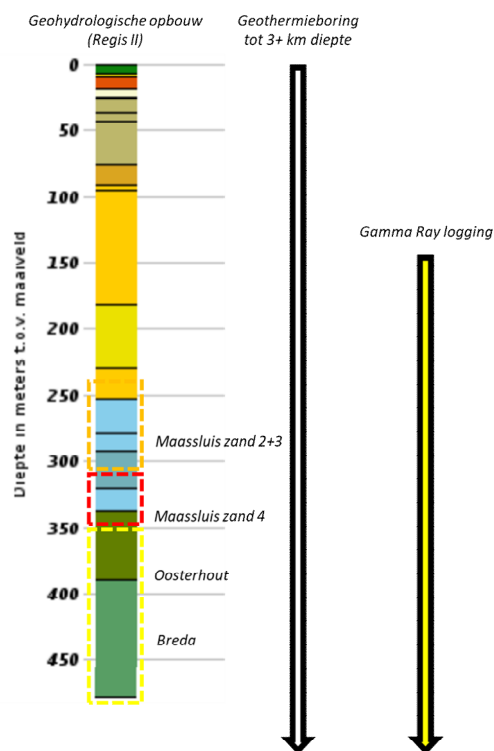
Bij locatie Delft gaat een multi-purpose onderzoeksboringsput geboord worden. De put gaat uiteindelijk dienen als seismische monitoringsput voor het DAPwell project. Gedurende de boring van deze put wordt een uitgebreid scala aan boorgatmetingen en steekmonsters genomen om twee hoofddoelen te bereiken voor het WINDOW project. Ten eerste wordt er data verzameld om het definitieve ontwerp van een HTO te kunnen maken. Ten tweede wordt er essentiële data verzameld om nieuwe methodes en technieken te kunnen testen voor generieke toepassing voor toekomstige HTO's (onderdeel van PhD onderzoek binnen WINDOW).

4.3 Locatie Leeuwarden

Locatie Leeuwarden is in een ander stadium dan de voorgaande twee pilotlocaties. Zoals eerder genoemd is de potentie van de ondergrond voor HTO hier zeer onzeker. Daarom is er extra data verzameld tijdens de geothermieboring die is uitgevoerd namens Shell in Q3 2021. Het meetprogramma dat is uitgevoerd tijdens de geothermieboring is hier eerst beschreven (4.3.1), aansluitend zijn de resultaten van dit meetprogramma kort beschreven en worden vervolgplannen besproken (4.3.2).

4.3.1 Meetprogramma voor HTO tijdens geothermieboring

Hier wordt kort het meetprogramma beschreven dat is uitgevoerd voor locatie Leeuwarden o.b.v. de geothermieboring in Q3 2021. Met deze geothermieboring is data verzameld van de formatie van Maassluis en de formatie van Oosterhout (Figuur 4-5). De verschillende stappen zijn weergegeven in Tabel 4-6.



Figuur 4-5 Doorsnede van de ondergrond voor locatie Leeuwarden. De geothermieboring zal alle potentiële lagen passeren en de opbouw wordt daar met gamma ray logging in kaart gebracht.

Tabel 4-6 Meetprogramma locatie Leeuwarden in chronologische volgorde

Wanneer In proces	NR.	Meting type / methode	Eindverantwoordelijk
Tijdens geothermieboring	1	Gamma Ray meting op boorkop geothermieboring	Boorbedrijf / Shell
	2	Interpretatie cuttings	Shell / on-site geoloog boring
	3	Bewaren sedimentsamples uit cuttings voor latere analyse	Shell / on-site geoloog boring
Na geothermieboring	4	Verwerking en analyseren GR data	KWR/Deltares/Shell
Verwerking en conclusies	5		KWR/Deltares/Shell

1. Gamma Ray meting op boorkop; logging while drilling | Boorbedrijf/Shell

Bij diepe (geothermie)boringen worden er standaard metingen gedaan tijdens het boren op de boorkop (Logging While Drilling, LWD). Een zeer vaak uitgevoerde meetmethode is de Gamma Ray (GR) tool. Deze tool meet de GR straling, dit geeft inzicht in de aanwezigheid van klei. Deze tool geeft dus mogelijk inzicht in de formatiegrenzen en lithologische opbouw van de ondergrond. Indien mogelijk is het wenselijk om meerdere LWD-tools te gebruiken die inzicht in andere eigenschappen van de ondergrond kunnen geven (bijv. SP, density, sonic). Voor locatie Leeuwarden zal alleen de GR-tool worden gebruikt tijdens het doorboren van het ondiepe domein van belang voor HTO.

2. Interpretatie cuttings | Shell/on-site geoloog

Tijdens de boring zal het boorgruis, de cuttings, worden bemonsterd door de on-site geoloog. Het is niet geheel duidelijk welke invloed de geothermie-boormethode heeft op de kwaliteit van deze gemengde samples. Het is wenselijk om deze cuttings-analyses op de kleinst mogelijke schaal (bijv. per m) te nemen. Na het nemen van de samples zal een geoloog de samples beoordelen en interpreteren. Dit gebeurt, indien mogelijk, door middel van korrelgrootte analyse en microscopisch onderzoek naar de bestandsdelen.

3. Bewaren sedimentsamples tijdens boring (uit cuttings) | Shell/on-site geoloog

Om op een later stadium nog analyses te kunnen doen van het opgeboorde materiaal zullen de cutting-samples worden opgeslagen. Dit kan bijvoorbeeld uitkomst bieden wanneer het onduidelijk is of het mineraal glauconiet aanwezig is geweest, wat van invloed kan zijn op het gemeten Gamma Ray signaal.

4. Resultaten analyse verkregen en conclusie | KWR/Deltares/Shell

Een combinatie van de data die is verkregen bij de boring in Leeuwarden kan inzicht geven in de lithologie en laagopbouw in de formatie van Maasluis en Oosterhout in de ondergrond van Leeuwarden.

4.3.2 Resultaten geothermieboring, interpretatie en conclusies

Hier beschrijven we in het kort de resultaten en conclusies van de geothermieboring is Q3 is uitgevoerd in Leeuwarden. Bij deze boring zijn twee soorten informatie verkregen:

1. Gamma Ray boorgatmeting (logging while drilling op boorkop)
2. Analyse en interpretatie van de cuttings (boorgruis) door on-site geoloog. Dit is beschreven in een rapport en beschikbaar gesteld door shell.

Deze data zijn gezamenlijk geanalyseerd en beschreven door KWR en Deltares. De analyses en conclusies zijn beschreven in een losse notitie d.d. November 2021, deze is bijgevoegd aan dit rapport in bijlage 5. Een korte weergave staat hieronder.

- De cuttings-analyse is gebaseerd op monster die iedere 10m zijn genomen. Een relatief lage dichtheid van samples. Deze samples laten in de fm. van Maasluis en Oosterhout voornamelijk zandig materiaal zien, en geen duidelijke afsluitende kleilagen. Ook werd er in het onderste gedeelte van de Maassluis fm. en in de fm. van Oosterhout glauconiet aangetroffen (heeft effect op GR signaal). Op basis van de cuttings-analyse zijn er dus geen kleilagen te onderscheiden.
- De Gamma Ray data laat een patroon van hogere en lagere waarden zien in de fm. van Maassluis en Oosterhout. Dit wijst erop dat er mogelijk afwisselingen van zand en klei kunnen

zijn. Echter, deze afwisselingen zijn relatief zwak en slechts over kleine diktes. De GR duidt dit mogelijk op de aanwezigheid van klei, maar ook dit kan met deze dataset niet met volledige zekerheid worden gezegd.

Op basis van beide datasets is geconcludeerd dat de aanwezigheid van een geschikte aquifer die aan de bovenkant wordt afgedekt met een afsluitende laag, niet kan worden aangetoond of uitgesloten. Een proefboring geeft wel genoeg informatie om dit met zekerheid te kunnen zeggen.

Vervolgonderzoek: proefboring

Op basis van de resultaten is geconcludeerd dat de benodigde vervolgstap voor locatie Leeuwarden een proefboring is. Hiervoor zal opnieuw een meetprogramma uitgewerkt moeten worden. De opbouw van de meetprogramma's in Rotterdam en Delft kunnen hiervoor benut worden.

Literatuurlijst

- Anderson, M. P. (2005). Heat as a Ground Water Tracer. *Ground water*, 43(6), 951-968.
doi:10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x
- Beernink, S., Bloemendal, M., & Hartog, N. (2020). *Prestaties en thermische effecten van ondergrondse warmteopslagsystemen / WINDOW fase 1, werkpakket C2*. Retrieved from Nieuwegein:
<https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---c2---prestaties-en-thermische-effecten.pdf>
- Bloemendal, M., & Hartog, N. (2018). Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATEs systems. *Geothermics*, 17, 306-319.
doi:10.1016/j.geothermics.2017.10.009
- Bloemendal, M., Lopik, v. J., Jansen, J. H. F., Drijver, B., Bergen, v. F., Koenen, M., . . . Khoshnevis, N. (2020). *Literatuurstudie Brontechniek / WINDOW werkpakket C1*. Retrieved from Nieuwegein:
- Nordahl, K., & Ringrose, P. S. (2008). Identifying the Representative Elementary Volume for Permeability in Heterolithic Deposits Using Numerical Rock Models. *Mathematical Geosciences*, 40(7), 753.
doi:10.1007/s11004-008-9182-4
- Schout, G., & Hartog, N. (2021, 2021). Effecten van HTO op grondwaterkwaliteit. *Bodem*, 31, 23-25.

Bijlage 1 Methodes boorgatmetingen

Voor de boorgatmeting is gebruik gemaakt van verschillende sondes. In Nesselande worden de Multitool en spectraalgamma sondes van het Duitse bedrijf Antares gebruikt. Met deze sonde worden de volgende metingen verricht.

1. Gamma Ray (GR) meting. Met deze meting wordt de natuurlijke gammastraling van de ondergrond gemeten. In klei komt over het algemeen meer gammastraling vrij vergeleken met zand. Voor de GR resultaten is de gestandaardiseerde eenheid gAPI (gamma-ray American Petroleum Industry) gehanteerd. Met spectraalgamma sonde wordt naast de totale gammastraling ook de afzonderlijke bijdragen van K, U en Th bepaald.
2. Short Normal (SONO) meting. Met een SONO meting wordt de elektrische weerstand (eenheid Ωm) van een beperkte zone (~ 0.5 m) rondom de sonde gemeten. De gemeten elektrische weerstand hangt af van de boorvloeistof, de diameter van het boorgat, het grondwater en de geologische formatie. Bij een open boorgat met zoet grondwater, duidt een relatief lage elektrische weerstand op de aanwezigheid van klei en een hoge elektrische weerstand op zand. In zout grondwater is dit onderscheid vaak minder goed te maken.
3. Long Normal (LONO) meting. De LONO meting is analoog aan de SONO meting, behalve dat bij een LONO meting een groter bereik rondom de sonde wordt meegenomen, waardoor er dieper (~ 1.5 m) in de geologische formatie wordt gemeten.
4. Single Point Resistance (SPR) meting. Bij een SPR meting wordt de elektrische weerstand tussen de bovenkant en de onderkant van de sonde gemeten. De gemeten elektrische weerstand kan alleen kwalitatief worden gebruikt. Bij lithologie-overgangen is vaak een anomalie in de SPR waarden te zien.

In fase 3 en 4 van de monitoringsput put (Delftse hout) in Delft voeren we naast deze metingen ook een deviatie meting uit met een sonde van Century, waarbij de orientatie van het boorgat wordt bepaald aan de hand van magneto- en inclinatiemetingen. Ook wordt de geïnduceerde potentiaal (IP) gemeten, in het tijdsdomein. Daarvoor wordt een sonde van ALT toegepast. Voor de NMR metingen gebruiken wij een sonde van NM RSA, waarmee we de porositeit en de permeabiliteit bepalen.

Bijlage 2 Wateranalyses grondwaterkwaliteit KWR

In onderstaande tabel is het volledige voorgestelde analysepakket weergegeven voor de watermonsters uit de proefboringen.

Analysepakket watermonsters bij HTO proefboringen WINDOW fase II	
<i>Parameter</i>	<i>Voorgestelde analyse (kan afwijken)</i>
Temperatuur, pH, EC, concentratie O ₂ HCO ₃	Veldmetingen Titratie
Anionen: Cl, SO ₄ , NO ₃ , PO ₄ , Br, F	IC
Kationen: Na, Ca, Fe, Mn, K, Mg	ICP-MS
Sporen elementen: minimaal As, B, Ba, Co, Cd, Cr, Mo, Ni, Pb, V	ICP-MS
SiO ₂ , NH ₄	Fotospectrometrie
Opgeloste gassen	Gas chromatografie
DOC, ATP, NGS	Andere

Bijlage 3 Gasanalyses grondwaterkwaliteit TNO

Een deel van het watermonsters wordt gebruikt voor wateranalyses en een ander deel voor gasanalyses. Een dubbele analyse wordt aanbevolen. Dat betekent dat minimaal 4 monsters onder druk genomen moeten worden; 2 voor wateranalyse en 2 voor gasanalyse. De ervaring die is opgedaan in Middenmeer (HTO van ECW) leert ons dat de monstername minstens enkele weken na afronding van de proefboring gedaan dient te worden om de ondergrond condities te laten herstellen en representatieve monsters te kunnen nemen. Bemonstering voor de bepaling van de grondwatersamenstelling zullen uitgevoerd worden door KWR en geanalyseerd worden op de analyselijst in Bijlage 2. De gasanalyses zullen uitgevoerd worden door TNO of Panterra.

De gehalten van argon, zuurstof, stikstof en methaan in het grondwater worden met behulp van een Agilento 7890 gaschromatograaf (GC) bepaald. Hiervoor worden koolstofdioxide, argon, zuurstof, stikstof en methaan na extractie van het water met behulp van helium en via injectie met een gasmonsterkraan, gescheiden op een 30 m HP Molsieve 5A kolom. Detectie vindt plaats met behulp van een thermische geleidbaarheidsdetector (TCD). Voor kalibratie wordt gebruik gemaakt van 2 ijkgasen te weten: SCOT-gas (een mengsel van 0,01 vol % (per stof) van koolstofmonoxide, argon, zuurstof en methaan en 1,0 vol% stikstof in helium) en Nippongas (een mengsel van 3 vol% zuurstof, 5 % vol% (per stof) koolstofdioxide, koolstofmonoxide en stikstof en 4 vol % (per stof) methaan en waterstof in helium). De gaschromatografische bepalingen worden in enkelvoud uitgevoerd. De bepaalde hoeveelheid koolstofdioxide is de hoeveelheid opgelost in water in de vorm van H_2CO_3 . De totale hoeveelheid opgeloste koolstof moet berekend worden uit de resultaten van de wateranalyse en de gasanalyse.

Bijlage 4 Steekmonsters: procedure monstername en analyse

De steekmonster procedure en analyse is maatwerk en moet voor iedere locatie worden uitgewerkt. Hieronder staat kort beschreven welke aspecten belangrijk zijn bij steekmonstername, en, hoe dit doorwerkt in de steekmonstername procedure en analyse.

Steekmonstername

De formaties waaruit steekmonsters genomen gaan worden bij deze pilots zijn vaak ongeconsolideerd/zwak geconsolideerde lagen. Dit betekent dat het sediment weinig stevigheid biedt wanneer het uit de ondergrond wordt gehaald. Steekmonstername van dit type sediment kan een uitdaging zijn, voornamelijk omdat het essentieel is dat de steekmonster de eigenschappen die ze, op diepte en onder invloed van de omgeving, moeten behouden, zodat het een juist beeld geeft van de eigenschappen van de ondergrond.

Representativiteit

Indien de formatie/aquifer die bemonsterd wordt, homogeen is, hoeft er slechts 1 steekkern genomen te worden. Deze is dan representatief voor de gehele laag. Echter, zoals besproken in dit rapport is de ondergrond niet homogeen door het proces van sedimentaire afzetting en latere processen (zoals breukvorming, verdichting, cementatie) die de ondergrond nog hebben veranderd. De mate van heterogeniteit, in zowel de verticale en laterale richting, van de laag die bemonsterd wordt heeft dus invloed op de representativiteit van één enkele steekkern. In de basis is het dus verstandig om meer steekkernen te nemen voor een zeer heterogene laag, dan in een laag die redelijk homogeen is.

Procedure monstername

Op basis van de te verwachten lagen, heterogeniteit en gewenste analyses, kan een plan worden gemaakt voor de monstername. Dit is voornamelijk van belang voor het boorbedrijf. Vragen die daarin beantwoordt staan zijn onder andere:

- Hoeveel steekkernen worden er genomen?
- Op welke dieptes/zones?
- Hoe moeten de steekmonsters worden behandeld/verpakt na monstername?
- Welke grootte/dimensies moeten de steekmonsters zijn?
- Hoe worden de steekmonsters opgeslagen en verwerkt?

Analyses steekmonsters

Uiteindelijk, na monstername, worden de steekkernen geanalyseerd. Dit gebeurt voor het grootste gedeelte in een geofysisch lab. Het is belangrijk om goed na te denken over de analyses die uitgevoerd gaan worden:

- welke analyses?
- In welke volgorde?
- In welk lab?

Voor sommige analyses, zoals doorlatendheidstesten of CT-scans, is het essentieel dat de steekkernen nog volledig de natuurlijke situatie representeren. Sommige analyses beïnvloeden de eigenschappen van de sample, zoals doorlatendheids-pomptesten; door water door de sample heen te pompen veranderen de geochemische eigenschappen en kunnen deze niet meer worden

bemonsterd. Sommige analyses nemen weer samples uit de steekkern, wat er voor zorgt dat de sample niet meer één origineel geheel is. Al deze factoren moeten worden meegenomen om een optimale analyseprocedure te ontwikkelen, zodat alle hydrogeologische, geochemische en microbiologische eigenschappen van de steekkern onderzocht kunnen worden. Al deze zaken zijn zeer locatie specifiek. De daadwerkelijke uitgewerkte steekmonsterprocedures, per locatie, worden momenteel ontwikkeld maar zijn nog geen onderdeel van dit rapport.

Bijlage 5 Notitie resultaten Leeuwarden – November 2021

--- START NOTITIE ---

Notitie: potentie ondergrond in Leeuwarden voor hoge temperatuur opslag (HTO) | WarmingUP thema 5

Auteurs:

- Stijn Beernink, KWR
- Pieter Pauw, Deltares
- Pieter Doornenbal, Deltares
- Niels Hartog, KWR

Aanleiding

In WarmingUP thema 5, het WINDOW project, worden drie HTO pilotlocaties uitgewerkt. Een daarvan is locatie Leeuwarden. Deze locatie is in de 1e fase van dit programma bestempeld als positieve en kansrijke locatie (Zwamborn et al. 2020).

De grootste onzekerheid qua potentie voor HTO op deze locatie is de geschiktheid van de ondergrond voor HTO omdat er tot op heden geen diepe boringen gedaan zijn in de omgeving van de beoogde pilotlocatie in Leeuwarden. Een aquifer is het meest geschikt voor HTO wanneer het een goed doorlatende laag (bijv. zand) van voldoende dikte betreft en boven (primair belang) en onder (secundair belang) wordt begrensd door afsluitende lagen (bijv. klei). In de 1e fase van het WINDOW project zijn de volgende criteria vastgesteld:

- Dikte opslagpakket > 15m
- Horizontale doorlatendheid opslagpakket >5 m/d
- Dikte afsluitende laag >5m

Op basis van regionale modellen en diepe boringen op >10 km afstand, zijn er 3 potentiële formaties te onderscheiden in de ondergrond van Leeuwarden, op de volgende dieptes: Peize Fm. van 100 tot 250m diepte, Fm. van Maassluis van 250 tot 350m diepte en de Fm. van Oosterhout vanaf 350 meter diepte. De exacte dieptes en overgangen zijn onzeker. In de 1e fase van het project is de formatie van Maassluis als meest geschikt beoordeeld in de ondergrond van Leeuwarden (verkenning Leeuwarden). De aanwezigheid van afsluitende kleilagen in de Fm. van Maassluis is essentieel voor de bruikbaarheid van deze formatie voor HTO, maar is momenteel zeer onzeker. Er is daarom besloten om de geothermieboring die onlangs (Q3 2021) is verricht in Leeuwarden te gebruiken om meer inzicht in de ondergrond te krijgen om deze onzekerheid te verkleinen.

Deze notitie beschrijft enkele bevindingen met betrekking tot de potentie voor HTO op deze locatie op basis van de informatie die is verkregen tijdens de geothermieboring in Leeuwarden. Hierbij zijn boorgatmetingen (uitgevoerd tijdens het boren; 'logging while drilling' (LWD)), boorgruismonsters ('cuttings') en lithologische en geologische interpretaties verkregen. Omwille van vertrouwelijkheid worden de ruwe data en achterliggende analyses in beperkte mate gepresenteerd.

Verkregen data uit geothermieboring

Gamma Ray log

Een belangrijke LWD parameter die gebruikt is in deze analyse is de Gamma Ray (GR) straling. Er waren twee GR datasets beschikbaar (Gamma en Memgamma), welke op hoofdlijnen eenzelfde beeld gaven.

De GR meting is een maat voor de natuurlijke gammastraling van de ondergrond. Kleiig materiaal leidt tot meer gammastraling dan zandig materiaal. Voor de GR resultaten wordt vaak de gestandaardiseerde eenheid gAPI (gamma-ray American Petroleum Industry) gehanteerd. Een hoge gAPI waarde duidt op de aanwezigheid van klei, een lage gAPI waarde duidt op zand. Er zijn, naast klei en zand, ook een aantal andere factoren die invloed hebben op het gamma signaal, zoals de boorvloeistof en mineralen zoals glauconiet. Daarnaast is de snelheid van loggen en de diameter van het boorgat van invloed. Het is niet precies bekend in hoeverre de GR die gemeten is tijdens het boren (LWD) verschilt met die van een conventionele GR meting die na het boren gemeten wordt met gekalibreerde boorgatmeetsondes. Voor het doel van deze notitie wordt er vanuit gegaan dat de LWD GR resultaten relatieve verschillen in lithologische eigenschappen weergeven.

Geologische beschrijving o.b.v. boorgruis (cuttings) analyse

Op een diepte van 230 – 340m, tijdens het doorboren van de doellagen (Fm. van Maassluis en een stuk van daarboven/onderliggende Formaties) zijn iedere 10 meter monsters genomen van het boorgruis dat omhoog komt tijdens de boring. Dit is uitgevoerd en geanalyseerd door de “on site” geoloog in het veldlaboratorium. De volgende analyses zijn uitgevoerd op de samples:

- Beschrijving fijne fractie
- Beschrijving grove fractie
- Korrelgrootte verdeling
- Petrografische beschrijving (percentage type materialen in sample)

De geanalyseerde samples zijn niet representatief voor de doorboorde 10m, maar geven een overzicht van het boorgruis op iedere 10^e meter. Het is dus onduidelijk wat de geologische opbouw is tussen de sample dieptes. Daarnaast heeft de boormethode invloed op de kwaliteit van de samples die van het boorgruis genomen kunnen worden. Bij een geothermieboring (spoelboring) is er grote kans dat het boorgruis ongelijkmatig naar boven komt, en, het boorgruis wordt vermengd met sediment van de zijkant van het boorgat tijdens het verticale transport richting maaiveld.

Resultaten

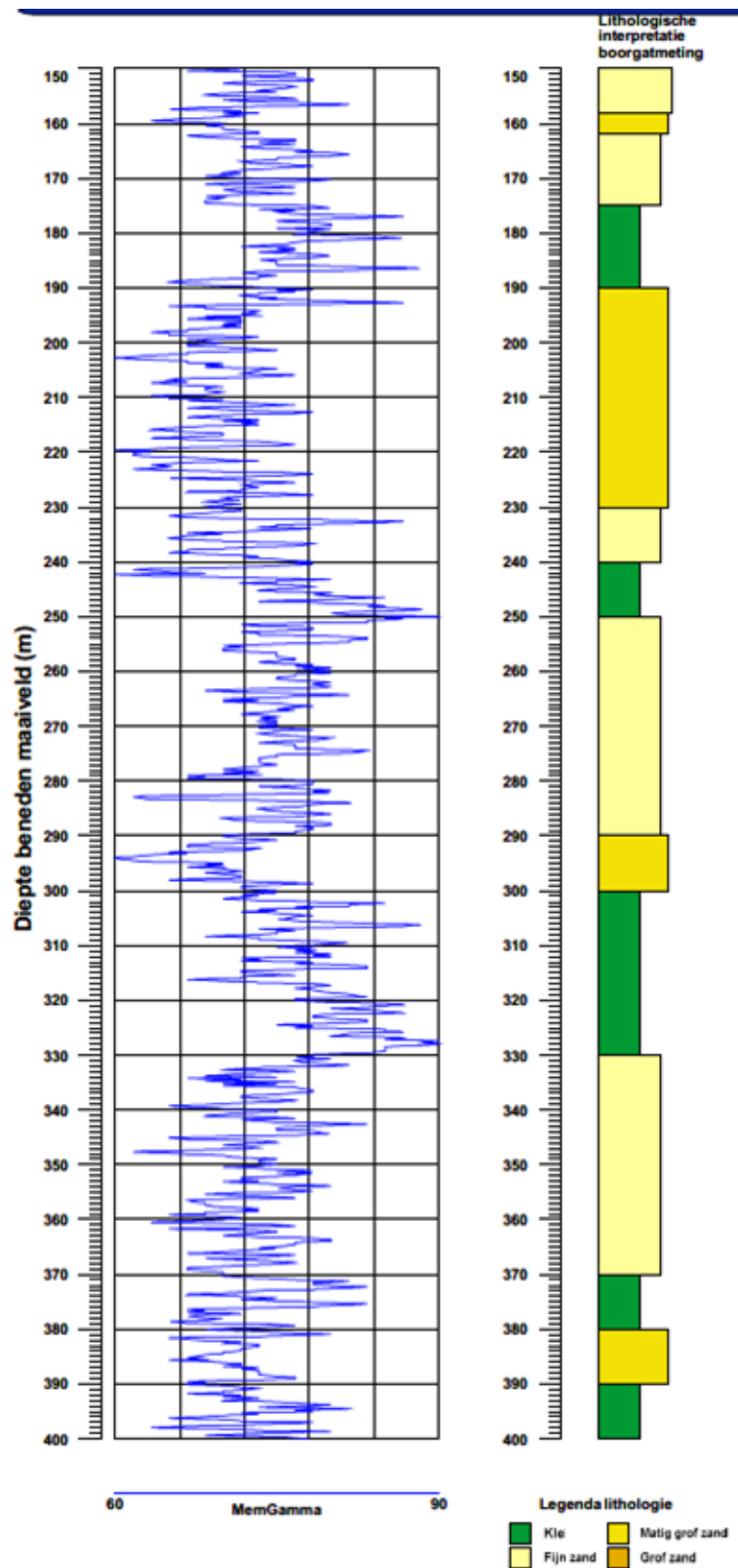
Gamma Ray data

Op basis van het relatief hogere GR signaal (Figuur 1) zijn op de dieptetrajecten van 240-250 en 300-330 m -mv mogelijk kleilagen aanwezig. Tussen de 250 en 290 m-mv zijn de GR signalen relatief wat lager en zou een fijn zandig pakket aanwezig kunnen zijn. Op een diepte van 290 tot 300 m -mv zijn de GR waarden nog lager en zou dan een matig grove zandlaag aanwezig kunnen zijn. Vanaf > 320 m-mv, in het onderste deel van de Maassluis formatie, is de aanwezigheid van het mineraal glauconiet beschreven in de cuttinganalyse. Omdat glauconiet houdend zand ook een hogere GR signaal geeft, zou dit ook het hogere GR signaal in dit traject kunnen veroorzaken. Het is niet te zeggen wat de hoeveelheid glauconiet is en hoe dit doorwerkt in het GR signaal. Naast deze overgangen tussen trajecten op een schaal van tientallen meters met gemiddeld hogere en lagere GR signalen laat de Gamma Ray ook variatie op een kleinere schaal zien (< 1m, Figuur 1). Dit kan erop duiden dat er een afwisseling is van dunne zandiger en kleiiger laagjes binnen een geïnterpreteerde lithologische klasse.

Cuttings-analyse door “on-site” geoloog

De resultaten van de cuttings-analyse, die iedere 10^e meter zijn genomen en zijn beschreven door de on-site geoloog, zijn hieronder opgesomd.

- Peize Fm. en Fm. van Maassluis bestaan uit vergelijkbaar materiaal, overgang moeilijk zichtbaar op basis van cuttings (voornamelijk fijn zand >65% [0.15-0.5mm])
- Vanaf onderste deel van Fm. van Maassluis (>320m diepte) naar Fm. van Oosterhout duidelijk een overgang naar meer kleiig/mergel materiaal
- Onderste deel Fm. van Maassluis en de gehele Fm. van Oosterhout bevatten glauconiet
- Een afsluitende laag aan de top van de Fm. van Maassluis kon niet worden geverifieerd op basis van de cuttings-interpretatie
- Een afsluitende laag aan de onderkant van de Fm. van Maassluis kon niet worden geverifieerd op basis van de cuttings-interpretatie



Figuur 1 Gamma Ray signaal en geïnterpreteerde (mogelijke) lagen.

Conclusies en aanbevelingen

Over de bodemgeschiktheid van de locatie Leeuwarden voor HTO

Op basis van de cuttings analyse lijken er geen dikke (>10m) afsluitende lagen aanwezig te zijn in de Fm. van Maassluis. Vanwege de gebruikte boringsmethode en de wijze van bemonsteren van de cuttings kunnen geen conclusies worden getrokken over de eventuele aanwezigheid van dunnere afsluitende lagen. De zones met hogere natuurlijke GR waardes kunnen zowel wijzen op een grotere aanwezigheid van klei en/of glauconiet-houdend zand. Hoewel dit dus zou kunnen duiden op de aanwezigheid van dunne kleiig ontwikkelde lagen in de Fm. van Maassluis geven deze hogere GR waardes dus geen uitsluitsel hierover.

Met de data verkregen tijdens de geothermieboring valt de aan- of afwezigheid van 1 of meerdere kleilagen binnen het traject van de Formaties van Maassluis niet aan te tonen of uit te sluiten.

Hierdoor ontbreekt voor deze formatie inzicht in een aspect dat in belangrijke mate de geschiktheid voor een HTO systeem bepaalt. Een proefboring met de zuigboor luchtlift methode, waarbij o.a. een gedetailleerde geologische beschrijving en een combinatie van logging tools wordt gebruikt, kan wel uitsluitsel geven over de geschiktheid van een geschikte zandlaag binnen deze formaties voor HTO.

Over de mogelijkheden van geothermieboringen als bron van informatie voor HTO-potentie

Deze analyse van de verkregen data laat zien dat het al snel lastig is om alleen op basis van data die bij een conventionele geothermieboring wordt verkregen te bepalen of de ondiepe ondergrond geschikt is voor HTO. Bijvoorbeeld door het ontbreken van een duidelijk contrast tussen dikke kleilagen en kleiarne (grovere) zandlagen. Daarnaast kan ook door de (mogelijke) aanwezigheid van het mineraal glauconiet niet eenduidig geconcludeerd worden dat een hoge GR waarde bij een kleilaag behoort, terwijl het ook een glauconiet houdend zand zou kunnen zijn. Met bepaalde toevoegingen en aanpassingen hebben geothermieboringen echter wel de potentie om een waardevolle bron van informatie voor de evaluatie van HTO-potentie te zijn, ook voor de ondiepe ondergrond, bijvoorbeeld door:

1. De Logging While Drilling toolset uit te breiden: naast GR ook andere logging tools gebruiken om de geschiktheid van de ondergrond voor HTO beter te kunnen interpreteren. Een Spectral GR tool zou bijvoorbeeld onderscheid kunnen maken tussen klei en andere materialen die het GR signaal beïnvloeden. Daarnaast bestaan er nog vele LWD tools die gebruikt kunnen worden om meer inzicht in formatiegrenzen te krijgen (bijv. Inductie, SP) of om een idee van de (geo)hydrologische eigenschappen te krijgen (bijv. Density, Neutron, Sonic).
2. De 1^e stap van een geothermieboring project, de boring waarbij de conductor wordt geplaatst, met een zuigboring/luchtlift methode uit te voeren. Dit maakt het mogelijk om een gedetailleerde en precieze lithologische beschrijving te doen tijdens het boren. Ook zou dit de mogelijkheid geven om een uitgebreide set aan logging tools te gebruiken (in het open boorgat na het boren), steekmonsters te nemen voor lab-analyses en -tests of om pomptesten te doen in potentiële aquifers (vergelijkbaar met een toegewijde HTO proefboring).

--- EINDE NOTITIE ---

**Adres**

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht

Postadres

Postbus 80015
3508 TA Utrecht

Telefoon

088 866 42 56

E-mail

contact@warmingup.info

Website

www.warmingup.info