

Toepasbaarheid van Active Heated Distributed Temperature Sensing voor detectie en kwantificatie van grondwaterstroming en colmatie in grindsuppleties van de Gemeenschappelijke Maas



Toepasbaarheid van Active Heated Distributed Temperature Sensing voor detectie en kwantificatie van grondwaterstroming en colmatie in grindsuppleties van de Gemeenschappelijke Maas

Auteur(s)

Pieter Doornenbal

Henk Kooi

Toepasbaarheid van Active Heated Distributed Temperature Sensing voor detectie en kwantificatie van grondwaterstroming en colmatie in grindsuppleties van de Gemeenschappelijke Maas

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	De heer Frank Collas
Trefwoorden	Active Heated DTS, monitoring, grondwaterstroming, colmatie, Gemeenschappelijke Maas

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	16-02-2026
Projectnummer	11211549-001
Document ID	11211549-001-ZWS-0001
Pagina's	36
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Pieter Doornenbal Henk Kooi	

Samenvatting

Achtergrond

Bij de Gemeenschappelijke Maas slibt het grindbed dicht waardoor er een lagere biodiversiteit kan ontstaan. Het dichtslibben van het grindbed (colmatie) treedt op in de hyporheïsche zone, waarin een actieve uitwisseling is tussen stromend water in de rivier en het water in het grindbed. Rijkswaterstaat wil bij geplande grindsuppleties inzicht krijgen in hoe grondwaterstroming en colmatie zich ontwikkelen na aanleg van het grindbed. Traditionele methoden voor langdurige monitoring van stroming onder een rivier zijn complex en kostbaar, waardoor behoefte ontstond aan de inzet van innovatieve technieken. Dit project onderzoekt daarom de toepasbaarheid van Active Heated Distributed Temperature Sensing (AH-DTS) als methode om grondwaterstroming en verstopping in grindpakketten in de rivierbodem te detecteren en kwantificeren.

Het uiteindelijk doel is een meetmethode te ontwikkelen waarmee veranderingen in grondwaterstroming en colmatie betrouwbaar kunnen worden gevolgd. AH-DTS maakt gebruik van glasvezelkabels die actief worden verwarmd, waarbij de temperatuurespons inzicht geeft in stromingssnelheden en thermische eigenschappen van het grind. Binnen dit project zijn hierin de volgende onderdelen onderzocht: (0) vaststellen of AH-DTS stromingsveranderingen kan meten, (1) schatten van de verwachte grondwaterstromingssnelheid in de aangebrachte grindsuppletie (2) bepalen of vrije convectie de metingen beïnvloedt, en (3a) schatten van de thermische geleidingscoëfficiënt van het te suppleren grind en (3b) grootschalige labmeting voor grondwaterstroming met AH-DTS metingen in grondwaterstromingsgoot met grof zand. Deze stappen vormen de basis voor een robuust ontwerp en toekomstige veldtoepassing. Het robuust ontwerp en de toekomstige veldtoepassing zijn geen onderdeel van dit project.

Conclusie

De conclusies van de stappen zijn de volgende:

Stap 0

De opwarmrespons van de AH-DTS-kabel wordt bepaald door zowel de grondwaterstromingssnelheid rond de kabel als de effectieve thermische geleidingscoëfficiënt van het grindpakket. Verstopping met fijne fracties verhoogt deze geleidbaarheid en beïnvloedt daarmee de gemeten temperatuurespons. Veranderingen in stroming en verstopping leiden tot verschillende temperatuureffecten, die naar verwachting van elkaar te onderscheiden zijn. Grondwaterstromingen en veranderingen daarin vanaf ongeveer 1 m/dag kunnen met deze techniek worden gedetecteerd, al neemt het onderscheidend vermogen af bij hogere thermische geleidbaarheid van het grind. Om die reden is inzicht in deze geleidbaarheid belangrijk.

Stap 1

Uit de literatuur komt naar voren dat de hyporheïsche stroming sterk kan variëren door verschillen in rivierpeil, bodemvormen, turbulente interacties en hydro-(dynamische) gradiënten, waardoor onder de Gemeenschappelijke Maas lokaal hoge snelheden kunnen optreden.

Stap 2

Uit literatuur en simulaties blijkt dat vrije convectie bij een verticale AH-DTS-kabel naar verwachting geen significante invloed heeft, al kan dit niet volledig worden uitgesloten vanwege modelbeperkingen op porieschaal.

Stap 3a en b

Op basis van de metingen in de grindkolom wordt de geleidingscoëfficiënt van het te suppleren grind geschat op $3,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, met een ondergrens van $2,8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ en een bovengrens van $4,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Deze waarde ligt relatief hoog in vergelijking met gangbare waarden voor bijvoorbeeld zand. Dat is minder gunstig voor de detectie van grondwaterstroming. Door het gebruik van een relatief hoog vermogen op de AH-DTS-kabel kan echter toch een voldoende hoge temperatuurdifferentiatie worden gerealiseerd, waardoor detectie mogelijk blijft. Daarnaast laten de resultaten van de proeven met de AH-DTS kabel in de grondwatergoot in een ander TKI project de potentie zien om in de verticaal over meerdere meetpunten de grondwaterstroming te meten.

Aanbevelingen

De aanbevelingen richten zich op het verder uitwerken van het ontwerp van de meetopstelling en meetlocaties en het operationaliseren van de inversiemethode voor temperatuurrepons met de AH-DTS-techniek om grondwaterstroming en colmatie te bepalen. Voor het ontwerp wordt geadviseerd om de ruimtelijke dekking zorgvuldig te bepalen, verticale kabels met kleine onderlinge afstanden te plaatsen en referentielocaties op te nemen waar weinig colmatie wordt verwacht en een locatie waar veel colmatie wordt verwacht. Bij het operationaliseren van de methode is het belangrijk om de optimale opwarmtemperatuur en hersteltijd vooraf vast te stellen, consistente opwarm- en afkoelcycli toe te passen om variabiliteit te kwantificeren, en aanvullende gegevens over grondwaterstanden, rivierstanden en hydraulische gradiënten te verzamelen. Ook wordt aanbevolen om de thermische geleidbaarheid van het lokale grind van de locatie waar een pilot zou worden uitgevoerd opnieuw in het lab te meten om de interpretatie van de temperatuurdata te verbeteren.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Inhoud	6
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Uitgevoerde werkzaamheden 2024	8
1.3	Doelstelling	8
1.4	Aanpak 2025	9
1.5	Lees wijzer	10
2	Uitvoering en resultaten	11
2.1	Stap 0: verkennende simulatiestudie	11
2.1.1	Conclusies	11
2.1.2	Toelichting	11
2.2	Stap 1: Verwachte grondwaterstromingssnelheid	15
2.2.1	Conclusies	15
2.2.2	Toelichting	15
2.3	Stap 2: Invloed van vrije convectie	17
2.3.1	Conclusies	17
2.3.2	Toelichting	17
2.4	Voortzettingsbeslissing 1	20
2.5	Stap 3a: Labmeting geleidingscoëfficiënt suppletiegrind	21
2.5.1	Conclusies	21
2.5.2	Toelichting	21
2.5.3	Uitvoering van meting	23
2.5.4	Schatting thermische geleidingscoëfficiënt	24
2.6	Voortzettingsbeslissing 2	25
2.7	Stap 3b: Grootschalige labmeting voor grondwaterstroming met AH-DTS metingen in grondwaterstromingsgoot met grof zand	26
2.7.1	Conclusies	26
2.7.2	Toelichting	26
2.7.3	Schatting thermische geleidingscoëfficiënt	27
2.7.4	Relatie opwarmcurves en stromingen	29
3	Discussie en conclusie	32
4	Aanbevelingen	33
4.1	Ontwerp van de meetopstelling en meetlocatie	33
4.2	Operationaliseren van de inversiemethode	33

	Referentielijst	34
A	Achtergrond uit SITO-PS projectplan	35

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Gemeenschappelijk Maas is een grindrivier op de grens van Nederlands Limburg en België. Grindrivieren bieden onder goede omstandigheden een habitat voor een grote diversiteit aan macrofauna (ook: macro-invertebraten zoals larven, wormen, slakken, kreeftjes en schelpdieren). De macroinvertebratengemeenschap in de Gemeenschappelijk Maas voldoet op dit moment echter niet aan de Kaderrichtlijn Water. Een van de mogelijke oorzaken voor de lage biodiversiteit is het dichtslibben van het substraat in het zomerbed. Dit morfodynamische proces zorgt voor verdichting van het substraat en verandering in en reductie van de hyporheïsche zone (deel van rivierbedding en -oevers waarin menging van rivier- en grondwater optreedt). Macroinvertebraten gebruiken de hyporheïsche zone als permanent, of tijdelijk habitat (bijvoorbeeld gedurende bepaalde levensstadia, of als schuilplaats bij hoge afvoeren of vervuiling). Het dichtslibben van de hyporheïsche zone werkt negatief door op de fauna, enerzijds door vermindering van de habitat, en anderzijds de afname van kwaliteit van de habitat door de verminderde hyporheïsche stroming en zuurstofbeschikbaarheid.

In het kader van de ontwikkeling van de Gemeenschappelijke Maas in Limburg, waarbij grindsuppleties worden toegepast, wil Rijkswaterstaat samen met kennisinstututen de kennis vergroten over grondwaterstromingscondities in het aan te brengen grindbed. Een fundamentele vraag is o.a. óf en hoe de grondwaterstromingscondities in het grindbed veranderen in de maanden tot jaren nadat het grind is aangebracht.

Het karakteriseren van grondwaterstroming onder de stromende rivier is bijzonder uitdagend. Met name voor monitoring van de stroming over langere perioden is het noodzakelijk om te zoeken naar nieuwe mogelijkheden. In verband hiermee is Deltares in mei 2024 door Rijkswaterstaat gevraagd te onderzoeken welke mogelijkheden AH-DTS biedt.¹ Hiervoor heeft Rijkswaterstaat budget beschikbaar gesteld binnen de SITO-PS programmering met Deltares (zie bijlage A voor achtergrond uit SITO-PS plan).

1.2 Uitgevoerde werkzaamheden 2024

In 2024 zijn besprekingen geweest met Rijkswaterstaat, Universiteit Utrecht en Radboud Universiteit Nijmegen om te bepalen wat er gemeten moet gaan worden. Daaruit is naar voren gekomen dat naast de achtergrond temperatuur van het rivierwater de grondwaterstroming onder het grindbed kwantitatief bepaald zou moeten worden. Daarnaast zijn verkennende veldmetingen gedaan om de potentie van varianten van de meettechniek te onderzoeken en om inzicht te krijgen in de veldsituatie. Op basis daarvan is besloten dat de aandacht uitgaat naar horizontale grondwaterstromen in het grindbed die worden gemeten met een verticale glasvezelkabel

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het werk dat in dit rapport wordt gepresenteerd is het verkrijgen van inzicht in de toepasbaarheid van Active Heated Distributed Temperature Sensing (AH-DTS) als methode voor het detecteren en kwantificeren van grondwaterstroming en colmatieprocessen in grindsuppleties in de Gemeenschappelijke Maas.

¹ AH-DTS wordt door Deltares met name ingezet voor grondwaterstromingsmonitoring rond de onttrekkingsputten van grondwaterwinningen.

1.4 Aanpak 2025

In een memo d.d. 14 februari 2025 is door Deltares een gefaseerd plan van aanpak (voor 2025) voorgesteld die in samenspraak met Rijkswaterstaat is opgesteld. In de aanpak zijn de volgende zes stappen (0 t/m 5) onderscheiden en twee tussentijdse beslismomenten:

Stap 0

Verkenning van de haalbaarheid door middel van een computersimulatie (uitgevoerd januari 2025). Na de positieve resultaten uit de verkenning is besloten om verder te gaan met de volgende stappen. Uit de verkenning is naar voren gekomen dat grondwaterstromingsnelheden boven de ca. 1 m/dag met de AH-DTS methode te bepalen zijn. Daarnaast is naar voren gekomen dat het van belang is om de thermische geleidingscoëfficiënt van het te suppleren grind te onderzoeken omdat het oplossend vermogen voor de bepaling van de grondwaterstromingsnelheid afneemt bij een hoge(re) geleidingscoëfficiënt.

Stap 1

Schatten van de verwachte grondwaterstromingsnelheid in de aangebrachte grindsuppletie(s) in de Gemeenschappelijk Maas door middel van een kort literatuuronderzoek.

Stap 2

Bepalen in hoeverre vrije convectie rond de meetkabel (door lokale opwarming en dichtheidsafname van het grondwater) een belemmering kan vormen voor de meting van de grondwaterstroming en geleidingscoëfficiënt van het grind.

Voortzettingsbeslissing 1

Wanneer de grondwaterstromingsnelheid lager is dan ca. 1 m/dag en/of er redelijkerwijs verwacht wordt dat vrije convectie de interpretatie van de metingen zal compliceren, dan moet overwogen worden verdere stappen achterwege te laten.

Stap 3a

Schatten/bepalen van de verwachte thermische geleidingscoëfficiënt van het (te suppleren) grind van de Gemeenschappelijke Maas door middel van een thermische responstest met de AH-DTS methode op een vergelijkbare grindsamenstelling van de Gemeenschappelijk Maas in een laboratoriumopstelling.

Stap 3b

Extra uitgevoerde werkzaamheden. Daarnaast is in een ander TKI project (Deltares referentie 11210224) waarin grondwaterstroming werd opgezet in het laboratorium om sensoren te testen, eenzelfde AH-DTS glasvezelkabel geïnstalleerd. De verzamelde data zijn nog niet volledig gedetailleerd uitgewerkt, maar laat wel zien dat de AH-DTS-methode geschikt is om ruimtelijke verschillen in thermische geleidbaarheid vast te stellen. Daarnaast illustreren de metingen de invloed van de grondwaterstroming op de temperatuurrepons

Voortzettingsbeslissing 2

Wanneer de geleidingscoëfficiënt dusdanig groot is dat bij toepassing van een groot vermogen de gevoeligheid voor grondwaterstroming te gering is, dan moet overwogen worden verdere stappen achterwege te laten. Indien deze beslissing positief is, worden geen praktische belemmeringen voor doelmatige inzet van AH-DTS verwacht.

Stap 4

Ontwerp

Stap 5

Operationaliseren van de inversiemethode.

In 2025 zijn de stappen 0 tot en met 3 uitgevoerd.

1.5 Lees wijzer

In hoofdstuk 2 worden de stappen 0 tot en met 3 beschreven. Elke stap begint met een korte introductie gevolgd door de belangrijkste conclusies, waarna een toelichting wordt gegeven op de gekozen aanpak en de wijze waarop de resultaten zijn verkregen. Deze opbouw is gekozen om de kernboodschap direct duidelijk te maken, mocht er behoefte zijn aan meer diepgang dan kan de aanvullende toelichting gelezen worden.

In hoofdstuk 3 worden de bevindingen besproken en afgezet tegen het onderzoeksdoel en de algemene conclusie besproken. Aansluitend volgt hoofdstuk 4, waarin aanbevelingen worden gegeven voor het uitvoeren van stap 4 en 5.

2 Uitvoering en resultaten

In dit hoofdstuk worden de uitvoering en resultaten van de stappen 0 tot en met 3 uit het plan van aanpak toegelicht. Daarnaast zijn inzichten vanuit het andere TKI project met de AH-DTS kabel gepresenteerd in paragraaf 2.7.

2.1 Stap 0: verkennende simulatiestudie

In januari en begin februari 2025 heeft Deltares de mogelijkheden/haalbaarheid van AH-DTS in algemene zin met computersimulaties onderzocht. De resultaten daarvan zijn op 10 februari besproken in een MS-teams meeting.

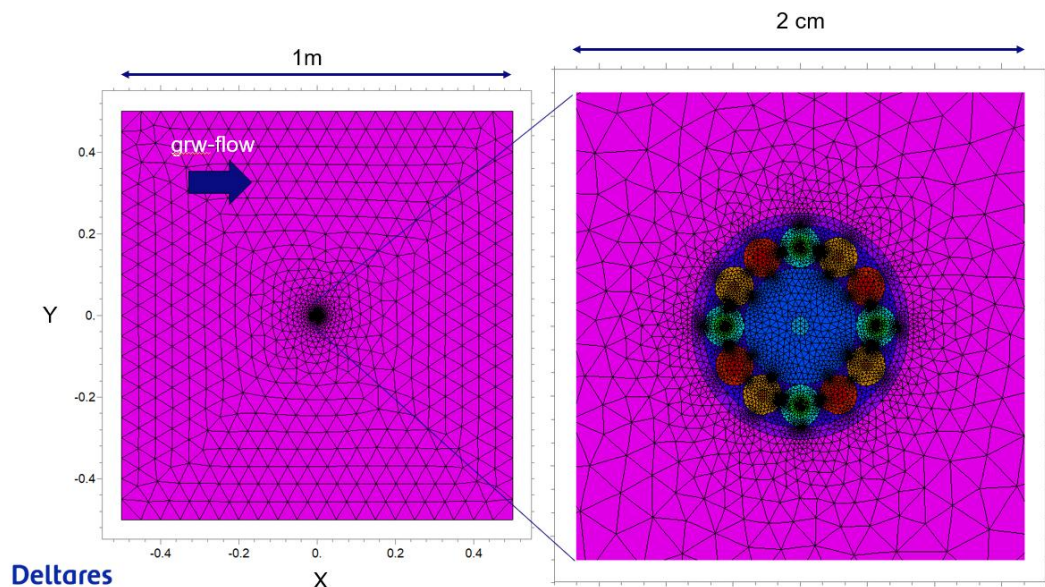
2.1.1 Conclusies

De hoofdbevindingen van de verkenning zijn:

- De opwarmingsrespons van de AH-DTS kabel wordt bepaald door (i) de grondwaterstromingsnelheid rond de kabel en (ii) de effectieve geleidingscoëfficiënt van het grindpakket rond de kabel. Door verstopping (Engels: colmation) van het grind met een fijne fractie zal de geleidingscoëfficiënt naar verwachting toenemen en de respons mede beïnvloeden.
- Effecten van verandering van grondwaterstroming en verstopping op de metingen zijn verschillend en kunnen naar verwachting worden onderscheiden.
- Grondwaterstromingsnelheden en grondwaterstromingsnelheidsveranderingen in de orde van grootte van 1 m/dag of meer zijn naar verwachting vast te stellen met de techniek. Het oplossend vermogen van de techniek neemt af naarmate de geleidingscoëfficiënt van het grind toeneemt. Inzicht in de verwachte geleidingscoëfficiënt (stap 3) is dus belangrijk.

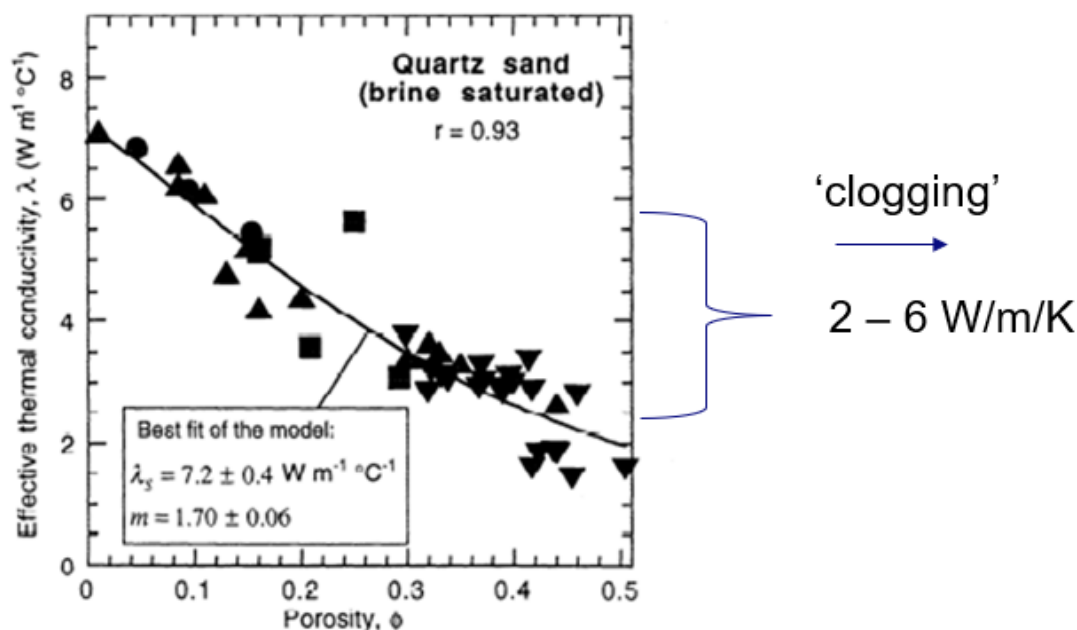
2.1.2 Toelichting

De berekeningen zijn gedaan voor een rechthoekig domein (1 m x 1 m) loodrecht op de AH-DTS kabel (Figuur 2-1). De kabel heeft een diameter van ca. 1 cm en is in het hart van het domein gepositioneerd.



Figuur 2-1: Visualisatie van het domein en het eindige elementen netwerk voor een simulatie met in het centrum de AH-DTS kabel. Rechts is ingezoomd op de onderdelen waar de kabel uit bestaat.

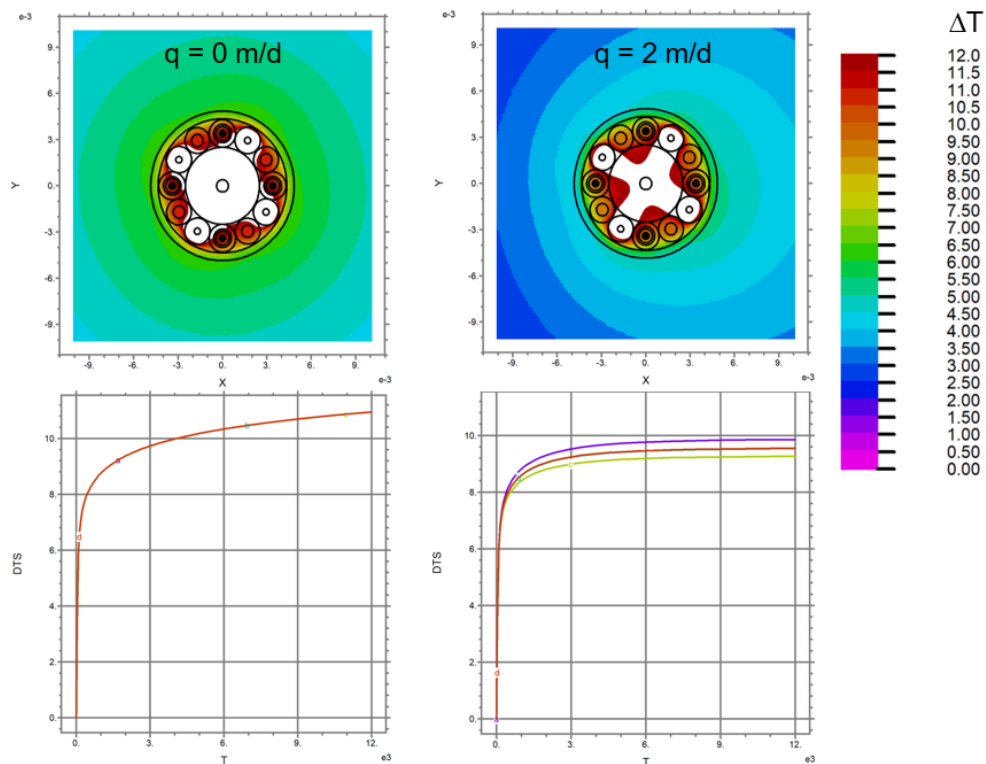
Thermische eigenschappen (geleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit) zijn toegekend aan zowel het bodemmateriaal rond de kabel als aan alle onderdelen binnen de kabel. Als eerste stap wordt een (stationair) grondwaterstromingsveld berekend op het domein waarin het grondwater rond de kabel stroomt (omdat de kabel ondoorlatend is voor grondwaterstroming). Als tweede stap wordt met dit stationaire stromingsveld een tijdsafhankelijke simulatieberekening gedaan van het warmtetransport en de temperatuurontwikkeling op het domein door opwarming van de opwarmkabels binnen de kabel. In de simulatieberekening wordt de temperatuurontwikkeling gemonitord voor elk van de vier DTS vezels die zich in de kabel bevinden. Dit levert een schatting van de verwachte meetresultaten voor een specifieke veldmeting onder de betreffende condities (grondwaterstroming en eigenschappen van het bodemmateriaal). De berekeningen zijn gedaan met een eindige elementen pakket (FlexPDE 7.1) voor het oplossen van partiële differentiaalvergelijkingen (in dit geval voor grondwaterstroming en voor warmtetransport met geleiding en advectie).



Figuur 2 bewerkt uit Revil (2000) waarin de thermische geleidbaarheid is bepaald voor schone zanden met brine en zandstenen. Door het effect van colmatie (verstopping) zal de porositeit afnemen en de thermische geleidbaarheid toenemen.

De berekeningen zijn gedaan voor metingen met een duur van 12000 seconden (200 minuten) bij constant vermogen van 8.79 W/m voor elk van de vier opwarmkabels in de kabel. De gevoeligheid van de meetresultaten is onderzocht voor grondwaterstromingssnelheden van 0, 1, 2, 5 en 10 m/d en geleidingscoëfficiënten van 1.6 en 3.2 W/m/K. De toename van de thermische geleiding is toe te schrijven aan het dichtslibben van het grindpakket door fijne delen waardoor de porositeit afneemt en er meer warmteoverdracht kan ontstaan door de mineralen (zie Figuur 2). Het gebruiken van 1.6 en 3.2 W/m/K, een factor 2, in de simulaties is gedaan voor de gevoeligheidsanalyse.

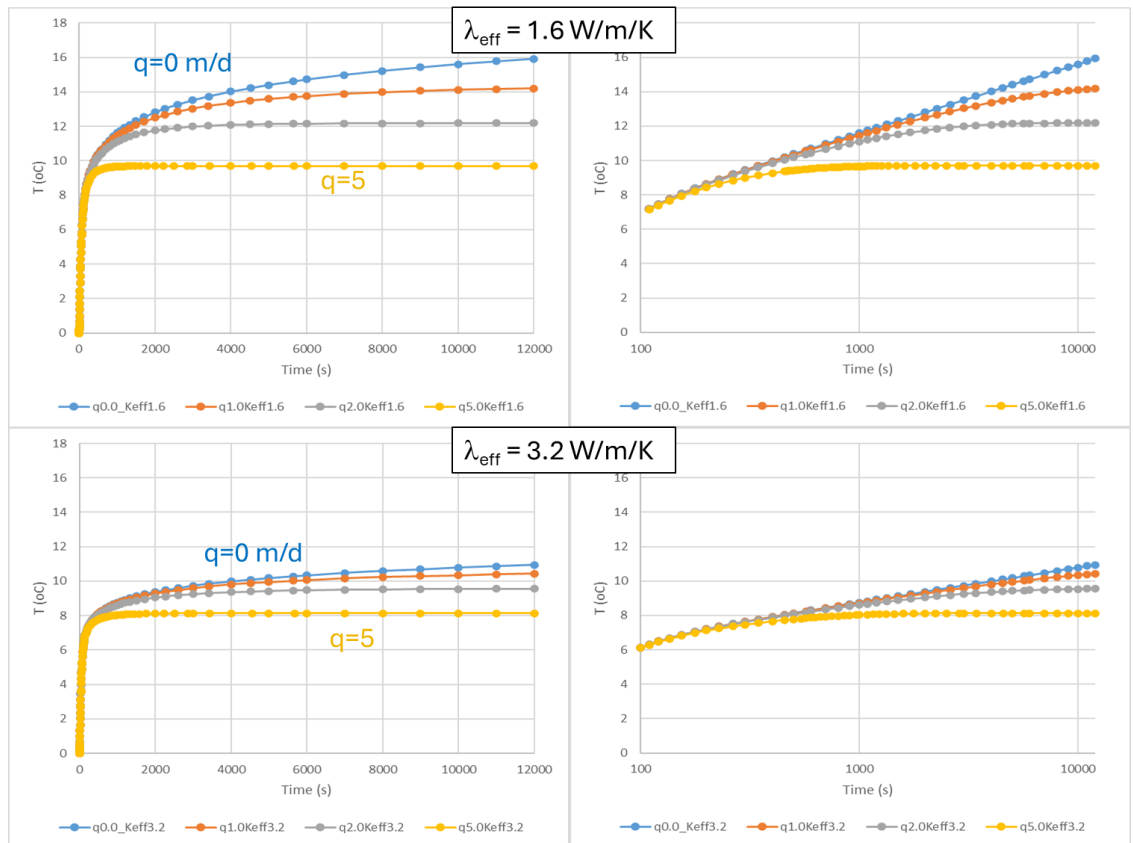
Figuur 2-3 toont een resultaat van een simulatie zonder (links) en met (rechts) grondwaterstroming. Zonder grondwaterstroming neemt de temperatuur van de DTS vezels tot het eind van de meting toe en is de temperatuurontwikkeling in elk van de DTS vezels hetzelfde. Met grondwaterstroming wordt de temperatuurontwikkeling 'afgevlakt' en ontstaan verschillen in temperatuur tussen DTS vezels (door verschillen in positie ten opzichte van de stroming).



Figuur 2-3: Beeld van de berekende thermische respons voor een geleidingscoëfficiënt van het bodemmateriaal van 3.2 W/m/K en grondwaterstromingssnelheden van 0 m/d (links) en 2 m/d (rechts). Boven: ruimtelijk beeld van de temperatuur in en rond de kabel aan het eind van de meting (12000 s). Onder: DTS-temperatuuroename ($^{\circ}\text{C}$ of K) ten opzichte van de achtergrondtemperatuur als functie van de tijd (T) voor elk van de vier DTS vezels in de kabel. Er worden er hier drie gevisualiseerd omdat er twee vezels exact dezelfde oriëntatie hebben aan de boven- en onderzijde van de kabel.

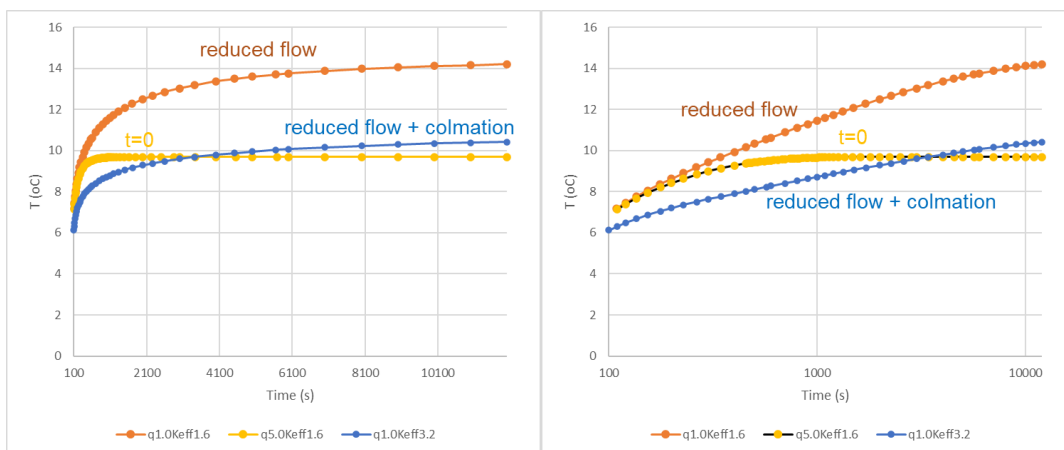
De verschillen in temperatuur van de individuele DTS vezels zijn een functie van de grondwaterstromingssnelheid. Deze verschillen kunnen daarom mogelijk (mede) worden gebruikt om grondwaterstromingssnelheden en/of veranderingen daarin in de tijd (time-lapse metingen) te bepalen.

Figuur 2-4 toont de DTS-respons voor de meeste van de uitgevoerde simulaties. De resultaten illustreren het 'afvlakkende' en temperatuur-drukkende effect van grondwaterstroming. Met toenemende stroming wordt eerder de 'plateauwaarde' van temperatuur bereikt. Verder kan uit de resultaten worden opgemaakt dat het onderscheidend vermogen van de metingen voor de bepaling van de grondwaterstromingssnelheid afneemt wanneer de geleidingscoëfficiënt van het bodemmateriaal hoger is. Het rechterdeel van de figuur laat zien dat zonder grondwaterstroming de temperatuuroename logaritmech verloopt met de tijd. D.w.z. er wordt een rechtlijnig verband verkregen in een log-lin-grafiek. Uit de helling van het rechtlijnige verband (voor een lab- of veldproef zonder grondwaterstroming) kan de geleidingscoëfficiënt worden bepaald. Grondwaterstroming verstoort dit rechtlijnige verband.



Figuur 2-4: DTS temperatuurrepons (gemiddelde van de vier vezels) van alle simulaties tot een maximum stroomsnelheid $q=5 \text{ m/d}$. Boven voor een lage en onder voor een hogere geleidingscoëfficiënt van het bodemmateriaal. Link met een lineaire tijdsas en rechts met een logaritmische tijdsas.

Met deze simulaties is in Figuur 2-5 een eerste (grobe) beeld gevormd van hoe veranderingen in grondwaterstroming én van colmatie tot uiting zouden kunnen komen in metingen in de Gemeenschappelijke Maas. Het idee daarbij is dat kort na suppletie de grondwaterstroming in het gesuppleerde grind hoog is en de stroomsnelheid afneemt door de verstopping. Tegelijkertijd wordt verwacht dat door verstopping (in het dieptebereik waarin fijn materiaal wordt ingespoeld) de geleidingscoëfficiënt van het grind toeneemt. Figuur 2-5 toont hoe naast een afname van grondwaterstroming (van geel naar oranje) de respons mede zou kunnen veranderen door gelijktijdige toename van de geleidingscoëfficiënt (van geel naar blauw).



Figuur 2-5: Beeld van het effect van een afname van de grondwaterstroming van 5 m/d (geel) naar 1 m/d (oranje) bij gelijkblijvende geleidingscoëfficiënt, en van dezelfde afname van grondwaterstroming waarbij tegelijkertijd de geleidingscoëfficiënt een factor twee hoger wordt (van geel naar blauw).

2.2 Stap 1: Verwachte grondwaterstromingsnelheid

In deze paragraaf wordt ingegaan op de verwachte grondwaterstromingsnelheid in de Gemeenschappelijke Maas. Inzichten zijn verkregen vanuit een korte literatuurstudie.

2.2.1 Conclusies

Uit de literatuur blijkt dat de interactie tussen stroming in de rivier en stroming in de ondergrond van de rivier wordt bepaald door het verhang van het rivierpeil, bodemvormen (duinen/ribbels) en door turbulente interactie tussen rivierwater en poriewater (Buano et al., 2014). Doordat deze factoren ruimtelijk significant verschillen, zijn de ruimtelijke verschillen in hyporheïsche stroming groot. Temporele variatie is ook groot omdat verhang, stroomsnelheid en turbulente condities over het algemeen ook sterk variëren. Er is een grote variatie aan grondwaterstroomsnelheden (horizontaal en verticaal) onder rivieren. De verwachting is dat snelheden > 1 m/dag bij de Gemeenschappelijk Maas voorkomen.

Gemeten hyporheïsche stroomsnelheden vanuit de literatuur

Grind/kei-rivier: 2,26 m/d (opwaarts) en 3,76 m/d (neerwaarts) (Rosenberry, 2012).

Zand/grind-rivier: 2,37 m/d (opwaarts) en 3,40 m/d (neerwaarts) (Rosenberry, 2012).

AH-DTS metingen op 10 cm diepte: 0,43–3,02 m/d (Simon et al., 2024).

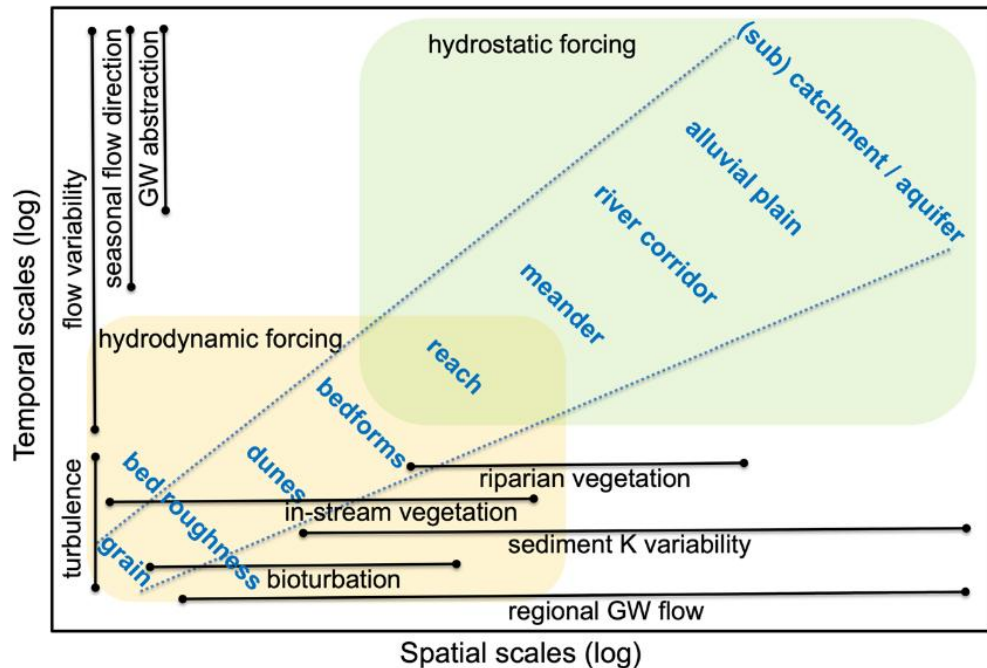
Er zijn in het korte literatuuronderzoek geen schattingen gevonden van horizontale hyporheïsche stroomsnelheden.

2.2.2 Toelichting

Hyporheïsche stroming wordt gedefinieerd als de stroming van oppervlaktewater door sedimenten onder/bij de rivier langs paden waarbij het terugkeert in de rivier (T. Sickbert, E. W. Peterson, 2014). In de aandrijving van de stroming worden twee hoofdcomponenten onderscheiden (Packman, 2004 ; Boano et al. 2014 Kraus et al, 2022):

1. hydrostatische aandrijving. Deze aandrijving wordt veroorzaakt door stijghoogteverschillen over rivierbodempaden (bijvoorbeeld grindbedden) door het verhang in het rivierpeil. Deze aandrijving is vooral belangrijk voor (horizontale) grondwaterstroming door de rivierbedding over relatief grote afstand (Figuur 5).

- hydrodynamische aandrijving. Deze aandrijving wordt veroorzaakt door lokale waterdrukverschillen bij de rivierbodem die ontstaan (a) wanneer het water met vrij grote snelheid over 'oneffenheden' in de rivierbodem ('bedforms', 'bed roughness') wordt gevoerd en (b) door turbulente stroming in de rivier (Figuur 5). Hierin zijn de golflengte van de bodemvormen en de doorlatendheid van het sediment sterk bepalend (Packman, 2004). Verder kan een grote stroomsnelheid op de rivierbodem met grof materiaal ook turbulente stroming veroorzaken in het bovenste deel van het rivierbed waardoor wateruitwisseling tussen rivier en rivierbodem plaatsvindt op hele kleine schaal.



Figuur 6 Ruimtelijke en temporele schalen, overlap en interacties van voorbeeldige fysische en biologische drijvende krachten en controles van hyporheïsche uitwisselingsstroming en hyporheïsche verblijftijdsverdelingen (deels aangepast uit Boano et al., 2014), met gevolgen voor menging van opgeloste stoffen in de beekbodem en biogeochemische cycli. (De weergegeven processen zijn geselecteerd om schaaloverlap te illustreren en pretenderen niet volledig te zijn; sediment k_{sat} = hydraulische geleidbaarheid van sediment) (Krause et al., 2022).

Snelheid van het rivierwater

Bij een gemiddelde afvoer van ongeveer 230 m³/s ligt de stroomsnelheid van de Gemeenschappelijke Maas rond de 1,2 m/s, waarbij in ondiepe stroomversnellingen waarden tot ongeveer 2 m/s worden bereikt. Daarmee stroomt het water hier minimaal tien keer sneller dan in andere Maasdelen. Deze hoge snelheden zijn het gevolg van het relatief grote verval van de Gemeenschappelijke Maas ($4 \cdot 10^{-4}$) en het ontbreken van stuwen in dit riviertraject (Rijkswaterstaat rapport 2006). Deze hoge snelheden in de rivier kunnen ook hoge snelheden in de grindbodem bepalen.

Bereik aan snelheden uit de literatuur

In een veldstudie bij een grind/kei rivier (Allegheny River, $Q_{\text{mean}} = 190 \text{ m}^3/\text{s}$) in Amerika zijn verticale fluxen gemeten van 2.26 m /dag (opwaarts) en 3.76 m/dag (neerwaarts) met een aangepaste kwelmeter (Rosenberry, 2012). Deze snelheden waren groter dan de gemiddelde grondwater afvoersnelheid van 0.24 m/dag. Deze studie rapporteert ook verticale stroomsnelheden die zijn gemeten in een zand/grind rivier (South Platte River, $Q_{\text{mean}} = 9.7 \text{ m}^3/\text{s}$) van 2.37 m/dag (opwaarts) en 3.40 m/dag (neerwaarts); eveneens groter dan de grondwater afvoer snelheid van 0.24 m/dag (Rosenberry, 2012).

In een veldstudie waarin een AH-DTS glasvezelkabel op 10 cm onder de bodem van de Selune River in Frankrijk is ingegraven, zijn stroomsnelheden gerapporteerd van 0.43 – 3.02 m/dag (Simon et al, 2024).

2.3 Stap 2: Invloed van vrije convectie

Binnen deze stap wordt de invloed van vrije convectie onderzocht dat kan optreden doordat het grondwater warm wordt door opwarming van de AH-DTS kabel. Aan de hand van simulaties worden inzichten verkregen en gepresenteerd.

2.3.1 Conclusies

- Op basis van de uitgevoerde literatuurverkenning en de verkennende simulaties wordt geconcludeerd dat vrije convectie geen significante invloed heeft op metingen met *een verticale* AH-DTS kabel en vrije convectie dus naar verwachting geen probleem oplevert voor inzet van de kabel.
- Er kan geen volledige zekerheid worden gegeven over de verwaarloosbaarheid van vrije convectie voor een verticale kabel omdat de simulaties zijn gedaan met grondwaterstroming op basis van de gegeneraliseerde (inclusief dichtheidseffecten) wet van Darcy. Convectiestroming die mogelijk ontstaat op porieschaal – poriën kunnen vrij groot zijn in schoon grind – wordt daarmee onderdrukt.
- Voor metingen met een horizontale kabel zijn invloeden naar verwachting (aanzienlijk) groter, maar daar is geen analyse van gedaan (is aanzienlijk gecompliceerder).
- Los van vrije convectie laten de uitgevoerde simulaties zien dat de temperatuurrepons aan de boven- en onderzijde van het deel van de AH-DTS kabel over een lengte van ca. 2 dm afwijkt van de respons van de meer centrale delen van de verwarmde kabel. De opwarming is daar geringer omdat naast horizontaal ook verticaal warmtetransport een rol speelt bij deze uiteinden.

2.3.2 Toelichting

Probleemstelling

Doordat grondwater rond de AH-DTS kabel opwarmt tijdens een meetsessie, zet het grondwater uit en wordt de dichtheid ervan verlaagd. Daardoor heeft het warme grondwater de neiging om 'op te drijven'. Daardoor wordt koeler water langs de kabel gevoerd. Deze door dichtheidsverschillen gedreven stroming wordt vrije convectie genoemd. Wanneer vrije convectie optreedt zal dat van invloed zijn op de meting. De vraag is of dat verstorend of zelfs problematisch kan zijn voor de metingen.

Opdrijven is sterker voor sterkere opwarming, maar ook voor materiaal bodemmateriaal met een hogere doorlatendheid. Dit is onderzocht voor een verticaal georiënteerde kabel.

Korte literatuurstudie

De literatuurstudie heeft het volgende opgeleverd:

- Er is vrij veel literatuur over vrije convectie van vloeistoffen (of lucht) rond een verticale cilinder die opwarmt². De wiskunde/fysica is echter zeer complex en daardoor moeilijk toegankelijk. Bovendien zijn de resultaten niet zondermeer toepasbaar op poreus bodemmateriaal. Deze literatuur is daarom niet diepgaand bestudeerd.
- Er is een modelleerstudie naar vrije convectie in watervoerende pakketten rond een geothermieput in het Westland³. Hoewel dit een poreuze media toepassing betreft, kunnen uit deze studie geen conclusies worden getrokken over potentiële vrije convectie bij een AH-DTS kabel.

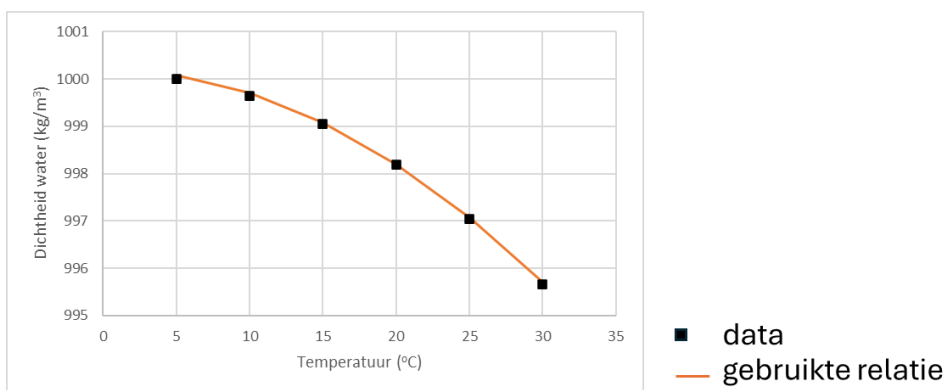
Simulatieberekeningen

Berekeningen zijn gedaan op een verticale uitsnede, 0.2 m breed en 0.7 m hoog vanaf het hart van een verticaal georiënteerde AH-DTS kabel (radiaal coördinatensysteem). Vrije convectie is bestudeerd zonder aanwezigheid van (achtergrond) grondwaterstroming. Op de buitenzijde van de kabel is een warmteafgifte opgelegd van 35 W/m bij een onverstoorde achtergrondtemperatuur van 15 °C. In de simulatie is het verwarmde deel van de kabel beperkt tot 0,3 m. Er is voor een korte opwarmlengte gekozen omdat bij een kortere lengte de vrije convectie en oprijving wordt gestimuleerd, waardoor deze processen eerder worden overschat dan onderschat. Hiermee geeft het model een conservatieve inschatting van de mogelijke bijdrage van vrije convectie in vergelijking wanneer er grotere lengtes worden geanalyseerd.

Tabel 2-1 toont basisparameterwaarden, Figuur 2-7 de dichtheid van water als functie van temperatuur. De doorlatendheid van het grind is stapsgewijs verhoogd tot 1000 m/d.

Tabel 2-1: basisparameters van de simulaties

r kabel	geleiding	warmtecapaciteit	viscositeit water
2.5 mm	2.25 W/m/K	2.8446 MJ/m ³ /K	0.001 Pa*s



Figuur 2-7: Gebruikte relatie voor dichtheid van water als functie van temperatuur: $Dichtheid = 1000.2 - 0.005T^2$

²

³ [KWR Eindrapport EBN-Modelering warmteuitstraling geothermieput Trias-Westland](#)

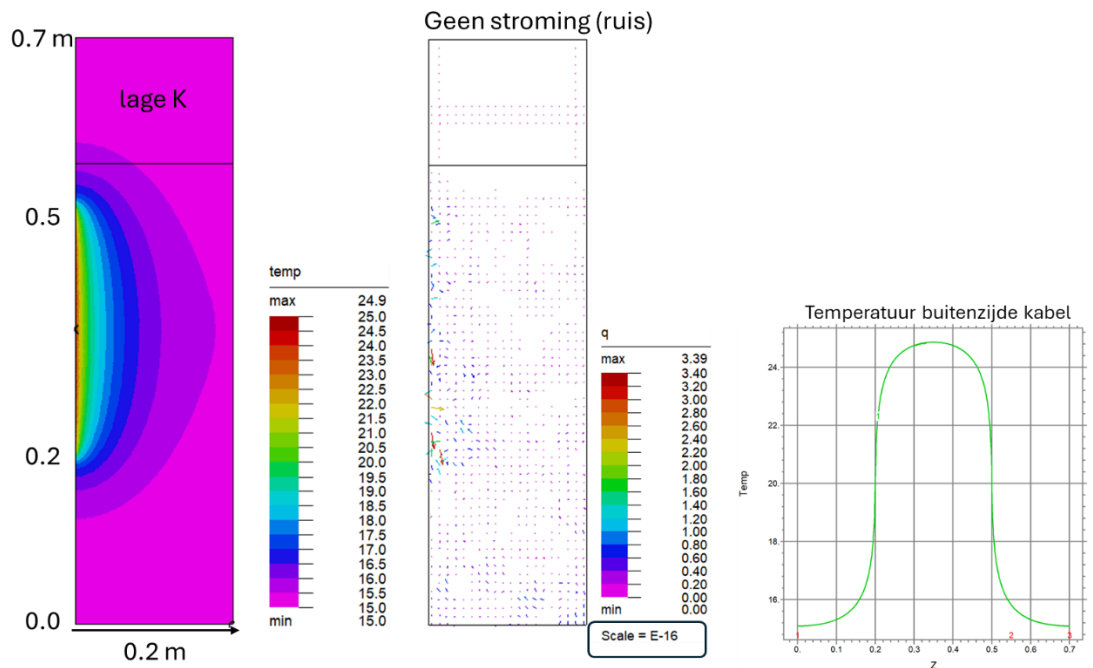
Figuur 2-8 toont resultaten voor een simulatie *zonder* dichtheidsstroming. Door afwezigheid van opdrijvend grondwater ontwikkelt het temperatuurveld zich symmetrisch rond een horizontale lijn door het hart van de opgewarmde kabel. Duidelijk zichtbaar is dat ook boven en onder het opwarmtraject (van $z = 0.2$ m tot 0.5 m) opwarming van grondwater plaatsvindt en dat daardoor het bovenste en onderste deel van het opwarmtraject van de kabel minder opwarmt tijdens de meting dan het centrale deel van het opwarmtraject.

200 minuten (12000 sec)

35 W/m

K = 1000 m/d

Zonder dichtheidsstroming



Figuur 2-8: Temperatuur en stromingsbeeld aan het eind van een meting (12000 s) voor een simulatie voor een uniforme en constante dichtheid van grondwater (geen vrije convectie). Links: temperatuurveld op het domein. Midden: grondwaterstromingsveld op het domein (let op de extreem lage schaal waarde; er wordt ruis gevisualiseerd). Rechts: Temperatuur profiel over de volle hoogte van het domein langs de buitenzijde van de kabel (verticale as is temperatuur, horizontale as verticale positie).

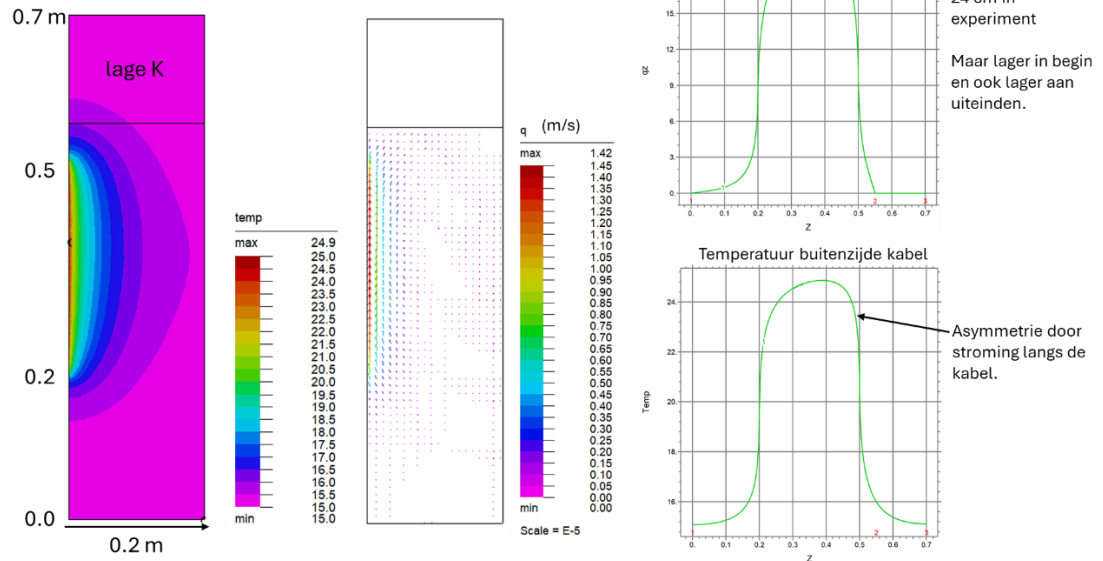
Figuur 2-9 toont resultaten voor dezelfde simulatie, maar *met* dichtheidsstroming en vrije convectie. Het warmste water bevindt zich direct naast de kabel en drijft daardoor het sterkst op (centrale paneel). De maximale opwaartse stroming bij de kabel bedraagt 2×10^5 m/s wat overeenkomt met 24 cm tijdens de duur van de (lange) meting van 12000 s. Dat betekent dat er watertransport plaatsvindt over een vrij grote afstand langs de kabel. De invloed op de temperatuur aan de buitenzijde van de kabel (rechter paneel) is echter zeer beperkt (vergelijk met Figuur 2-8).

200 minuten (12000 sec)

35 W/m

K = 1000 m/d

Met dichtheidsstroming



Figuur 2-9: Temperatuur en stromingsbeeld aan het eind van een meting (12000 s) voor een simulatie met dichtheidsstroming en vrije convectie. Links: temperatuurveld op het domein. Midden: grondwaterstromingsveld op het domein. Rechts: Grondwaterstroomsnelheid (m/s) en temperatuur profielen over de volle hoogte van het domein langs de buitenzijde van de kabel (verticale as is stroomsnelheid of temperatuur, horizontale as verticale positie).

2.4 Voortzettingsbeslissing 1

Op basis van de resultaten uit de haalbaarheidssimulaties (stap 0), de literatuurstudie naar verwachte grondwaterstromingssnelheden (stap 1) en de analyse van mogelijke vrije convectie-effecten (stap 2), kan verdergegaan worden naar stap 3.

De simulaties met de AH-DTS-methode, toegepast op de AH-DTS-kabel in dit project, laten zien dat er potentie is om hyporheïsche stroomsnelheden te meten. Uit de haalbaarheidssimulaties blijkt dat bij het genereren van een warmtepuls onderscheid kan worden gemaakt tussen verschillende stroomsnelheden. Vooral snelheden boven de 1 m/dag zorgen ervoor dat de temperatuur sneller een stabiele situatie bereikt, en daardoor beter van elkaar te onderscheiden zijn. Dergelijke hoge snelheden kunnen worden verwacht op basis van de literatuurstudie. Om in het bereik beneden 1 m/dag een betere differentiatie te realiseren, zou een hogere warmtepuls op de kabel moeten worden toegepast. Het verkrijgen van inzicht hierin zou verder uitgewerkt kunnen worden in het ontwerp (stap 4).

Daarnaast is onderzocht wat voor karakteristieke respons de verschillende stroomsnelheden en effecten van verstopping (colmatie) geven op de temperatuurontwikkeling van de AH-DTS kabel. Hieruit is gebleken dat de respons van verschillende stroomsnelheden en colmatie van elkaar te onderscheiden zijn. Uit de literatuur blijkt dat hyporheïsche snelheden in zand/grind- en grind/kei-rivieren boven 1 m/dag kunnen liggen. Wanneer deze snelheden ook in de grindsuppleties van de Gemeenschappelijke Maas worden bereikt zouden deze met de onderzochte AH-DTS methode en kabel van dit project gemeten kunnen worden.

Simulaties tonen dat vrije convectie naar verwachting geen significante verstoring oplevert voor een verticale kabel, die het beoogde meetprincipe vormt. Hoewel porieschaaleffecten niet volledig uit te sluiten zijn, geven de resultaten geen reden om de methode om die reden af te wijzen. Mocht in een vervolgproject ook horizontale kabels meegenomen kunnen worden zou de invloed van convectie nog verder onderzocht moeten worden.

2.5 Stap 3a: Labmeting geleidingscoëfficiënt suppletiegrind

In het lab zijn labexperimenten uitgevoerd om de geleidingscoëfficiënt te bepalen van het suppletiegrind. Dit is gedaan door een opwarm puls op te zetten op de AH-DTS kabel en deze te analyseren.

2.5.1 Conclusies

Op basis van de metingen in de grindkolom wordt de geleidingscoëfficiënt van het te suppleren grind geschat op 3,5 W/m/K met een bovengrens van 4,2 en een ondergrens van 2,8 W/m/K.

2.5.2 Toelichting

Methode

De geleidingscoëfficiënt is bepaald met de niet-stationaire lijnbron methode (Transient Line-Source (TLS) test; ASTM D5930). Dit is een veelgebruikte methode om de geleidingscoëfficiënt van vaste materialen te bepalen. De lijnbron kan een verwarmingsnaald zijn maar ook een verwarmingskabel zoals de AH-DTS kabel. De methode maakt gebruik van het feit dat bij constante verwarming van de lijnbron de temperatuur van de lijnbron na enige tijd logaritmisch toeneemt met de tijd. Vanzelfsprekend mag er geen sprake zijn van (grondwater)stroming in het materiaal (grind). In een log-lin grafiek van de temperatuur als functie van de tijd geeft dit een rechte lijn. Uit de helling van de lijn kan vervolgens de geleidingscoëfficiënt worden bepaald met de uitdrukking:

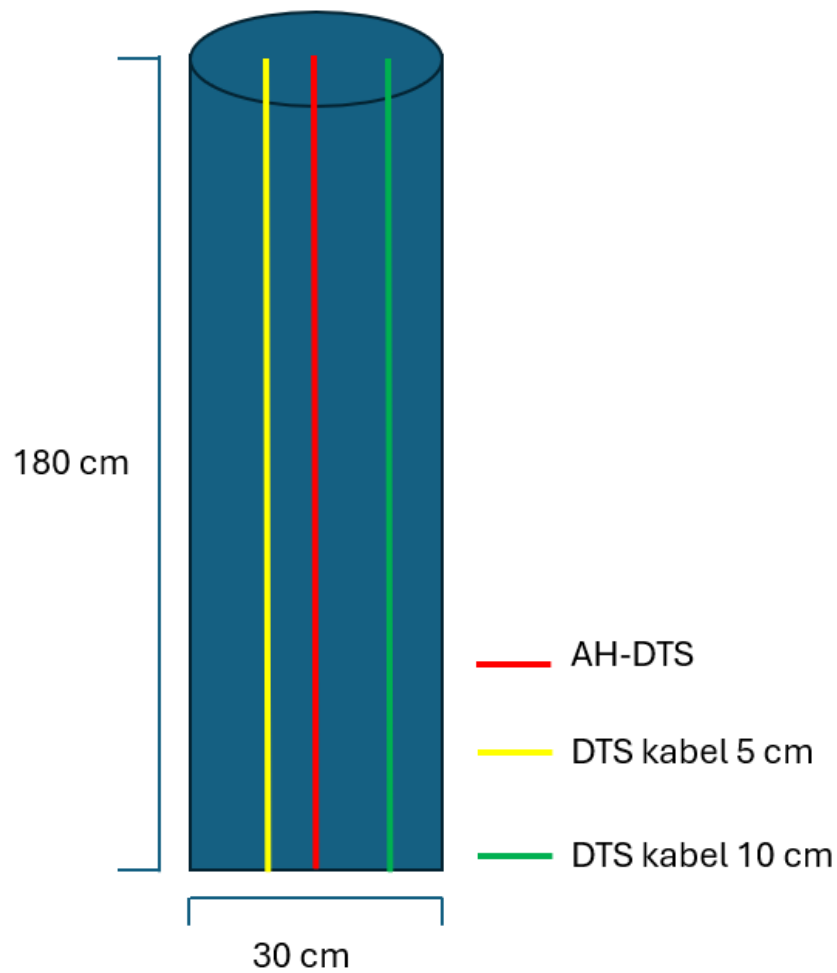
$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{Q}{4\pi\Delta T} \ln \frac{t_2}{t_1}$$

waarin t_1 en t_2 twee tijdstippen zijn en ΔT de bijbehorende temperatuurtoename, en Q de warmteproductie van/in de lijnbron.

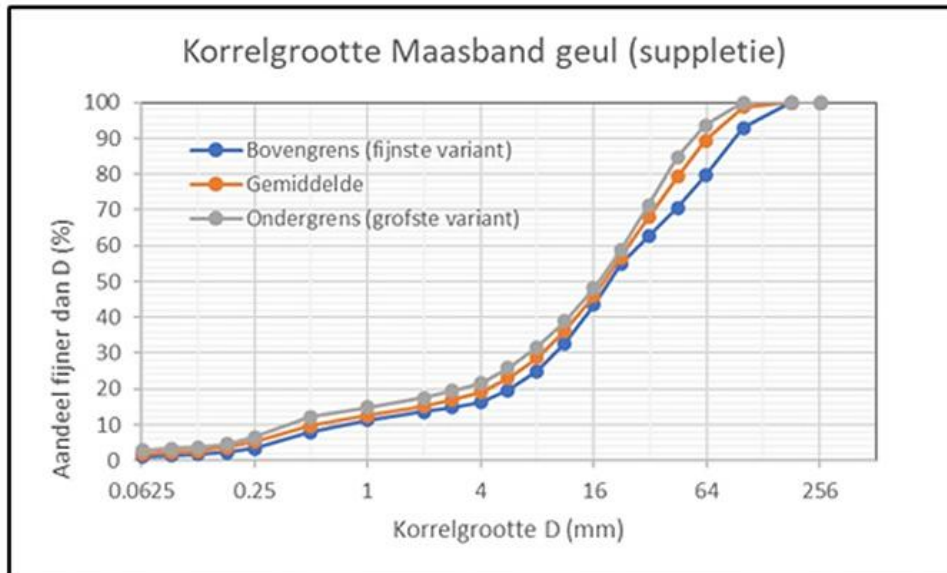
Ter illustratie is deze methode toegepast op de gesimuleerde respons van de kabel met $\lambda_{\text{eff}} = 1.60$ W/m/K (blauwe lijn linksboven in de grafiek van Figuur 2-4). Met de volgende geschatte waarden op basis van de grafiek ($t_1 = 1000$ s; $t_2 = 10000$; $\Delta T = 4.0$ K; $Q = 35.14$ W/m) wordt met de geleidingscoëfficiënt met deze methode geschat op 1.61 W/m/K.

Aanpak en resultaat

In de faciliteit in Delft is een grindkolom samengesteld in een PVC buis van 180 cm hoog met een doorsnede van 30 cm (Figuur 10). Het grind is op basis van een door Rijkswaterstaat aangeleverde zeefkromme samengesteld (Figuur 11). De samenstelling van het grind is gereproduceerd door per zeefmaat de juiste hoeveelheden af te wegen om de buis te vullen (Tabel 2-1). De fractie van 0,45 – 1,0 mm was niet beschikbaar bij de grindleverancier en is opgevuld met vergelijkbaar zand uit de faciliteit. Deze afgewogen fracties zijn vervolgens gemengd in een cementmixer en daarna toegevoegd aan de kolom na plaatsing van de DTS kabels.



Figuur 10 Overzicht van de meetopstelling waarin in een PVC buis van 180 cm en een diameter van 30 cm een AH-DTS kabel is afgehangen. Daarnaast zijn ook nog twee DTS kabels op 5 en 10 cm van de AH-DTS kabel gehangen. De PVC buis is vervolgens opgevuld met grind.



Figuur 11 Zeefkromme en middeling van monsters uit de geul bij Maasband, en de bijbehorende bandbreedte. Dit is het materiaal van de suppletie.

Tabel 2 Samenstelling van het gebruikte grind in de opstelling.

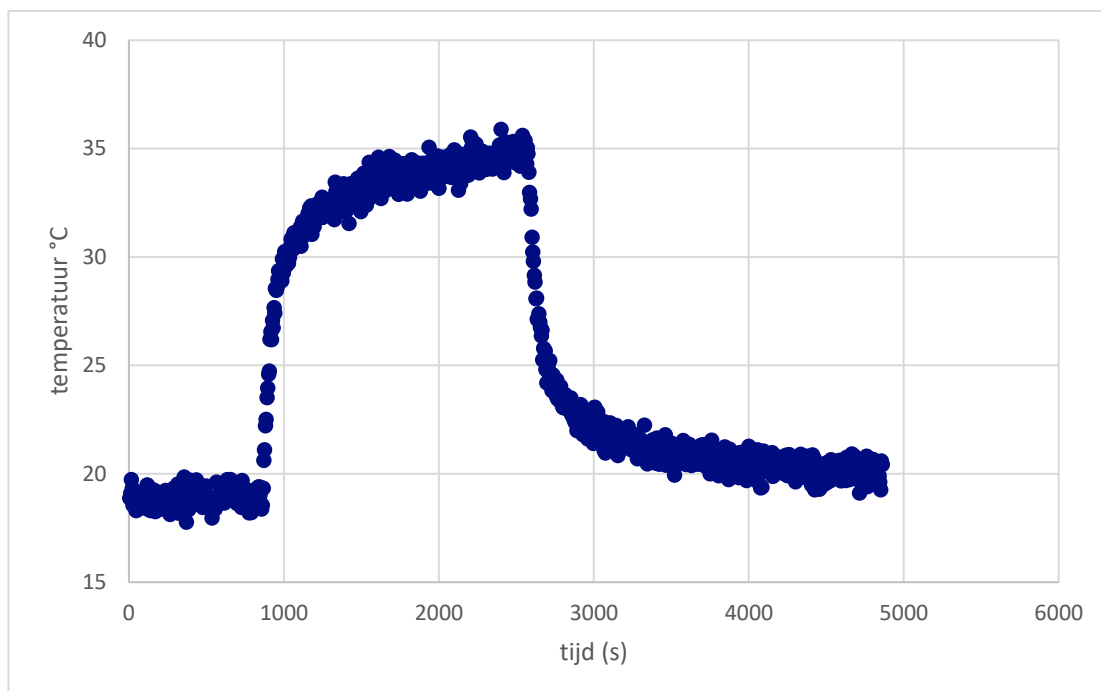
Klasse [mm]	Volume [l]	Gewicht [kg]
0,25 – 0,45	7,5	10.6
0,45 – 1,0*	0,7	1.5
1,0 -1,4	10,5	13.6
1,0 – 2,0	4,5	6.6
2,0 – 5,0	7,5	9.8
5,0 – 8,0	12	19.6
8,0 – 16,0	35	50.2
15,0 – 30,0	30	47.6
30,0 – 60,0	38	52
Totaal	145.7	210.4

* zand uit de faciliteit

2.5.3 Uitvoering van meting

Twee van de vier verwarmingsdraden in de AH-DTS-kabel zijn aangesloten, wat resulteert in een verwarmingsvermogen van 85,4 W/m. De temperatuurmetingen zijn uitgevoerd met een Silixa Ultima DTS-interrogator, waarbij elke 5 seconden een meting is geregistreerd. De ruimtelijke resolutie bedraagt 12,5 cm; per meetpunt wordt de gemiddelde temperatuur bepaald over een segment van 25 cm van de glasvezelkabel. De metingen zijn 15 minuten vóór de start van de opwarming begonnen. De opwarmfase duurde 30 minuten, gevolgd door ongeveer 38 minuten aanvullende metingen.

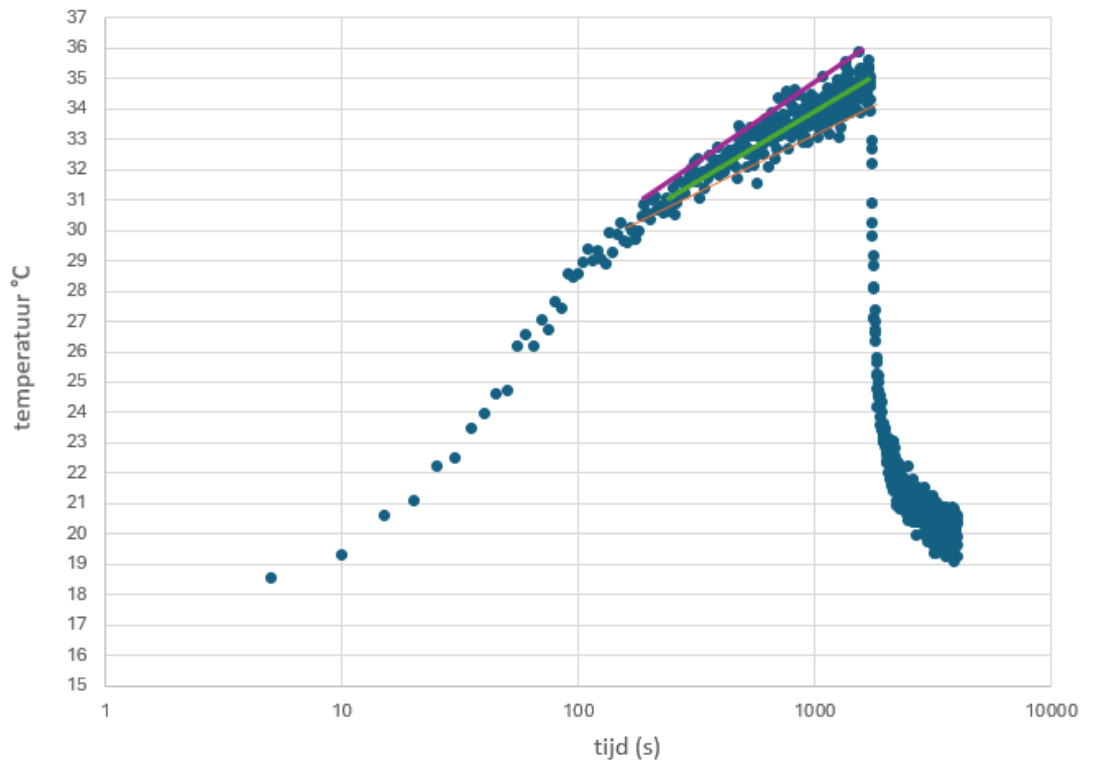
In Figuur 12 is een opwarmcurve weergegeven voor de positie midden in de buis (88,5 cm boven de onderkant). Bij start van de meting was de temperatuur gemiddeld 18.9 °C. Na 30 minuten opwarmen was een temperatuur bereikt van ~35 °C. Na het stoppen van de opwarming was de temperatuur na 38 minuten ~20 °C.



Figuur 12 Temperatuurmeting van een positie van de AH-DTS kabel midden in de buis op een afstand 88.5 cm boven de onderkant van de buis. Duidelijk is de opwarming over 30 minuten te zien.

2.5.4 Schatting thermische geleidingscoëfficiënt

In Figuur 13 is de opwarmcurve weergegeven op een logaritmische tijdsas voor positie midden in de buis. In Tabel 3 zijn de tijdstippen en de daarbij horende temperaturen om de thermische geleidingscoëfficiënt te bepalen, vermeld. Op basis van deze meting wordt de thermische geleidingscoëfficiënt geschat tussen de 2,8 en 4,2 W/m*K.



Figuur 13 Temperatuurmeting op tijd log schaal waarbij de opwarm curve start op $t=0$. De geleidingscoëfficiënt is bepaald op het deel van de curve wanneer deze stabiel is. Er is een bandbreedte bepaald door de bovenste temperatuur waarden (paarse lijn) als ook de onderste lijn te bepalen (oranje lijn).

Tabel 3 berekende thermische geleidingscoëfficiënt en de daarbij behorende tijdstippen en temperaturen voor een bandbreedte van de uitgevoerde opwarmproef.

	λ [W/m*K]	t1 [s]	t2 [s]	T1 °C	T2 °C	Δ °C
onderste lijn	4,2	165,0	1725,0	30,1	33,9	3,8
middelste	3,5	235,0	1705,0	31,0	34,9	3,9
bovenste lijn	2,8	190,0	1545,0	30,8	35,9	5,1

2.6 Voortzettingsbeslissing 2

Op basis van de schatting van de thermische geleidingscoëfficiënt (2.8 tot 4.2 W/m*K) van het (te supleren) grind van de Gemeenschappelijke Maas kan verdergegaan worden naar stap 4.

Uit de verkennende simulaties binnen stap 0 blijkt dat inzicht in de thermische geleidingscoëfficiënt van het te supleren grind van belang is voor een juiste beoordeling van het oplossend vermogen van de methode. Een hogere thermische geleidingscoëfficiënt leidt tot een sneller verspreiden van warmte in het sediment, waardoor het oplossend vermogen voor het meten van de grondwaterstromingssnelheid afneemt. Doordat de thermische geleidingscoëfficiënt aan de hoge kant zit zullen lagere stroomsnelheden minder goed te bepalen zijn. Doordat het toegevoerde vermogen op de kabel ook bepalend is, wordt aanbevolen in het ontwerp om een hoger vermogen op te zetten zodat het effect van lagere op de thermische respons door de kabel ook gemeten kan worden.

2.7 Stap 3b: Grootschalige labmeting voor grondwaterstroming met AH-DTS metingen in grondwaterstromingsgoot met grof zand

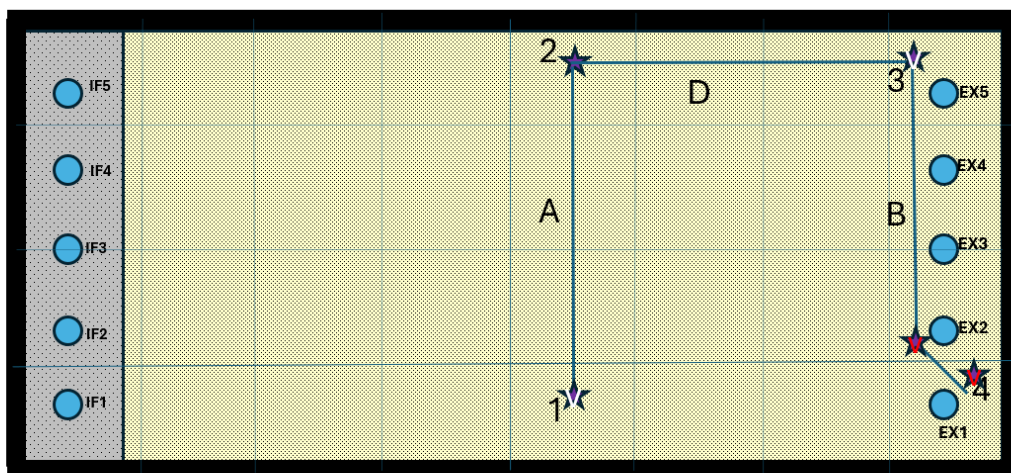
In een grondwaterstromingsgoot zijn voor verschillende grondwaterstromingscondities meetinstrumenten uitgeprobeerd. Hierin is ook een AH-DTS kabel getest. In deze paragraaf worden bevindingen gepresenteerd. De detail uitwerking van deze proeven zijn voorzien in een ander project.

2.7.1 Conclusies

- In een grondwaterstromingsgoot is de AH-DTS kabel en methode getest voor het grootschalig meten van thermische geleidbaarheid en grondwaterstroming.
- De temperatuurespons van de kabel reageert duidelijk op variaties in grondwaterstromingsnelheid
- Vooral snelheden boven 1 m/dag kunnen duidelijk worden geïdentificeerd: de temperatuur bereikt daar sneller een stabiel niveau.
- Voor snelheden onder 1 m/dag is de differentiatie minder duidelijk; hiervoor is mogelijk een hogere warmtepuls nodig.

2.7.2 Toelichting

Bij een lopend TKI project naar het meten van grondwaterstroming (Deltares referentie 11210224) is een AH-DTS kabel geïnstalleerd in een grondwaterstromingsgoot. De grondwaterstromingsgoot is gebouwd in een bak $7,1 \times 3,5 \times 2,5$ m gevuld met zand en afgesloten met beton, waarin volledig verzadigde stroming wordt gecreëerd via infiltratie- en onttrekkingsbuizen. Door variatie in pompdebieten en onttrekking vanuit één of meerdere filterposities kunnen parallelle en niet-parallelle stromingspatronen worden opgezet. De AH-DTS glasvezelkabel van 14 meter lengte voert langs verticale secties dichtbij de onttrekkingsfilters en een horizontale sectie dichtbij de filters en op afstand van de filters.



★ Verticale secties 1,2,3 en 4

— Horizontale secties A, B en D

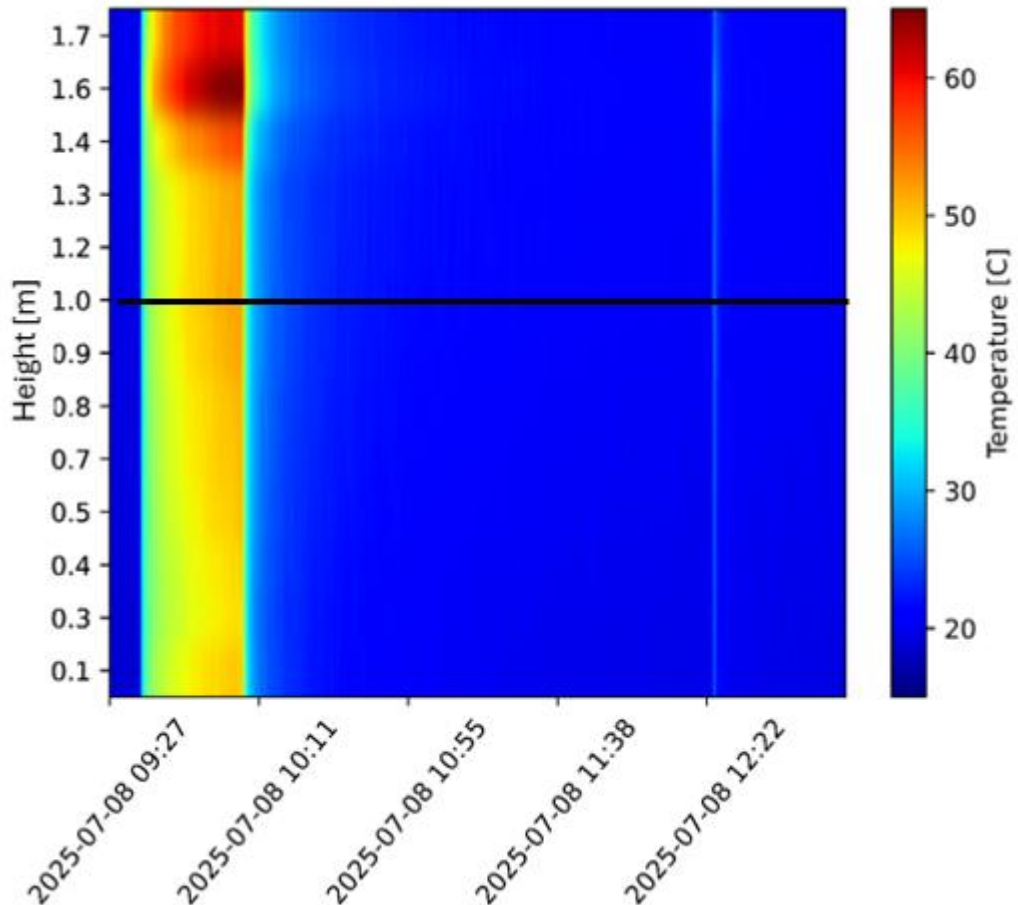
Figuur 14 Overzicht figuur van de grondwaterstromingsgoot met de infiltratie buizen (IF) aan de linkerzijde en onttrekkingsbuizen (EX) aan de rechterzijde. Daarnaast is de AH-DTS kabel ingetekend met verticale secties en horizontale secties.

Doel van het laten zien van deze resultaten voor dit onderzoek:

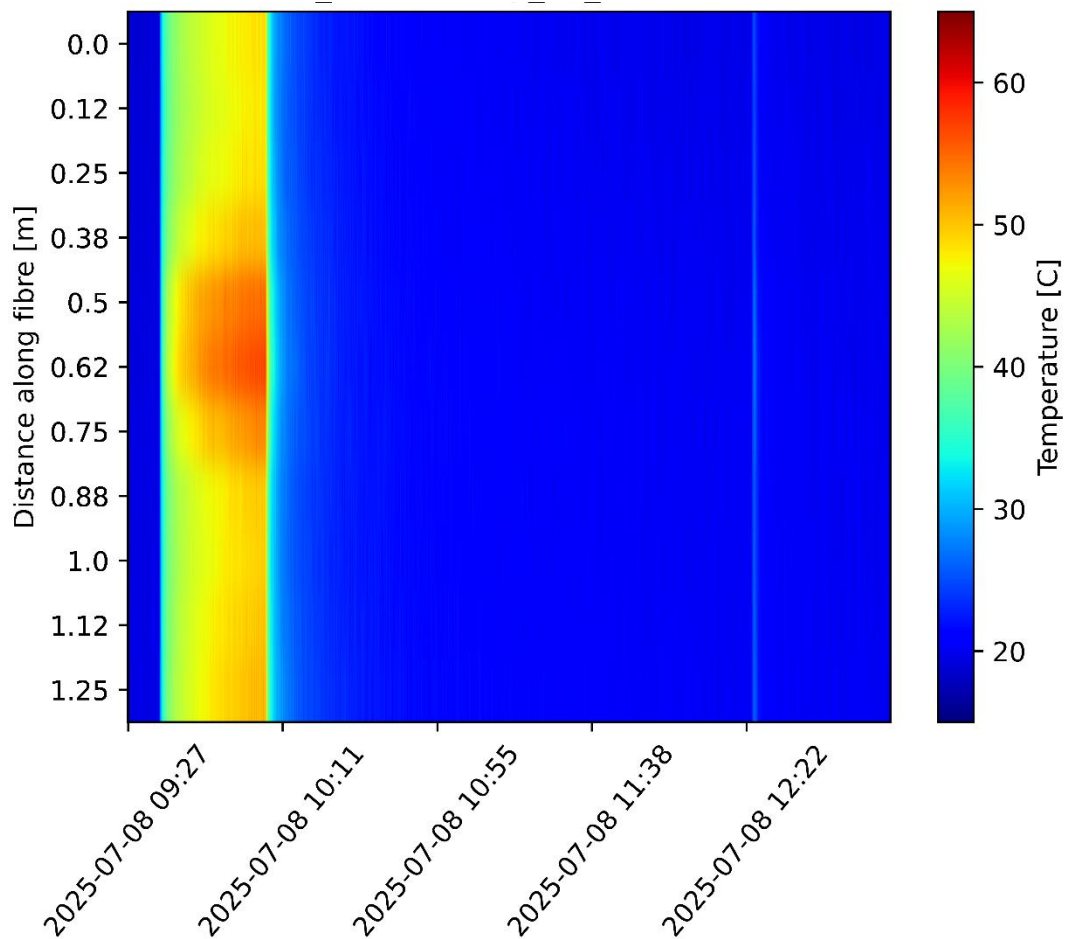
Demonstratie van de AH-DTS methode en kabel van de invloed van grondwaterstroming op de AH-DTS respons in grote-schaal lab omgeving, zij het in zand in plaats van grind.

2.7.3 Schatting thermische geleidingscoëfficiënt

Bij dit experiment zijn dezelfde instellingen voor de kabel en de opwarmduur gebruikt als bij de Grindkolom (paragraaf 2.5.3). Na het stoppen van de opwarming was er een grote variatie in de maximale temperatuur gemeten in de orde van 45 tot en 65 °C. In Figuur 15 is een verticale sectie 4 weergegeven dichtbij het onttrekkingsfilter en in Figuur 16 is een horizontale sectie B weergegeven.

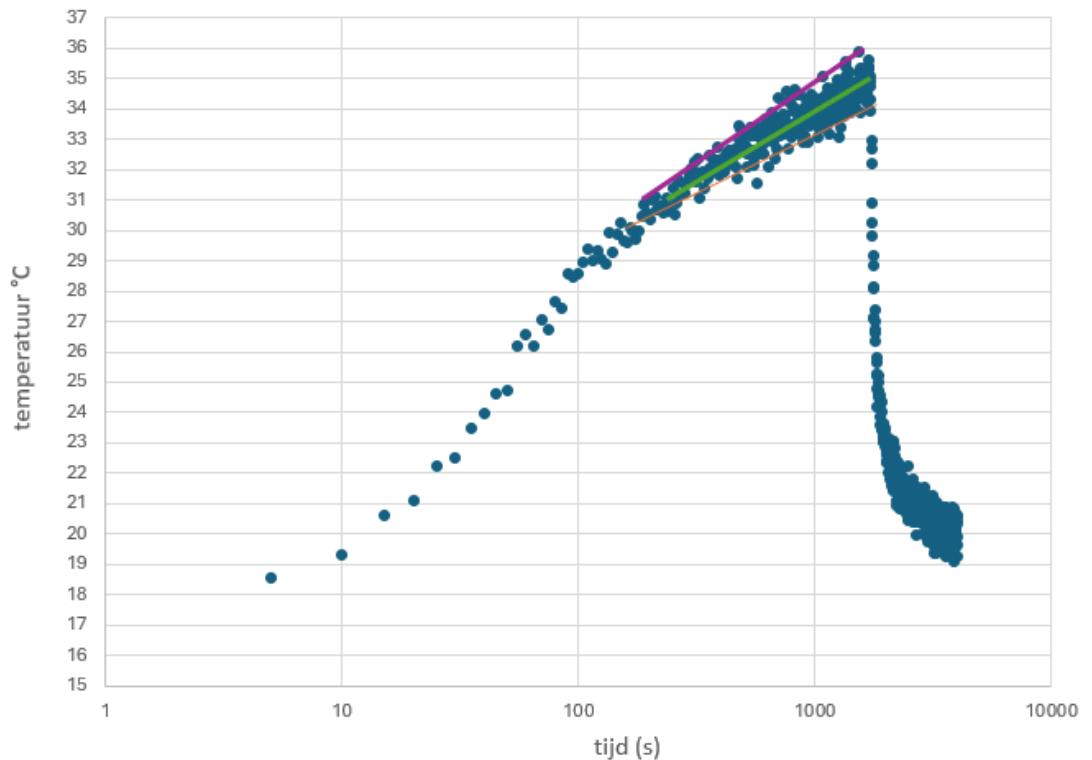


Figuur 15 Temperatuurontwikkeling bij verticale sectie 4. Duidelijk is de opwarm duur te zien van een half uur. Boven in de sectie van 1.3 m tot en met 1.7 wordt een hogere temperatuur bereikt. De zwarte lijn geeft de positie aan waarop de thermische conductiviteit is bepaald.



Figuur 16 Temperatuurontwikkeling bij horizontale sectie B. Duidelijk is de opwarm duur te zien van een half uur. Tussen de 0.38 m en 0.88 m is een zone te zien waarin de temperatuur een hogere waarde bereikt. Positie 0 is bij het sterretje links van het onttrekkingsfilter EX 2 in figuur 13.

In Figuur 17 is de opwarmcurve weergegeven op een logaritmische tijdsas voor een positie op verticale sectie 4 op 1 m boven de onderkant van de bak (komt overeen met de zwarte lijn in Figuur 15). In Tabel 4 zijn de tijdstippen en de daarbij horende temperaturen om de thermische geleidingscoëfficiënt te bepalen, weergegeven. Op basis van deze meting zit de thermische geleidingscoëfficiënt tussen de 1,5 en 1,7 W/m/K. Er zijn grote verschillen in maximale temperatuurontwikkeling te zien in Figuur 15 en Figuur 16. Deze hogere temperatuurontwikkeling zouden verklaard kunnen worden door een verschil in pakking van het aangebrachte zand en mogelijk ook door luchtinsluitels tussen het beton en het zand. Aan de hand van simulaties zou deze effecten inzichtelijk gemaakt kunnen worden en vergeleken worden met de meetdata.



Figuur 17 Temperatuurmeting op tijd log schaal waarbij de opwarm curve start op $t=0$. Er is een bandbreedte van de schatting van de geleidingscoëfficiënt bepaald op basis van de bovenste lijn (paarse) en de onderste lijn (oranje).

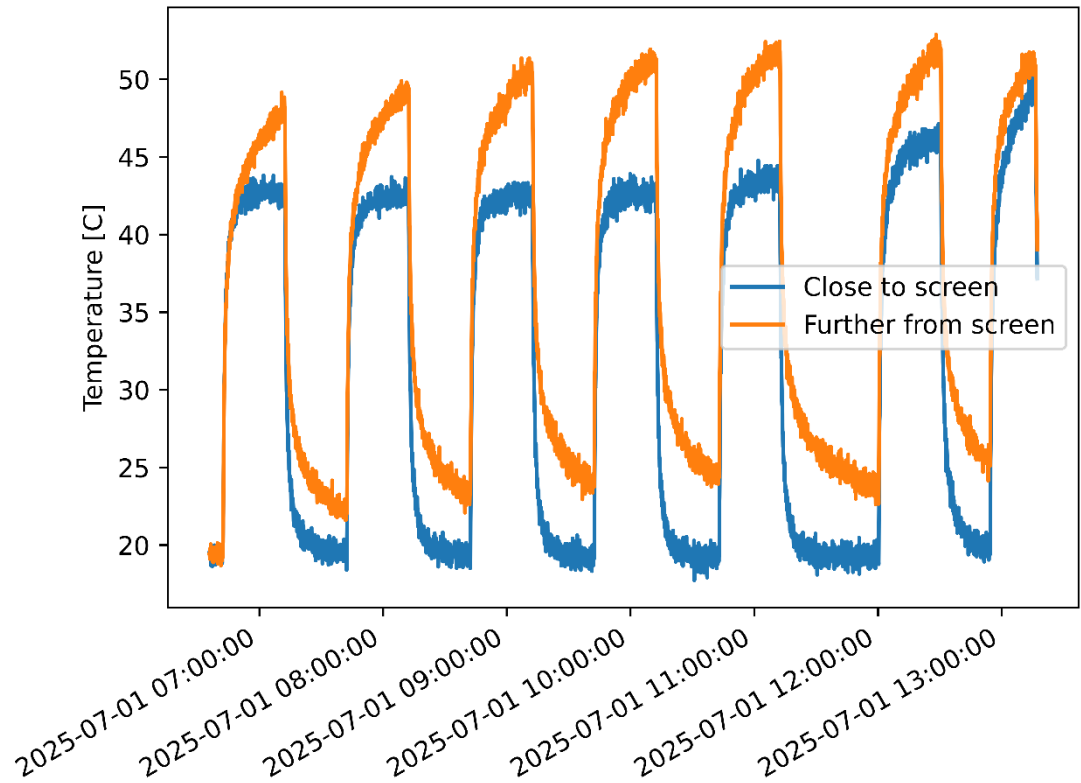
Tabel 4 berekende thermische geleidingscoëfficiënt en de daarbij behorende tijdstippen en temperaturen voor een bandbreedte van de uitgevoerde opwarmproef.

	λ [W/m/K]	t1 [s]	t2 [s]	T1 °C	T2 °C	Δ °C
onderste lijn	1,7	235	1625	42,6	50,3	7,7
middelste	1,6	285	1560	43,0	51,6	8,5
bovenste lijn	1,5	285	1560	44,3	52,1	7,8

2.7.4 Relatie opwarmcurves en stromingen

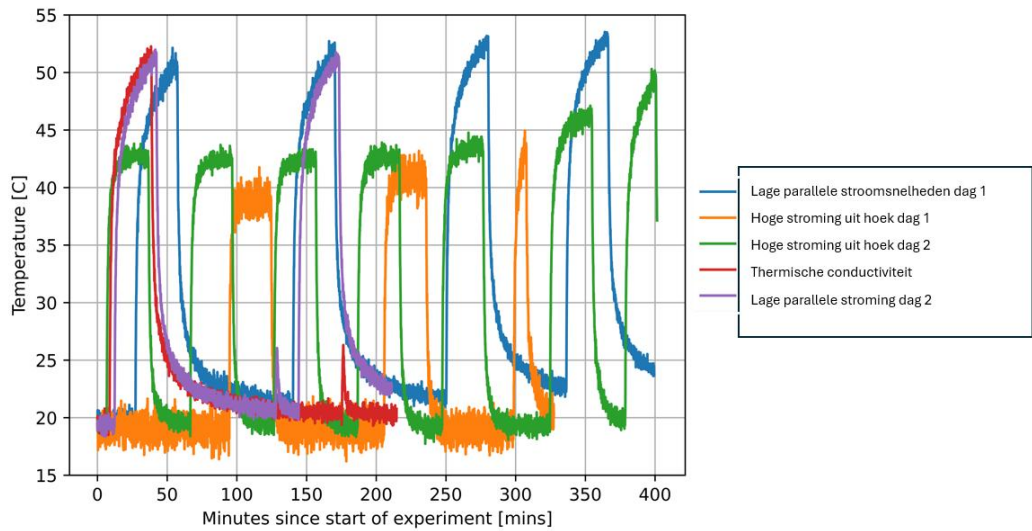
In de grondwaterstromingsgoot is een reeks stromingssnelheden opgezet, zowel voor situaties met parallelle stroming als voor stroming gericht op een hoek. Tijdens de experimenten met hoekonttrekking, die zijn uitgevoerd op één dag, is voor twee posities langs de kabel de temperatuurontwikkeling in detail gevolgd. De eerste positie is dichtbij het filter bij verticale sectie 4 en de tweede positie bij verticale sectie 2 (zie Figuur 14). Op deze dag zijn zeven verschillende stromingscondities gegenereerd in de range van 0.25 t/m 20 m/dag dichtbij het filter en 0.78 t/m 1.44 verder weg van het filter (zie Figuur 18).

Uit de metingen blijkt duidelijk dat de maximale temperatuur dicht bij het extractiefilter lager is (42 – 44 °C) dan op een positie verder van het filter (47 – 52 °C). Daarnaast is ook te zien dat de positie dichtbij het filter een stabiele temperatuur aanneemt bij de hogere snelheden (experimenten 1 t/m 5) dan de positie verder weg van het filter. Als tijdens de opwarming de temperatuur een stabiele waarde aanneemt betekent dit dat de toegevoerde warmte gelijk is aan de afvoer van de warmte door overdracht aan de omgeving door de stroming. Dit zijn ook de verwachtingen omdat er hogere stroomsnelheden met deze experimenten worden bereikt in de directe nabijheid van het onttrekkingspunt is.



Figuur 18 Temperatuurontwikkeling voor een positie dichtbij een onttrekkingsfilter en een positie verder weg van het onttrekkingsfilters bij 7 verschillende opgezette stroomsnelheden in de range van 0.89 t/m 20 m/dag dichtbij het filter en 0.78 t/m 1.44 verder weg van het filter.

In Figuur 19 is de temperatuurontwikkeling te zien op één meetpositie dichtbij het filter voor meerdere proeven over verschillende dagen. Tijdens deze dagen zijn verschillende proeven uitgevoerd met parallelle stroming, onttrekkingen uit een hoek en waarin verschillende stromingssnelheden zijn opgezet en is een meting uitgevoerd voor een situatie zonder grondwaterstroming om de thermische geleidbaarheid te kunnen bepalen. Bij experimenten met lage stroomsnelheden volgt de temperatuurontwikkeling vrijwel dezelfde trend als bij de thermische-geleidbaarheidstest (géén stroming). De verschillende temperatuur respons moeten nog nader worden vergeleken met de verschillende stroomsnelheden in de grondwaterstromingsgoot, maar de huidige resultaten bieden al een basis voor verdere analyse en interpretatie.



Figuur 19 Temperatuurontwikkeling voor een positie dichtbij een onttrekkingsfilter voor verschillende meetdagen met verschillende stromingscondities.

3 Discussie en conclusie

In dit project is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar de toepasbaarheid van Active Heated Distributed Temperature Sensing (AH-DTS) als methode voor het detecteren en kwantificeren van grondwaterstroming en colmatieprocessen in grindsuppleties in de Gemeenschappelijke Maas. In dit project is een gefaseerde aanpak gehanteerd met verschillende beslismomenten. De eerste vier stappen daarin zijn:

0. Verkenning van de haalbaarheid d.m.v. computersimulatie.
1. Verwachte grondwaterstromingsnelheid
2. Invloed van vrije convectie
3. Thermische geleidingscoëfficiënt van het grind.

Stap 4 het ontwerp van de meetopstelling en stap 5 het operationaliseren van de inversiemethode zijn niet uitgewerkt.

Op basis van de resultaten mag verwacht worden dat de onderzochte AH-DTS methode toegepast op de AH-DTS kabel in dit project verschillende grondwaterstromingsnelheden te bepalen zijn. Wanneer de stroomsnelheden ongeveer 1 m/dag of hoger zijn kunnen deze van elkaar onderscheiden worden. Daarnaast kan door specifieke analyse van de temperatuurontwikkeling de effecten van grondwaterstroming stroming en colmatie hierop van elkaar onderscheiden worden.

Simulaties wijzen uit dat vrije convectie geen significante verstoring oplevert bij verticale kabels, die het beoogde meetprincipe vormen. Voor horizontale kabels zou dit wel een risico kunnen zijn, maar dit is niet specifiek onderzocht.

De gemeten thermische geleidingscoëfficiënt van het te suppleren grind (ongeveer 3,5 W/m·K) ligt aan de hoge kant om stromingsinvloeden te detecteren.

Door het plaatsen van een grindsuppletie in de Gemeenschappelijke Maas is de verwachting dat binnen korte afstanden grote verschillen kunnen optreden in grondwaterstroming en colmatie. De uitgevoerde stappen en de eerste analyse van de resultaten van de grondwaterstromingsgoot laten de potentie van de AH-DTS-methode zien. Deze methode maakt het mogelijk om over de verticaal met een hoge resolutie, gedurende langere tijd te monitoren en onderscheid te maken tussen de invloeden van grondwaterstroming en colmatie.

4 Aanbevelingen

Op basis van deze conclusies wordt aanbevolen om de volgende stappen gepresenteerd in de gefaseerde aanpak verder te adresseren. Deze stappen zijn het ontwerp van de meetlocaties en het operationaliseren van de inversiemethode van de temperatuur respons opgezet door de AH-DTS methode voor bepaling van grondwaterstroming en colmatie.

4.1 Ontwerp van de meetopstelling en meetlocatie

Voor het ontwerp van de meetlocatie en de aanleg van de AH-DTS-kabels is het noodzakelijk om eerst de ruimtelijke dekking te bepalen. Door de kabels verticaal aan te brengen en daarbij korte onderlinge afstanden te hanteren, kan de variatie in grondwaterstroming en colmatie binnen het gebied worden bestudeerd. Daarnaast is het zinvol om één of meerdere referentielocaties op te nemen, zowel in zones met vermoedelijk lage colmatie (schoon en goed doorlatend) als in zones met hoge colmatie. Deze locaties kunnen gebruikt worden om hier de temperatuurrepons te bestuderen en inzichten te gebruiken voor eventuele kalibratie en validatie van de inversie.

Mocht in een vervolgproject ook horizontale kabels meegenomen kunnen worden zou de invloed van convectie nog verder onderzocht moeten worden.

4.2 Operationaliseren van de inversiemethode

Om van de AH-DTS methode naar grondwaterstroming en colmatie te gaan wordt een inversiemethode gevolgd waarbij eerst je forward model wordt geformuleerd. Deze is vergelijkbaar met de simulaties die zijn opgezet. Vervolgens worden de specifieke kenmerken uit de metingen gehaald. Dit zijn de maximale temperatuurstijging, de snelheid van opwarmen, de afkoelsnelheid en de tijd tot de piektemperatuur. Daarna volgt het uitvoeren van je inversie-algoritme waarbij je de waarden van de grondwaterstroomsnelheid en thermische conductiviteit probeert te vinden die het beste bij je gemeten temperatuurcurve past. Als laatste stap volgt dan het interpreteren van de grondwaterstroomsnelheden en colmatie.

Voor de opwarmstrategie wordt aanbevolen om vooraf te bepalen welke opwarmtemperatuur het optimale meetbereik oplevert, en hoe lang het duurt voordat de temperatuur na verwarming weer terugkeert naar de uitgangssituatie. Om in het bereik beneden 1 m/dag een betere differentiatie te realiseren, zou een hogere warmtepuls op de kabel moeten worden toegepast. Ook is het wenselijk om gedurende een langere periode identieke cycli van opwarm- en afkoeltijd toe te passen, zodat ruis en variabiliteit door grondwaterstroming en colmatie in de temperatuurrepons goed kunnen worden gekwantificeerd.

Om de AH-DTS-metingen goed te kunnen vergelijken met grondwaterstromingssnelheden uit methoden die zijn gebaseerd op grondwaterstanden, rivierstanden en de hydraulische gradiënt, wordt het aanbevolen deze parameters zo nauwkeurig mogelijk te meten.

Tevens wordt aanbevolen om de thermische geleidbaarheid van het grind van de locatie nogmaals in een labsetting te meten, zodat de interpretatie van de temperatuurdata beter kan worden onderbouwd.

Referentielijst

Boano, F., J. W. Harvey, A. Marion, A. I. Packman, R. Revelli, L. Ridolfi, and A. Wörman (2014). Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications, *Rev.Geophys.*, 52, 603–679, doi:10.1002/2012RG000417.

Krause, S., Abbott, B. W., Baranov, V., Bernal, S., Blaen, P., Datry, T., et al. (2022). Organizational principles of hyporheic exchange flow and biogeochemical cycling in river networks across scales. *Water Resources Research*, 58, e2021WR029771. <https://doi.org/10.1029/2021WR029771>

Nogueira, G. E. H., Schmidt, C., Partington, D., Brunner, P., Fleckenstein, J.H., (2022) Spatiotemporal variations in water sources and mixing spots in a riparian zone *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 1883–1905, 2022 <https://doi.org/10.5194/hess-26-1883-2022>

Packman, A. I., Salehin, M., Zaramella, M. (2004). Hyporheic Exchange with Gravel Beds: Basic Hydrodynamic Interactions and Bedform-Induced Advective Flows. *Journal of Hydraulic Engineering.*, 2004, 130(7): 647-656. DOI: 10.1061/~ASCE!0733-9429~2004!130:7~647!

Revil, A. (2000). Thermal conductivity of unconsolidated sediments with geophysical applications. *Journal of Geophysical Research* 105: doi: 10.1029/2000JB900043. issn: 0148-0227.

Rosenberry, D., Klos, P., Neal, A., (2012). In situ quantification of spatial and temporal variability of hyporheic exchange in static and mobile gravel-bed rivers. *Journal of Hydrological Processes* (4) 604-612 Vol 26. doi: 10.1002/hyp.8154

Sickbert, T. and Peterson, E.W. (2014). The Effects of Surface Water Velocity on Hyporheic Interchange. *Journal of Water Resource and Protection*, 6, 327-336. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.64035>

Simon, N., Bour, O., Heyman, J., Lavenant, N., Petton, C., et al. (2024). Spatiotemporal Variability of Hyporheic Flow in a Losing River Section. *Water Resources Research* 2024, 60 (6), pp.e2023WR035475. 10.1029/2023wr035475 insu-04600698

Liefveld., W.M., Jesse, P., Minimale afvoer van de Grensmaas. RWS RIZA rapport 2006.015 ISBN 90 369 57 397

A Achtergrond uit SITO-PS projectplan

Dit deelproject betreft een meetprogramma ter begeleiding van een grindsuppletie in de Gemeenschappelijk maas. Voor de biota in de Gemeenschappelijk Maas is de waterkwaliteit van belang. Deze wordt met name bepaald door temperatuur en chemie. Met name in zomers met een lage afvoer kan de watertemperatuur oplopen. Daarnaast heeft de afvoer ook invloed op de morfologische veranderingen. Daarbij speelt nog dat de lage stroomsnelheden een negatief effect kunnen hebben op stromings-minnende soorten. Een voorgenomen grindsuppletie in de Gemeenschappelijk Maas biedt de kans meer inzicht in deze processen te verkrijgen. Onderzoeksvraag is de invloed van de suppletie op deze processen, in het bijzonder op het dichtslibben van de toplaag van het sediment en de gevolgen daarvan op de hydrodynamiek en biota. Deelproject F wordt uitgevoerd in samenwerking met Rijkswaterstaat en de Universiteit Utrecht.

Werkzaamheden

Metingen van activiteit van de bodem, (grondwater)stroming en temperatuur in relatie tot suppletie in de Gemeenschappelijk maas, met behulp van glasvezelkabel. Gericht op condities voor (stromingsminnende) soorten. Om een goede aansluiting te krijgen tussen de meetvraag (wat willen we meten) en hoe we willen meten (welke meettechnieken) volgen we de GeoSIM aanpak. In deze aanpak zijn verschillende fase benoemd:

1. Probleemdefinitie: Tijdens de fase van de probleemdefinitie wordt met de opdrachtgever (Rijkswaterstaat en AIO) besproken welke processen bemeten moeten worden. De fysische processen worden dan geparаметriseerd en wordt een discussie gestart hoe dit proces in ruimte en tijd bemeten kan worden met een meetopstelling.
2. Meetsimulatie: Vervolgens kan er geanalyseerd worden of deze fysische processen daadwerkelijk gemeten kan worden met de meettechniek en of de juiste nauwkeurigheden behaald worden. Hier is dus ook een terugkoppeling voorzien met de opdrachtgever.
3. Gecontroleerde lab opstelling: Mochten er nog onduidelijkheden zijn die niet uit de meetsimulatie naar voren komen, kan dit een klein lab of veldexperiment uitgeprobeerd en geanalyseerd worden. Vervolgens kan een optimalisatie in het veld worden gemaakt.
4. Veld metingen: Uitvoering van het onder 1-3 uitgekristalliseerde veldmeetprogramma, met behulp van glasvezelkabel. Het meetprogramma brengt de morfologische activiteit van de Gemeenschappelijk maasbodem in beeld, met betrekking tot stroming en dichtslibbing. Daarnaast worden de fluctuaties in watertemperatuur vastgelegd voor de ecologie.

Het project wordt afgerond met een rapportage waarin de resultaten zijn samengevat.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl