



KWR 2022.058 | Juni 2022

Betrouwbaar aanvullen boorgaten voor gesloten bodemenergiesystemen

Een evaluatie van aanvultechnieken,
verificatiemethoden en kwaliteitsbewaking
bij het herstel van scheidende lagen in de
bodem tijdens de aanleg van GBES

Samenwerkingspartners in het TKI-project



RIJING CHAT FRAGPS; SMART SOLUTIONS

Rapport

Betrouwbaar aanvullen boorgaten voor gesloten bodemenergiesystemen

Een evaluatie van aanvultechnieken, verificatiemethoden en kwaliteitsbewaking bij het herstel van scheidende lagen in de bodem tijdens de aanleg van GBES

KWR 2022.058 | Juni 2022

Opdrachtnummer

402628

Projectmanager

Ir. J.W. (Jan Willem) Kooiman (KWR)

Projectbegeleiding

Guus van Gelder (Groen Holland), Frank Agterberg (BodemenergieNL), Chris Bergmans en Hein van der Linden (Bergmans), Liam Hollestelle en Beerd Volkers (Duratherm), Andries van der Beek en Theo Bauerhuit (Nathan), Andries Reitsema, Cristijn de Vin en Rienko Akker (Encor, voorheen Remon Aardwarmte), Eric van de Lockant (Brabant Water), Rob Lafort (Evides), Lucas Borst (PWN), Philip Nienhuis (Waternet), Jan van Lopik, (KWR Water).

Geraadpleegde experts: Marcel Bijleveld, Frank Ooms (CEBO), Gerard Pama (RKV).

Auteurs

Ir. M.L. (Martin) van der Schans (KWR), L.P. (Lennart) Brokx MSc (KWR), Dr. P.S. (Pieter) Pauw (Deltares)

Kwaliteitsborger

Dr. Ir. J.M. (Martin) Bloemendal (KWR)

Dankwoord

Deze activiteit is gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken en Klimaat met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) en uit bijdrages van BodemenergieNL, Groen Holland, Bergmans, Duratherm, Nathan, Encor, Brabant Water, Evides, PWN en Waternet.

Dit rapport is openbaar

Keywords :

Gesloten bodemenergiesystemen, aanvullen boorgaten, grondwater, kortsluitstroming

Jaar van publicatie

2022

Meer informatie

Ir. Martin van der Schans

T 030 6069537

E martin.van.der.schans@kwrwater.nl

PO Box 1072

3430 BB Nieuwegein

The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

E info@kwrwater.nl

I www.kwrwater.nl

KWR

Deltares

Juni 2022 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Managementsamenvatting

Belang: realisatie GBES moet betaalbaar zonder risico voor grondwaterkwaliteit

De toepassing van gesloten bodemenergiesystemen (GBES) neemt de komende decennia naar verwachting sterk toe van 50.000 systemen in 2018 naar mogelijk meer dan een miljoen in 2050. Bij de aanleg van GBES worden slecht doorlatende lagen in de bodem doorboord. De scheidende werking van deze lagen moet tijdens het aanvullen van het boorgat weer worden hersteld om risico's voor de grondwaterkwaliteit te voorkomen. Het aanvulproces is foutgevoelig en lastig achteraf te controleren vanwege de diepte (>100m) een kleine boorgat-diameter (<200 mm). Bovendien staat de branche onder grote druk om GBES snel en goedkoop aan te leggen. Uit onderzoek van de Inspectie voor Leefomgeving en Transport (ILT) is gebleken dat regelmatig wordt afgeweken van voorschriften omdat ze niet goed uitvoerbaar zijn, kostenverhogend werken, of omdat er discussie is over hun effectiviteit. Dit levert risico's op voor de waterkwaliteit van de steeds schaarsere schone grondwaterreserves. De bodemenergie- en drinkwatersector hebben daarom samen verkend hoe de huidige praktijk te verbeteren.

Doel: evalueren en verbeteren van aanvultechnieken

Het doel van dit onderzoek is het evalueren van de in Nederland toegepaste technieken (methoden, materialen) om de scheidende werking van doorboorde lagen in de bodem te herstellen bij realisatie van GBES. Er zijn mogelijkheden verkend om het aanvullen van boorgaten te verbeteren en voorschriften beter werkbaar te maken (werkpakket 1), de kwaliteit van aanvullingen in-situ te detecteren (werkpakket 2) en het systeem van kwaliteitsbewaking te versterken (werkpakket 3). Ook zijn kennisleemten in beeld gebracht.

Aanpak: literatuurstudie, workshops, laboratoriumexperimenten en veldproeven

In een literatuurstudie is geïdentificeerd welke meetmethoden kansrijk zijn om de afdichtende werking van het aanvulmateriaal in-situ te bepalen. Voor een methode met een akoestische glasvezel is een 'proof of concept' uitgevoerd op labschaal. De magnetometer is na tests op labschaal toegepast bij 29 boringen op praktijkschaal. Tevens zijn in ondiepe boorgaten enkele reologische en hydraulische eigenschappen getest van verschillende groutsoorten en Hergebruikt Opgeboord Materiaal (HOM). HOM bestaat uit opgeboord zand vermengd met bentoniet. Het systeem van kwaliteitsbewaking is geëvalueerd via literatuurstudie, interviews en een workshop.

Resultaten: betrouwbaarheid van afdichtingen verschilt per aanvultechniek

De magnetometer blijkt momenteel de meest kansrijke techniek om aannemelijk te maken of een boorgat op de vereiste diepte is aangevuld. De meting is betrekkelijk eenvoudig en snel toepasbaar, maar vereist wel dat boorfirma's magnetische detecteerbaar aanvulmateriaal (met magnetiet) gebruiken. Een positieve meting biedt echter geen garanties voor de doorlatendheid van het aanvulmateriaal. Bovendien zijn er onzekerheden doordat het magnetisch signaal afhankelijk is van de bodemlus (wanddikte) en aanvulmateriaal (gehalte magnetiet).

Tijdens de veldmetingen zijn vier aanvulmethoden getest. "Volledig aanvullen met vaste vulleiding" scoorde het beste: kleilagen waren in 95% van de gevallen (n=79) aangevuld, waarbij gebrekkige aanvulling met name bovenin het boorgat optrad. Het percentage fouten was groter bij "volledig aanvullen met opgetrokken vulleiding" (score 89%; n=36) waarbij er bovendien ook foutieve afdichtingen optraden op grotere diepte. Boorploegen ondervonden moeite bij het bepalen tot welk niveau het boorgat is aangevuld met grout wat een voorwaarde is om de vulleiding tot de juiste hoogte op te trekken. Bij "laagsgewijs aanvullen" was 67% van de kleiafdichtingen op de juiste hoogte aangebracht (n=33). Bovendien werden de scheidende kleilagen in minder dan de helft van de gevallen op de juiste diepte geïdentificeerd (n=17), wat een voorwaarde is om deze lagen aan te vullen. Het is dus de vraag of laagsgewijs aanvullen wel wenselijk is gezien de grote kans op fouten. Het "omgekeerd grouten" is mogelijk een werkbaar alternatief (score 100%; n=4), maar is niet toegestaan onder de huidige voorschriften en vergt nader onderzoek naar de betrouwbaarheid.

Bij metingen in ondiepe boorgaten traden zowel bij grout als HOM dichtheidsverschillen op over de diepte van het boorgat. Slechts 1 van de 5 monsters voldeed aan de wettelijk vereiste 10^{-9} m/s doorlatendheid. Vermoedelijk zijn de materialen eerder onder labcondities getest op een wijze die niet representatief is voor de condities in het veld.

Aanbevelingen: uitvoerbaar op korte termijn

Het onderzoek heeft 23 concrete aanbevelingen opgeleverd (zie onderstaande tabel) waaronder het verplichten van aanvulmateriaal dat magnetisch detecteerbaar is en waarvan naast doorlatendheid ook reologische eigenschappen bekend zijn. De aanbeveling om het aanvulniveau beter te monitoren wordt door de bij dit onderzoek betrokken boorfirma's al in de praktijk gebracht. Een betere centrale registratie van incidenten en controlemetingen zou informatie-gestuurd toezicht effectiever maken en de mogelijkheid bieden om te leren van fouten en voorschriften daarop aan te passen. Daarnaast is ook aandacht nodig voor het opsporen van boorfirma's die buiten het certificeringsschema werken. Bijvoorbeeld door invoering van een efficiëntere *whereabouts* met een GPS-tracker op de boormachine, zodat illegaal werkende boorstellingen makkelijker in het veld te identificeren zijn. De aanbevelingen werken deels kostenverhogend. Succesvolle implementatie vergt een versterking van de kwaliteitsbewaking door het overnemen van de aanbevelingen in de beoordelingsrichtlijnen BRL 2100 en 11000.

Kennisleemten: onderzoeksvragen voor verbetering op lange termijn

Via vervolgonderzoek moet meer inzicht komen in de relatie tussen in-situ metingen in een bodemlus (zoals met een magnetometer) en de doorlatendheid van de afdichting. Dit zodat er achteraf meer zekerheid kan worden geboden over de mate waarin de scheidende werking van de doorboorde kleilaag is hersteld. Daarnaast moet meer inzicht komen in welke grouten (en HOM-recepturen) geschikt zijn om boorgaten ook op lange termijn goed af te dichten.

Tot slot is het wenselijk om na te denken hoe de kwaliteitsbewaking in de toekomst te organiseren. Het huidige toezicht op veldlocaties wordt uitgevoerd door verschillende organisaties (certificerende instellingen, omgevingsdiensten, ILT) die te weinig tijd en expertise hebben. Wellicht is een ander systeem wenselijk waarbij de certificerende instellingen een grotere rol krijgen en sancties opleggen (vergelijkbaar met de branche voor asbestsanering). Of er moet een grotere rol komen voor klanten (via achteraf opeisbare boetes) en financiers (via publieke rapportage over de kwaliteitsbewaking).

Lijst met aanbevelingen

Onderstaande aanbevelingen zijn op korte termijn uitvoerbaar. De motivatie staat in §6.4

Nr.	Aanbeveling	Wie
Boortechniek en additieven		
1	Gebruik een gammasonde om scheidende lagen te identificeren bij laagsgewijs aanvullen.	Boor-firma's
2	Gebruik een grotere diameter boorkop (bijvoorbeeld 300 mm) bij laagsgewijs aanvullen	
3	Zorg voor een beperking van het werkwaterverlies (bijvoorbeeld maximaal 1 m³/uur) alvorens te starten met grouten.	
4	Gebruik een zwaardere boorspoeling (ten minste 25 kg/m³ additieven).	
Aanvulmethoden		
5	Pas alleen colloïdaalmengers toe	Boor-firma's
6	Pas magnetisch detecteerbaar aanvul-materiaal toe (2% magnetiet of aantoonbaar detecteerbaar).	
7	Bij laagsgewijs aanvullen met storkoker: controleer de hoogte van het aanvul-materiaal tijdens het aanvullen met een magnetometer.	
8	Bij volledig aanvullen met getrokken vulleiding & meerdere vaste vulleidingen: Controleer de hoogte van het aanvul-materiaal tijdens het aanvullen met een magnetometer. Zorg dat de boormeester een display heeft met de aanvulhoogte en onderkant van de aanvulslang.	
9	Bij volledig aanvullen met een vaste vulleiding: gebruik een verdringingspomp met voldoende opvoerhoogte om de gehele groutkolom vanaf de bodem van het boorgat naar maaiveld te verplaatsen.	
10	Bij volledig aanvullen: Formuleer een minimale dichtheid die het uitgaande aanvulmateriaal mag hebben t.o.v. de ingaande aanvulmateriaal.	
11	Faciliteer bemonstering van de dichtheid van aanvulmateriaal (=stopcriterium aanvullen) en aanvulling van grout vanaf maaiveld bij nazakking. Bijvoorbeeld met een mantelbuis en aftapkraan.	
12	Stop tijdelijk met aanvullen wanneer er veel meer (bijv. 3x zoveel) aanvulmateriaal wordt ingebracht dan verwacht op basis van het theoretische volume van het boorgat totdat het grout is uitgehard en de diepte gepeild.	

Nr.	Aanbeveling	Wie
Aanvulmateriaal		
13	Pas alleen aanvulmateriaal toe waarvan op productbladen vermeld is wat de reologische eigenschappen zijn en voor welk type formatiemateriaal (mediane korrelgrootte) het product geschikt is.	Boor-firma's
14	Maak een eenvoudige beslisboom voor boorploegen wanneer ze moeten overstappen op ander aanvulmateriaal en boorspoeling.	Lever-anciers
Verificatiemetingen		
15	Laat toezichthouders en/ of certificerende instellingen periodiek boorgaten nameten met een magnetometer. Bij laagsgewijs aangevulde boorgaten is een extra nameting met een gamma-sonde wenselijk om te controleren of alle kleilagen zijn gedetecteerd.	ILT, OD, CI
Kwaliteitsbewaking		
16	Zorg voor adequate training zodat boormeesters voldoende achtergrondinfo en tools hebben om technieken goed toe te passen.	BeNL
17	Laat boormeesters voor hun certificering kleilagen identificeren in boringen van 200 m diep i.p.v. 20 m diep	CI
18	Centrale en uniforme registratie van afwijkingen	ILT, OD, CI
19	Whereabouts verplichting voor boorstellingen vereenvoudigen (GPS-tracker, vergelijkbaar met flight-radar)	ILT
20	Meer expliciete informatie-gestuurde intensiteit van toezicht.	ILT, OD, CI
21	Verzwaren van sancties bij overtredingen.	ILT
22	Periodiek rouleren van certificerende instelling (bijvoorbeeld elke 3 jaar).	Boor-firma's
23	Neem bovenstaande aanbevelingen op in BRL 2100 en/ of BRL 11000	SIKB

Lijst met kennisleemten

De motivatie voor onderstaand overzicht met kennisleemten staat in \$6.5.

Nr.	Kennisleemte	Aanvul-methode *
Boortechiek en additieven		
A	Inzicht kwaliteit boorbeschrijving (vergroten steekproef)	LG
B	Algoritme voor automatische interpretatie van boorprofiel uit boorgatmeting met gamma-sonde	
C	Mogelijkheid om verlies boorspoeling te beperken door stimuleren van diep-bed filtratie i.p.v. oppervlakkige afpleistering boorgat	VV, VG
Aanvulmethoden		
D	Door-ontwikkelen omgekeerd grouten	VO
E	Lange termijn effect verloren aanvulleiding op bodem en grondwater	VV
F	Methode om hoogte aanvulslang te bepalen	VG
G	Overweeg verbieden van laagsgewijs aanvullen	LG

(*) LG = Laagsgewijs,
 OG = omgekeerd grouten,
 VV = Volledig aanvullen met vaste vulleiding,
 VG = Volledig aanvullen met getrokken vulleiding
 HOM = Hergebruik opgeboord materiaal

Nr.	Kennisleemte	Aanvul- methode *
Aanvulmateriaal		
H	Reologische eisen en testprotocol voor grout (en HOM) bij toelating. Een noodzaak extra tests HOM in het veld.	VV, VG, HOM
I	Inzicht in gedrag grout in boorgat (en aanvulklei) tijdens aanbrengen en bij verzilting	LG, VV, VG, HOM
J	Inzicht in gedrag magnetiet in boorgat (uitzakken)	VV, VG, HOM
K	Optimalisatie van HOM samenstelling	HOM
Verificatiemetingen		
L	Optimalisatie van verificatiemetingen (magnetometer, gamma, gamma-gamma)	VV, VG
M	Ontwikkelen van akoestische meetmethoden (DAS-VSP)	
Kwaliteitsbewaking		
N	Incidenten- en kwaliteitsregister	Alle
O	Rolverdeling bij kwaliteitsbewaking	typen
P	Handelingsperspectief bij foutief aanvullen	Aanvul- methoden

Inhoud

Managementsamenvatting	3
Lijst met aanbevelingen	5
Lijst met kennisleemten	6
Inhoud	7
1. Introductie	9
1.1 Aanleiding	9
1.2 Doel	10
1.3 Leeswijzer	10
1.4 Gebruikte afkortingen en terminologie	10
2 Achtergrond	11
2.1 Wat is een GBES	11
2.2 Boortechiek en -additieven	11
2.3 Aanvulmethode	12
2.4 Aanvulmateriaal	13
2.5 Faalmechanismen	14
2.6 Verificatiemetingen	15
2.7 Kwaliteitsbewaking	16
3 Werkwijze	18
3.1 Laboratoriumproeven boorspoeling	18
3.2 Laboratoriumproeven magnetische detectie van aanvulmateriaal	19
3.3 Veldproeven in ondiepe boringen	20
3.4 Veldproeven op praktijkschaal	22
4 Resultaten	24
4.1 Laboratoriumproeven boorspoeling	24
4.2 Laboratoriumproeven magnetische detectie van aanvulmateriaal	25
4.3 Veldproeven in ondiepe boringen	28
4.4 Veldproeven op praktijkschaal: laagsgewijs aanvullen	29
4.5 Veldproeven op praktijkschaal: volledig aanvullen	31
5 Discussie	40
5.1 Boortechiek en additieven	40
5.2 Aanvulmethode	43
5.3 Aanvulmateriaal	45
5.4 Beoordelingscriteria in het veld	47
5.5 Verificatiemetingen	48
5.6 Kwaliteitsbewaking	49
5.7 Rolverdeling bij kwaliteitsbewaking	51

6	Samenvatting, conclusies en aanbevelingen	53
6.1	Aanleiding en doel	53
6.2	Aanpak op hoofdlijnen	53
6.3	Conclusies	54
6.4	Aanbevelingen: uitvoerbaar op korte termijn	55
6.5	Kennisleemten: onderzoeksvragen voor verbetering op lange termijn	59
7	Literatuurlijst	61

BIJLAGEN**(zie separate rapportage KWR 2022.058a)**

I	Berekende formatieweerstand laboratoriumproeven boorspoeling
II	Dichtheidsmetingen Veldproeven Ondiepe boringen
III	Dichtheidsmetingen veldproeven op praktijkschaal
IV	Korrelverdeling, doorlaatvermogen en porositeit
V	Boorgatmetingen
VI	Formulieren veldobservaties tijdens veldproeven op praktijkschaal

1. Introductie

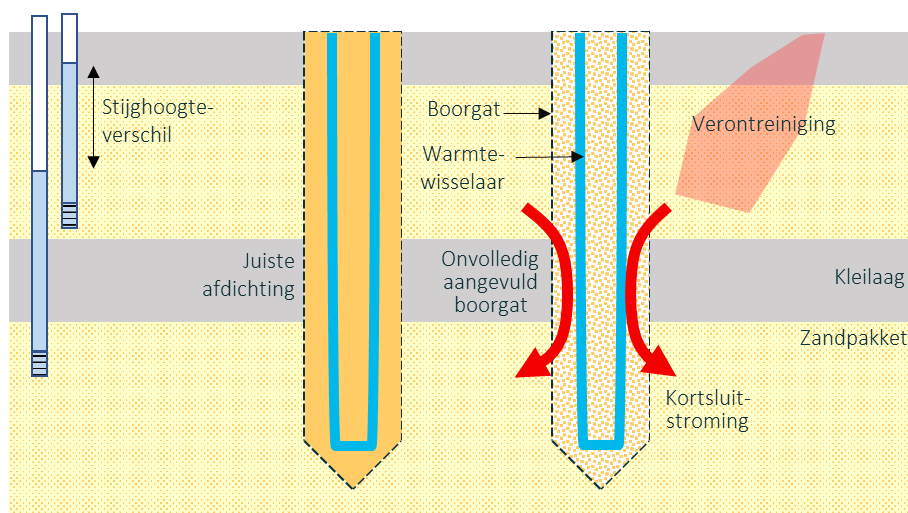
1.1 Aanleiding

Bodemenergiesystemen zijn in Nederland sinds het begin van de 21^e eeuw grootschalig toegepast resulterend in circa 50.000 gesloten en 3.000 open bodemenergiesystemen in 2018 (Schout & Bloemendal 2022). De toepassing zal komende decennia sterk groeien om te voldoen aan de ambities van het klimaatakkoord. In 2050 heeft naar verwachting 10 tot 30% van de gebouwen in Nederland een bodemenergiesysteem (Naber et al. 2016) waarvan het grootste deel gesloten bodemenergiesystemen (GBES).

Bij het aanleggen van GBES worden slecht doorlatende lagen in de bodem doorboord. De scheidende werking van deze lagen moet na de doorboring weer worden hersteld om risico's voor de grondwaterkwaliteit te voorkomen. Omdat het bij aanleg van gesloten bodemenergiesystemen om diepe (>100m) boorgaten met een relatief kleine diameter (<20 cm) gaat, is het aanvullen hiervan foutgevoelig. Wanneer een boorgat niet goed is aangevuld, kan kortsluitstroming optreden tussen watervoerende pakketten wat tot menging kan leiden van schone zoetwatervoorraden met brak of verontreinigd grondwater (Figuur 1-1). Dit is een punt van zorg voor drinkwaterbedrijven en bevoegd gezag.

Uit toezicht door de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT 2021) is gebleken dat bij het aanvullen regelmatig wordt afgeweken van de voorschriften, omdat die in de praktijk niet goed uitvoerbaar zijn of kostenverhogend werken. Daarnaast staat de branche onder grote druk om de GBES snel en goedkoop aan te leggen om de energietransitie te versnellen tegen beperkte kosten. Dit staat op gespannen voet met het goed aanvullen van boorgaten. Ook is er discussie over regels m.b.t. aanvullen omdat niet duidelijk is of ze werken. In dit speelveld is het daarom cruciaal om duidelijkheid te hebben over welke aanvulmethoden en -materialen (hierna samen aangeduid als “aanvultechnieken”) leiden tot het beste herstel van de doorboorde lagen en hoe de kwaliteit van deze methoden kan worden gewaarborgd. De technieken mogen niet uitnodigen tot afwijkingen en moeten dus kosten efficiënt zijn, bijdragen aan bescherming van grondwater en in de praktijk toepasbaar.

Bodemenergie Nederland, boorfirma's (Bergmans, Duratherm, Nathan, Encor) en waterbedrijven (Brabant Water, Evides, PWN, Waternet), GroenHolland, Deltares en KWR hebben een gezamenlijk onderzoek uitgevoerd naar mogelijkheden om het herstel van de scheidende lagen na GBES-boringen te verbeteren.



Figuur 1-1. Schematische weergave van de noodzaak voor herstel van hydraulisch scheidende lagen in boorgaten.

1.2 Doel

Het doel van dit onderzoek is het evalueren van de in Nederland toegepaste methoden en materialen om de scheidende werking van doorboorde lagen in de bodem te herstellen bij realisatie van GBES. Op basis van deze evaluatie zijn mogelijkheden verkend om het aanvullen van boorgaten te verbeteren en voorschriften beter werkbaar te maken (werkpakket 1), de kwaliteit van aanvullingen in-situ te detecteren (werkpakket 2) en het systeem van kwaliteitsbewaking te versterken (werkpakket 3). Ook zijn kennisleemten in beeld gebracht.

De eventuele gevolgen van foutieve afdichtingen en andere mogelijke vormen van verontreinigingen bij GBES die los staan van het aanvulproces (zoals lekkage van circulatiemedium, boren in verontreinigde grond) vallen buiten de scope van dit onderzoek.

1.3 Leeswijzer

Deze rapportage geeft eerst een overzicht van de in Nederland toegepaste aanlegtechnieken, faalmechanismen, verificatiemetingen en kwaliteitsbewaking (hoofdstuk 2). Hoofdstuk 3 beschrijft de aanpak van het onderzoek naar de betrouwbaarheid van aanvulmethoden. Hierna volgen de resultaten (hoofdstuk 4) en discussie (hoofdstuk 5). Tot slot volgen in hoofdstuk 6 de conclusies, aanbevelingen en kennisleemten. Metingen zijn beschreven in een separaat bijlagenrapport. Hoewel de focus van het voorliggende rapport ligt op het aanvulproces, biedt het tevens een synthese van deelrapporten:

Werkpakket 1 (aanvulproces)	• Labproeven naar de afdichtende werking van filter cake afzettingen op de boorgatwand (Nijhof 2020, Nijhof et al. 2021). • Verslagen van veldproeven in Bergen op Zoom, Culemborg, Dongen, Eerbeek, Etten-Leur, Heerde, Stavoren, Weesp (vertrouwelijk, alleen besproken met boorfirma).
Werkpakket 2 (verificatiemetingen)	• Literatuuroverzicht van technieken om de integriteit van afdichtingen in GBES te bepalen (Pauw 2022a) • Labproeven naar de haalbaarheid om integriteit van grout in GBES te verifiëren in middels akoestische signalen en glasvezelkabels. (Pauw & Obando 2022). • Labproeven naar de haalbaarheid om integriteit van aanvulmateriaal in GBES te verifiëren middels een magnetometer (Pauw 2022b)
Werkpakket 3 (kwaliteitsbewaking)	• Verkenning van mogelijkheden tot verbetering van de kwaliteitsborging bij aanvullen van GBES (de Graaf et al. 2021)

1.4 Gebruikte afkortingen en terminologie

BRL	Beoordelingsrichtlijn
CI	Certificerende Instelling
GBES	Gesloten bodemenergiesysteem
ILT	Inspectie Leefomgeving en Transport
OD	Omgevingsdienst
PAC	Polyanionische cellulose (=booradditief)
REGIS	Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem

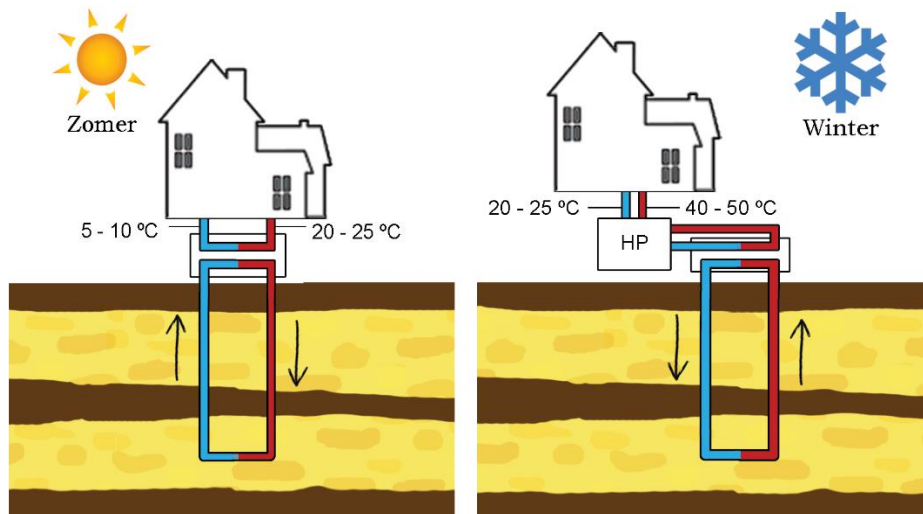
In dit rapport wordt het “magnetisch signaal” als synoniem gebruikt voor de “magnetische susceptibiliteit”. Het magnetisch signaal wordt uitgedrukt in een dimensieloze fractie (ppm). Hoe negatiever het magnetisch signaal, hoe hoger de concentratie magnetiet. Met een sterker/hoger/groter magnetisch signaal wordt bedoeld op een negatievere waarde en dus een hogere concentratie magnetiet.

2 Achtergrond

2.1 Wat is een GBES

In een GBES wordt warmte en koude uitgewisseld met de bodem door een vloeistof te laten circuleren door een gesloten leidingstelsel in de ondergrond (Figuur 2-1). Is dit circulatoriemedium kouder dan de ondergrond, dan neemt de vloeistof warmte op. Is het circulatoriemedium warmer, dan staat het warmte af. Op deze wijze wordt er in de winter warmte onttrokken aan de bodem en via een warmtewisselaar en warmtepomp afgegeven aan het gebouw, terwijl in de zomer juist koude wordt onttrokken en afgegeven. De circulatievloeistof staat dus niet in direct contact met grondwater, maar wisselt alleen warmte uit met de ondergrond via warmtegeleiding. Het temperatuurbereik van de vloeistof ligt tussen -5°C en $+30^{\circ}\text{C}$ (Kennisplatform Bodemenergie 2021). In Nederland zijn water, monpropyleenglycol, ethyleenglycol en kaliumcarbonaat toegestaan als circulatoriemedium (SIKB 2019b).

Het leidingstelsel waardoor de vloeistof circuleert wordt ook wel aangeduid als bodemwarmtewisselaar of bodemlus en bestaat uit polyethylene leidingen met een uitwendige diameter van ca. 25-40 mm. Ze worden vaak geplaatst in verticale boorgaten met een relatief kleine diameter van 120 tot 250 mm meestal tot een diepte van 200 meter. Deze diameter is klein vergeleken met bijvoorbeeld open bodemenergiesystemen en grondwaterputten (400 tot 1000 mm). Dit helpt om de doorlooptijd en bouwkosten te beperken, maar bemoeilijkt het aanvullen van het boorgat.



Figuur 2-1: Schematische weergave van de werking van een GBES (Kennisplatform Bodemenergie 2021).

2.2 Boortechniek en -additieven

Bij de aanleg van een GBES wordt gebruik gemaakt van de financieel voordelige spoelboormethode (Schout & Bloemendal 2022). Hierbij wordt boorspoeling door de boorstangen naar de bodem van het boorgat gepompt, waar het samen met de beweging van de boorkop het sediment losmaakt. De boorspoeling voert het sediment vervolgens mee door het boorgat langs de boorstang naar een spoelbak of een spoelgat aan het maaiveld. Hier kan het grovere sediment bezinken, waarna de boorspoeling weer opnieuw het boorgat ingepompt kan worden. Aan de hand van het sediment dat uit het boorgat mee naar bovenkomt kan een boorbeschrijving worden gemaakt (van der Schans et al. 2020).

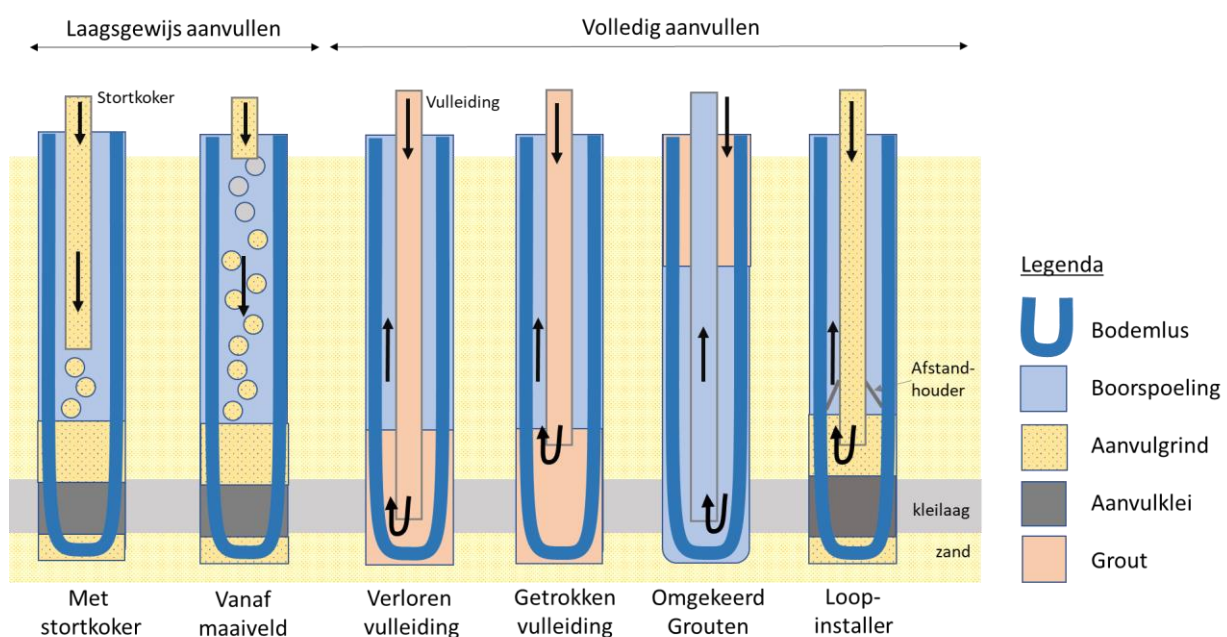
Als boorspoeling wordt over het algemeen drinkwater gebruikt aangevuld met additieven die het water viskeuzer maken en helpen om de boorgatwand af te pleisteren en zo het verlies van boorspoeling en aanvulmateriaal naar de ondergrond te beperken. Als boorspoeladditief wordt vaak bentoniet gebruikt in combinatie met biologisch afbreekbare polymeren. (CEBO, pers. med). Deze polymeren zijn name geschikt om de grotere poriën in grovere zandlagen af te dichten (Kenniscentrum InfoMil 2013).

2.3 Aanvulmethode

Nadat de bodemlus in het boorgat is geplaatst, moet het boorgat weer dichtgemaakt worden. Cruciaal hierbij is dat de scheidende werking van doorboorde slecht doorlatende lagen hersteld worden. In Nederland zijn twee type aanvulmethoden toegestaan: laagsgewijs aanvullen en volledig aanvullen (SIKB 2019b). (Figuur 2-2).

Bij **laagsgewijs aanvullen** wordt het boorgat alleen ter hoogte van de slecht doorlatende lagen aangevuld met een afdichtend materiaal, veelal zwelklei. Tussen de afdichtingen wordt het boorgat aangevuld met aanvulgrind. Tot 2019 was dit de gangbare methode voor het aanvullen van boorgaten van GBES en het wordt nog steeds regelmatig toegepast. Dit in tegenstelling tot omliggende landen, waar deze methode óf niet toegestaan is, zoals België (Vlaanderen), Zweden en het grootste deel van Duitsland, of nauwelijks meer wordt toegepast zoals in Denemarken (de Graaf et al., 2021). Groot voordeel van een laagsgewijze aanvulling zijn de relatief lage investeringskosten. De snelle mobilisatie (geen pompinstallatie nodig) maakt het met name kosteneffectief voor locaties waar slechts een paar lussen nodig zijn. Nadeel is dat de methode foutgevoelig is omdat eerst alle scheidende lagen tijdens de boring moeten worden geïdentificeerd en vervolgens op de juiste diepte weer aangevuld. Dit vergt expertise en een zorgvuldige werkwijze. Voor laagsgewijs aanvullen bestaan twee methoden:

- **Met stortkoker:** Een stortkoker (of valpijp) wordt gebruikt om het aanvulmateriaal vanaf maaiveld op de juiste diepte te brengen. Volgens BRL 11000 is het gebruik van een stortkoker verplicht bij laagsgewijs aanvullen en de valhoogte maximaal 30 m. Bij kleine boorgatdiameters (< 200 mm) is het gebruik van een stortkoker echter lastig toepasbaar.
- **Zonder stortkoker:** Aanvulmateriaal kan ook vanaf maaiveld in het boorgat gestort worden. Deze methode is sneller en minder arbeidsintensief, en daardoor goedkoper, maar ook minder goed te beheersen en daarom niet toegestaan volgens BRL 11000.



Figuur 2-2. Schematische weergave van de verschillende aanvulmethoden.

Bij een **volledige aanvulling** wordt het gehele boorgat aangevuld met een afdichtend materiaal, waardoor gelijk ook de scheidende werking van doorboorde slecht doorlatende lagen hersteld is. Naar aanleiding van de vele afwijkingen die ILT constateerde bij het laagsgewijs aanvullen van boorgaten, zijn sinds 2019 veel boorbedrijven overgestapt op volledig aanvullen. Bij volledig aanvullen wordt het aanvulmateriaal (veelal een groutmengsel) voorgemengd met water en via een vulleiding op diepte het boorgat ingepompt. De BRL 11000 vereist dat er wordt doorgepompt totdat er aanvulmateriaal uit het boorgat naar boven komt met dezelfde samenstelling als het ingaande grout. De volgende aanvulmethoden kunnen hiervoor worden toegepast:

- **Grouten met verloren vulleiding:** Bij deze methode wordt het grout in het boorgat gepompt via een vulslang die reikt tot op de bodem van het boorgat. De vulslang kan na het aanvullen niet meer worden verwijderd en blijft dus in het boorgat achter. Voordeel van deze methode is dat er tijdens het aanvullen niet gemonitord hoeft te worden hoe ver het boorgat aangevuld is. Nadeel is dat er voor elke boring een nieuwe vulleiding gebruikt moet worden. In Duitsland is dit de meest toegepaste methode (de Graaf et al., 2021).
- **Grouten met opgetrokken vulleiding:** Tijdens het grouten wordt de vulleiding mee omhooggetrokken, waarbij deze onder het aanvulniveau moet blijven. Voordeel van deze methode is dat de vulleiding na het aanvullen uit het boorgat getrokken en hergebruikt kan worden. Nadeel is dat het lastig kan zijn om het aanvulniveau constant te monitoren. Bij te snel optrekken komt de vulleiding boven het aanvulniveau uit, bij te langzaam optrekken kan de vulleiding vast komen te zitten. Grouten met opgetrokken vulleiding is de meest toegepaste methode in Vlaanderen (de Graaf et al., 2021).
- **Loopinstallator:** Een loopinstallator verwijst naar een methode waarmee de bodemlus tegen de wanden van het boorgat gepositioneerd wordt tijdens aanvullen van het boorgat. Hierbij worden kleikorrels ingepompt voor het afdichten van de afsluitende lagen. Één van de bij dit onderzoek betrokken boorfirma's heeft geëxperimenteerd met dit systeem maar ondervond dat het storingsgevoelig was door te snelle zwelling van de kleikorrels (met name bij regenachtig weer). Bovendien werkte het veel trager dan andere aanvulmethoden. Deze methode is daarom verder niet meegenomen in dit onderzoek.
- **Omgekeerd grouten:** Bij deze methode wordt het grout vanaf maaiveld aangebracht in de annulaire ruimte tussen de vulleiding en boorgatwand. Het grout stroomt onder invloed van de grotere dichtheid (zwaartekracht) naar beneden waardoor de boorspoeling uit het boorgat wordt weggedrukt. Er wordt gestopt met aanvullen wanneer het aanvulmateriaal door de vulleiding naar buiten treedt. Ook hier is sprake van een verloren vulleiding.

2.4 Aanvulmateriaal

Het aanvullen van GBES boorgaten heeft als doel om beschadiging van de bodemlus te voorkomen door instorting van het boorgat en te zorgen voor thermische uitwisseling met de omliggende formatie. Daarnaast is het belangrijk om de hydraulisch remmende werking van bodemlagen te herstellen. BRL 2100 eist daarom dat het aanvulmateriaal ter hoogte van scheidende lagen een doorlatendheid heeft van minder dan 10^{-9} m/s (SIKB 2018). Er worden verschillende materialen gebruikt om de boorgaten aan te vullen.

Bij laagsgewijs aanvullen wordt er voor het herstellen van de slecht doorlatende lagen gebruik gemaakt van zwellende **aanvulklei**. In het tussenliggende traject wordt aanvulgrind gestort. In theorie zou ook het gehele boorgat aangevuld kunnen worden met aanvulklei. Dit wordt in de praktijk echter zelden toegepast.

Bij volledig aanvullen wordt in meeste gevallen gebruik gemaakt van grout, dat bestaat uit water, zand en cement en/of bentoniet, dat voorgemengd is door de leverancier of in het veld vermengd moet worden volgens de voorschriften van de leverancier. **Cement-gebaseerde grout** hardt snel uit, waardoor er weinig aanvulmateriaal verloren gaat en het boorgat snel afdicht is. Deze eigenschappen zijn zeker het geval voor cement-gebaseerde grouten zonder bentoniet. Cement-gebaseerde grout met bentoniet blijft wat plastischer. Er zijn twijfels over het risico op scheurvorming na uitharding van cement-gebaseerd grout onder invloed van grond mechanische effecten

in combinatie met de verwarming en koel cycli waaraan het uitgeharde aan vulmateriaal wordt blootgesteld (de Graaf et al., 2021; Schout & Bloemendal, 2020). **Bentoniet-gebaseerde grout** is daarentegen een stuk plastischer, wat de kans op scheurvorming aanzienlijk verkleint aangezien het materiaal zowel de grondmechanische effecten en krimp onder invloed van temperatuurvariaties kan opvangen. Een uitdaging bij dit materiaal is het vinden van de juiste additieven om uitzakken van de zwaardere fractie te voorkomen. De productie van bentoniet-gebaseerde grout levert minder CO₂ uitstoot dan cement. Bij bentoniet-gebaseerde grout kan significante nazakking optreden door het samendrukken van het materiaal en/of het verdwijnen in de omliggende formatie.

Tot slot is door de firma Bergmans een methode ontwikkeld waarbij de zandfractie van het opgeboorde sediment wordt vermengd met water en bentoniet tot **Hergebruik Opgeboord Materiaal (HOM)**. Door hergebruik van een deel van het sediment kan bespaard worden op de productie en aanvoer van nieuwe bouwmaterialen en de afvoer van restproducten. Dit beperkt milieu- en klimaatafdruk en zorgt voor een grote kostenreductie. Een nadeel is dat de samenstelling en daarmee de reologische eigenschappen van het aan vulmateriaal afhankelijk zijn van de bodemopbouw en de mate waarin de klei- en grindfractie van het opgeboorde sediment gescheiden worden in de schudzeef.

Een belangrijk aandachtspunt bij het aanmaken van grout in het veld is dat het goed wordt vermengd met water, volgens de voorschriften van de leverancier. Hiervoor bestaan verschillende typen mengapparaten. Bij een doorstroommenger worden het water en groutpoeder in-line vermengd met een archimedesschroef en direct het boorgat ingepompt. Bij een colloïdaalmenger wordt het materiaal voorgemengd per batch en in een buffervat bewaard (om continuïteit in het aanvullen te waarborgen) alvorens het naar het boorgat te verpompen. Een colloïdaalmenger heeft als voordeel dat het water en poeder beter vermengd raken en een langere contacttijd voor toepassing. Het is daarom voor de meeste typen grout een betere optie dan een doorstroommenger. Tot slot kan het benodigde aan vulmateriaal van een heel boorgat vooraf in 1x gemengd worden en ook tijdens het aanvullen in beweging gehouden met een roerwerk (draaiend rad met schoepen). Deze laatste methode wordt gebruikt bij toepassing van HOM.

Enkele boorfirma's laten het grout kant en klaar voorgemengd op het werk afleveren. Deze werkwijze wordt ook in omliggende landen zoals Duitsland en Denemarken gevolgd (de Graaf et al. 2021).

2.5 Faalmechanismen

Er zijn in theorie verschillende oorzaken denkbaar waardoor de scheidende werking van doorboorde lagen al bij aanleg niet goed worden hersteld (de Boer et al. 2021, Schout & Bloemendal 2022, van Vliet et al. in prep):

- Boorgat bewust niet aangevuld; bijvoorbeeld door tijdgebrek van de boorploeg.
- Foutieve boorbeschrijving: Wanneer, bij laagsgewijs aanvullen, scheidende lagen niet goed worden geïdentificeerd tijdens het boorproces, is het ook niet mogelijk om deze op de juiste diepte af te dichten.
- Afdichtmateriaal op onjuiste diepte: Bij laagsgewijs aanvullen moet de afdichtklei ter hoogte van scheidende lagen worden aangebracht. Zit de afdichtklei te diep of ondiep, dan kan alsnog kortsluitstroming optreden via het boorgat.
- Boorgat onvolledig aangevuld: Dit kan optreden wanneer waterpockets achterblijven die niet worden verdrongen door grout (volledig aanvullen) of wanneer het afdichtmateriaal halverwege blijft steken (laagsgewijs aanvullen).
- Zand-/ kleival: Soms stort een boorgat in voordat deze volledig is aangevuld of stort deze deels in door kleival. Als hierbij zand achterblijft in het boorgat ter hoogte van de scheidende laag, dan kan hier een permeabele verbinding ontstaan tussen watervoerende pakketten. Dit hangt samen met de gekozen boorspoeling en soms ook de kwaliteit van de boorkop die voldoende scherp moet zijn.

- Verlies aan vulmateriaal aan formatie: Wanneer het formatie materiaal uit grove korrels of scheuren bestaat, en niet goed is afgedicht met een filtercake, dan kan grout de formatie instromen.
- Zetting in boorgat.
- Uitgangsmateriaal te doorlatend.
- Foutief mengproces of mengverhouding.

Ook na aanleg kan de doorlatendheid van het boorgat toenemen door degradatie:

- Ontmenging: uitzakking van bestanddelen met een hoger soortelijk gewicht.
- Erosie van grout: door stroming van grondwater.
- Scheurvorming: door opwarmen/ koelen.
- Uitloging: dit zou in theorie kunnen optreden bij cementgebaseerde grout, vanwege de hoge pH t.o.v. het omliggende grondwater.
- Dispergeren: het in kleine aggregaten uiteenvallen van grout en aanvulklei onder invloed van zout grondwater (TAW 1996).

De detectiemethoden moeten dus bij voorkeur geschikt zijn om zowel afname van permeabiliteit, afwezigheid van aanvulklei/ grout en scheurvorming te detecteren.

2.6 Verificatiemetingen

Door Pauw (2022a) is in het kader van dit project een literatuurstudie uitgevoerd naar verschillende methoden voor het in-situ evalueren van de scheidende werking (kwaliteit) van afdichtingen. Daarbij zijn directe en indirecte methoden onderscheiden. Directe methoden omvatten het meten van de doorlatendheid van een afdichting. Een voorbeeld van een directe methode is een falling head test. Dergelijke testen zijn in de praktijk niet goed toepasbaar omdat ze de aanvulling aantasten en kostbaar zijn. Bij indirecte methoden dient men de waarnemingsgrootte middels een empirische relatie te relateren aan de doorlatendheid van de afdichting. In veel gevallen is dit slechts beperkt mogelijk, en geeft de waargenomen grootte alleen een indicatie van de aan- of afwezigheid van afdichtmateriaal en kan daarmee als 'diagnose instrument' fungeren. Meting die gericht zijn op het bepalen van de verticale (lek)stroomsnelheid kunnen belangrijke informatie leveren over kortsluitstroming maar hebben als nadeel dat ze afhankelijk zijn van de stijghoogtegradiënt over een scheidende laag. Deze kan veranderen door de tijd, bijvoorbeeld bij realisatie van een nieuwe grondwaterwinning of open bodemenergiesysteem. Methoden die alleen toepasbaar zijn tijdens het aanvullen van het boorgat (zoals metingen van de suspensiedruk in het boorgat) zijn ook ongeschikt voor dit onderzoek. Alleen indirecte technieken die achteraf toepasbaar zijn en onafhankelijk van de actuele stroomsnelheid zijn daarom beschouwd.

In Tabel 2.1 (laatste kolom) is onderscheid gemaakt tussen bestaande technieken waarvoor meetsondes commercieel beschikbaar zijn die passen in bodemlussen met 25 mm inwendige diameter en waarmee inmiddels diverse ervaringen zijn opgedaan. Potentiële technieken omvatten meetsondes die niet in 25 mm bodemlussen passen maar eerder wel zijn toegepast voor het evalueren van afdichtingen in grotere diameters. Om snel tot resultaten en implementatie te komen is besloten om te kiezen uit commercieel beschikbare sensoren.

Alle bestaande methoden (natuurlijke gammastraling, gamma-gamma, magnetische susceptibiliteit en temperatuur) hebben als nadeel dat de diameter van de lussen (en vulleiding) in het boorgat, hun onderlinge positie en de positie van de sensor de meting beïnvloeden. Een bijkomend nadeel van temperatuur (bijvoorbeeld thermische responsetest vanuit de bodemlus) is dat de meting beïnvloed wordt door thermische processen en eigenschappen van de formatie en het aangevulde boorgat. Daarnaast is het lastig om met voldoende resolutie te meten vanwege het mogelijke optreden van thermische convectie in de bodemlus en duurt de meting relatief lang waardoor het niet mogelijk zal zijn om het aanvullen live te volgen. Bij temperatuurmetingen, natuurlijke

gammastraling en gamma-gamma speelt bovendien mee dat de meetwaarde significant kan worden beïnvloed door de formatie waardoor de methode niet zal werken zonder referentiemeting in een open boorgat.

Tabel 2.1: Overzicht van de beschreven indirecte geofysische methoden (Pauw 2022a)

Geofysische methode	Af te leiden eigenschappen	Toepassing	Status techniek
Natuurlijke gammastraling	Massaconcentratie radioactieve elementen, mineralogie (spectraal-gamma)	Schatten van kleigehalte, lithologische interpretatie, detectie kleiaanvullingen	Bestaand
Gamma-gamma	Bulk dichtheid, porositeit	Lithologische interpretatie, dichtheid aanvulmateriaal	Bestaand
Magnetische susceptibiliteit	Magnetische susceptibiliteit van het poreuze medium	Aantonen aanwezigheid magnetisch afdichtmateriaal	Bestaand
Temperatuur	Thermische eigenschappen poreuze medium, advectie	Klassieke toepassing: schatting thermische weerstand boorgat	Bestaand
Neutron-dichtheid	(Neutron) porositeit	Lithologische interpretatie, eigenschappen afdichting	Potentieel
Nuclear magnetic resonance (NMR)	Porositeit (vrije en gebonden), permeabiliteit, poriegrootte verdeling	Schatting van doorlatendheid en porositeit van de afdichting	Potentieel
Elektro-magnetische (EM)-inductie	Elektrische geleidbaarheid ondergrond	Lithologische en hydrochemische interpretatie aanvulling	Potentieel
Grondradar	Reflectie van radargolven	Lithologische en structurele interpretatie aanvulling	Potentieel
Sonic cement bond logging (CBL)	Kwalitatieve indruk binding casing-cement, akoestische impedantie aanvulling	Inspectie van eventuele ruimtes tussen de casingwand en het aanvulmateriaal, akoestische eigenschappen aanvulling	Potentieel

Uit bovenstaande evaluatie volgt dat de interpretatie van magnetometer metingen makkelijker is dan de andere bestaande technieken. Bovendien zijn ze makkelijker uitvoerbaar en bevatten ze geen radioactieve bron (in tegenstelling tot de gamma-gamma sondes). Om deze reden is gekozen om de magnetometer verder te beschouwen als controle methode tijdens de lab- en veldproeven voor het beoordelen van de kwaliteit van een afdichting. Een belangrijk potentieel nadeel van de methode ten opzichte van gamma-gamma en (in mindere mate) akoestische methoden is dat de magnetische susceptibiliteit waarschijnlijk minder direct gerelateerd is aan de doorlatendheid dan de dichtheid. Dit zou nader uitgezocht moeten worden.

2.7 Kwaliteitsbewaking

Bij gesloten bodemenergiesystemen heeft het al dan niet juist aanvullen van de kleilagen in de boorgaten beperkt invloed op het energetisch functioneren van deze systemen. Het goed aanvullen van een boorgat brengt kosten met zich mee die zich niet terugvertalen in een beter systeem. Om bescherming van de bodem af te dwingen is daarom een kwaliteitssysteem opgezet. Dit voorziet in publieke handhaving en toezicht door (overheidsorganisaties ILT, gemeenten omgevingsdiensten, provincie) en daarnaast audits plaats van boorfirma's door de certificerende instellingen op basis van beoordelingsrichtlijnen (BRL's; zie Figuur 2-3).

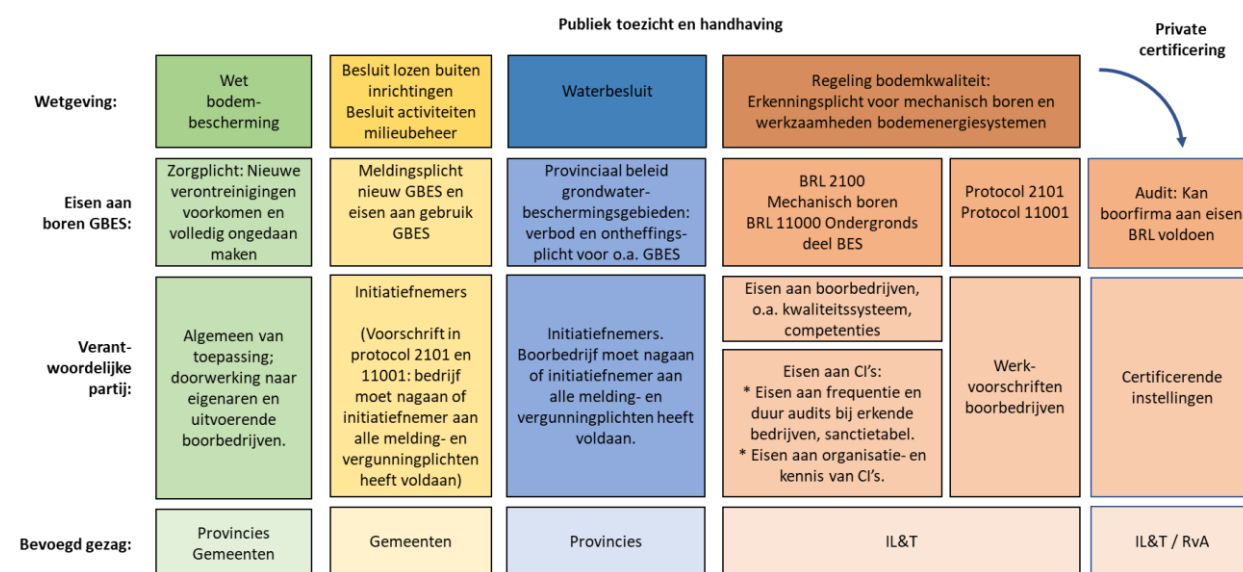
De meest relevante uitvoeringseisen staan in de BRL SIKB 2100 'Mechanisch boren' (SIKB 2018), BRL SIKB 11000 'Ontwerp, realisatie en beheer en onderhoud ondergronds deel bodemenergiesystemen' (SIKB 2019a):

- Het afdichtende materiaal moet een doorlatendheid hebben (na zwellen of uitharden) van maximaal 10^{-9} m/s.
- Bij laagsgewijs aanvullen is het verplicht om scheidende lagen te detecteren tijdens boren. Het aanvulmateriaal wordt gedoseerd met een storkoker of slang waarbij de valhoogte tot de bovenzijde van het aangevulde materiaal niet meer bedraagt dan 30 m. De diepte van het aanvulmateriaal moet periodiek worden gepeild en bij elke overgang van aanvulmateriaalsoort.

- Bij geheel aanvullen van het boorgat moet het grout worden voorgemengd conform de voorschriften van de leverancier. De vulleiding blijft tijdens het grouten onder het aanvulniveau. Het grouten wordt voortgezet totdat tenminste de theoretische inhoud van het boorgat is verpompt en het grout dat aan de bovenzijde van het boorgat uitstroomt dezelfde samenstelling heeft als het verpompte grout.

KIWA BRL 5078 'Groutmengsels voor het afdichten van boorgaten' (KIWA 2019) stelt daarnaast eisen waar het grout aan moet voldoen m.b.t. chemische samenstelling en emissie van verontreinigingen.

In omliggende landen (Duitsland, België, Denemarken) vinden incidenteel ook controles plaats op de kwaliteit van het grout via een thermische response test. In enkele Duitse deelstaten worden boorgatmetingen uitgevoerd.



Figuur 2-3. Regelgeving, rollen en bevoegde gezagen t.a.v. boringen voor GBES. Het figuur aangepast o.b.v. de Graaf et al. (2021).

3 Werkwijze

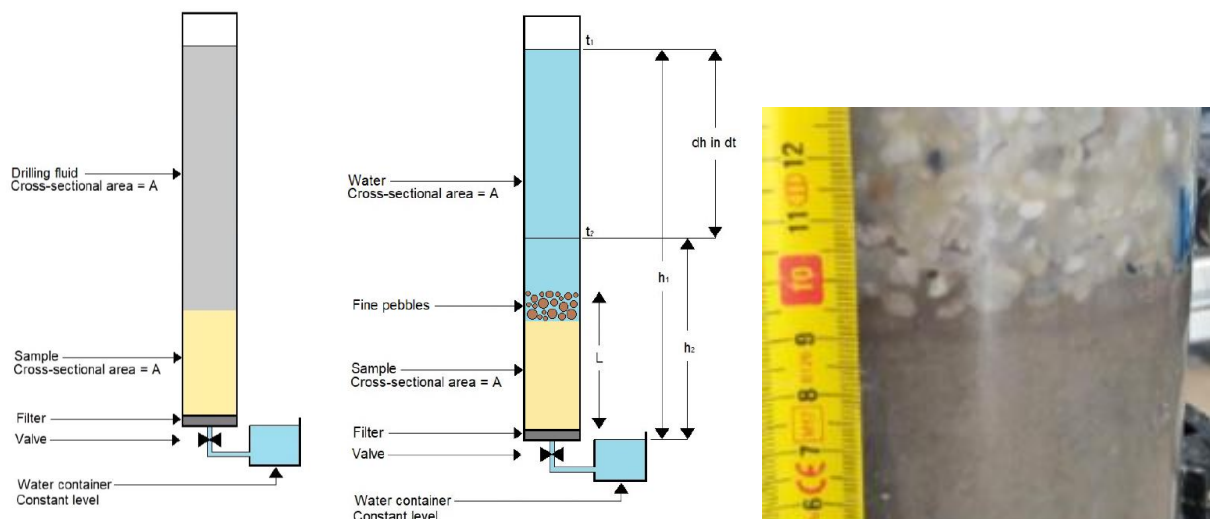
3.1 Laboratoriumproeven boerspoeiing

Hoewel de nadruk van dit onderzoek lag op het correct aanvullen van het boorgat, zijn ook labexperimenten uitgevoerd naar mogelijkheden om kortsluitstroming te beperken door het opbouwen van hydraulische weerstand in de filtercake op de boorgatwand. Hiertoe zijn 1.6 m lange plexiglas kolommen onderin eerst gevuld met een steunlaag (0.13 m) en daarbovenop formatiezand (0.07 m). Het bovenste deel van de kolommen is gevuld met boerspoeiing (Figuur 3-1). De overdruk bedroeg circa 1.4 meter waterkolom (0.14 bar), wat vrij gering is vergeleken met veldcondities. Na een wachttijd van 15 of 60 minuten (zie onderstaande scenario's) is de bovenstaande boerspoeiing verwijderd en een 0.1 m dikke laag aan vulgrind (4-8 mm) gestort (valhoogte circa 1 m) om verstoring van de skinlaag door het aanvullen van het boorgat te simuleren. Tot slot is de doorlatendheid van de kolom bepaald (met een falling head proef) en vergeleken met de doorlatendheid van het formatiemateriaal zonder boerspoeiing.

De boerspoeiing bestond uit drinkwater aangevuld met BARO-GEL™ wat bestaat uit bentoniet en een geringe hoeveelheid polyanionische cellulose (PAC). Dit product (of vergelijkbare producten) worden door veel boorfirma's in Nederland gebruikt. Volgens de leverancier CEBO volstaat 18-30 kg additieven per kuub water in reguliere pakketten en is 30-42 kg/m³ nodig in sterk doorlatende pakketten.

De proef is herhaald voor verschillende scenario's (condities):

- Formatiemateriaal: duinzand (korrelgrootte 0.18-0.33 mm), grof zand (0.4-0.8 mm) en grind (0.8 – 1.25 mm).
- Dichtheid van de boerspoeiing: 18, 30 en 42 kg/m³ BARO-GEL.
- Duur blootstellen aan boerspoeiing: 15 en 60 minuten
- Wel/ niet verwijderen bentoniet voor aanbrengen grof aan vulgrind



Figuur 3-1. Schematische weergaven van de kolommen tijdens belasting met boerspoeiing (links) en na aanvullen met aan vulgrind (midden). De foto (rechts) toont de overgang van aan vulgrind (boven) naar skin (midden) en formatiemateriaal (onder) bij een proef met fijn duinzand. (Nijhof 2020)

In totaal zijn dus $3 \times 3 \times 2 \times 2 = 36$ verschillende proeven uitgevoerd, waarvan 2 in duplo en 3 in triplo. De proeven zijn uitgevoerd in het kader van een stageopdracht bij KWR en uitgebreid beschreven in Nijhof (2020).

Om de experimenten onderling goed te kunnen vergelijken, is voor elk experiment de weerstand van de skinlaag (c_s) bepaald op basis van de doorlatendheid voorafgaand aan het doseren van boorspoeling (k_{voor}) en na afloop van elk experiment (k_{na}) en de dikte van de zandlaag (D):

$$c_s = \frac{D}{k_{na}} - \frac{D}{k_{voor}} \quad [3-1]$$

3.2 Laboratoriumproeven magnetische detectie van aanvulmateriaal

Magnetisch detecteerbaar aanvulmateriaal bestaat uit regulier aanvulmateriaal, zoals grout of bentonietkorrels, waaraan een geringe hoeveelheid magnetiet is toegevoegd. Dit magnetiet maakt het aanvulmateriaal magnetisch detecteerbaar, omdat de achtergrondconcentratie van magnetiet in sedimenten in de bovenste 500 m van de Nederlandse ondergrond verwaarloosbaar is. Detectie van het aanvulmateriaal kan zowel tijdens als na het vullen van het boorgat door het meten van de magnetische susceptibiliteit ("magnetisch signaal") met een sensor in de bodemlus. Hoewel magnetisch grout in Duitsland al langer werd toegepast is er in Nederland nog weinig praktische ervaring mee.

Uit Pauw (2022a) blijkt dat verschillende factoren invloed hebben op de sterkte van het magnetisch signaal, zoals de diameter van het boorgat en bodemlus, de hoeveelheid bodemlussen en hun oriëntatie in het boorgat, de dichtheid en eigenschappen van het magnetische additief. Om foutieve afdichtingen te kunnen detecteren, is het dus belangrijk om te weten welke range aan magnetisch signaal je in een correct aangevuld boorgat kunt verwachten. Magnetiet heeft een veel hoger soortelijk gewicht dan overige bestanddelen van grout. Leveranciers van detecteerbaar grout gebruiken vaak extra additieven om uitzakken van het magnetiet te voorkomen. Helaas waren voor een deel van de in dit onderzoek beschouwde grouten, geen detecteerbare versies commercieel verkrijgbaar. Om de veldproeven goed te kunnen uitvoeren, moest dus eerst worden vastgesteld hoeveel magnetiet gedoseerd moest worden om het signaal onder alle omstandigheden te kunnen meten zonder dat het zou uitzakken. Voor een betere interpretatie van metingen op veldschaal zijn daarom eerst een aantal laboratoriumproeven uitgevoerd om de optimale mengverhouding vast te stellen.

Het doel van de laboratoriumproeven was om voor alle aanvulmaterialen een indicatie te krijgen van de toelaatbare bandbreedte van het magnetisch signaal tijdens controlemetingen in een correct aangevuld boorgat. Daarnaast was het voor de aanvulmaterialen waarvan nog geen magnetische variant commercieel beschikbaar was (magnetisch niet-detecteerbaar grout) de bedoeling om de optimale concentratie en korrelgrootte van het magnetiet te bepalen waarbij geen uitzakking plaatsvindt. Tabel 3-1 toont welke materialen zijn getest.

Tabel 3-1: Overzicht van typen grout die zijn getest.

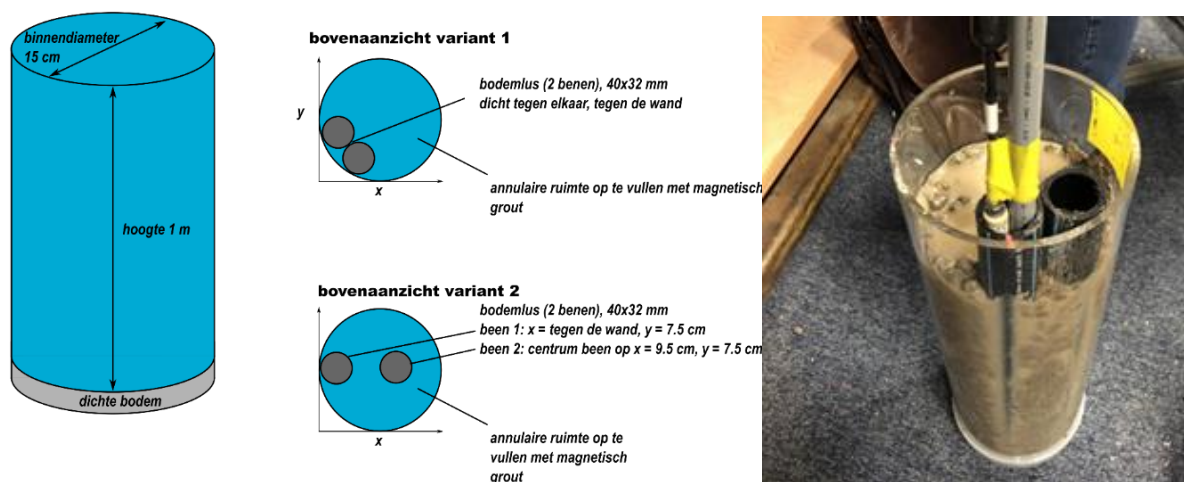
Handelsnaam	Leverancier	Type aanvulmateriaal
Mikolit 00D Mikolit300M	Terratech	magnetisch detecteerbare aanvulklei
Eco Thermal Plus Tracer grout Eco Mud Green Tracer	RKV	magnetisch detecteerbaar grout
grout-D (grout toegepast door Duratherm)	betoncentrale	niet-detecteerbaar grout
Hergebruik Opgeboord Materiaal (HOM)	Bergmans	niet-detecteerbaar grout

Het magnetische niet-detecteerbaar grout is getest met dosering van een fijner type magnetiet (0.1D) en grofkorreliger (2.0D) geleverd door het bedrijf LKAB Minerals.

Alle materialen zijn getest in PVC kolommen met een diameter van 150 mm (vergelijkbaar met een GBES-boorgat) die waren gevuld met twee PE bodemlussen en volledig gevuld met aanvulmateriaal. Voor het testen van aanvulklei

is gewerkt met een kolomlengte van 0.4 m en voor grout 1.0 m. De proeven zijn herhaald met verschillende posities van de bodemlussen in de kolom. In Figuur 3-2 zijn de configuraties weergegeven voor variant 1 (beide lussen naast de wand) om een zo laag mogelijk signaal te meten en variant 2 (één lus midden in het boorgat) om een zo hoog mogelijk signaal te meten. Er is ook geëxperimenteerd met verschillende posities van de sensor in de bodemlus (gecentreerd, tegen de wand) met behulp van afstandhouders.

Het magnetische signaal is in elke lus over de gehele diepte gemeten met de MagSoil van Sensys. Deze sensor heeft een radiaal meetbereik van ongeveer 2.5 cm en meet de magnetisatie van de omgeving door het geïnduceerde magnetische veld, waaruit de magnetische susceptibiliteit wordt afgeleid. In radiale richting bedraagt de cumulatieve bijdrage van het signaal 50% tot 6 mm, 90% tot 16 mm en 99% tot 25 mm. De temperatuurdrijf van de sensor bedraagt minder dan 10 ppm per °C. Het MagSoil systeem is ook tijdens de veldproeven gebruikt (§3.4).

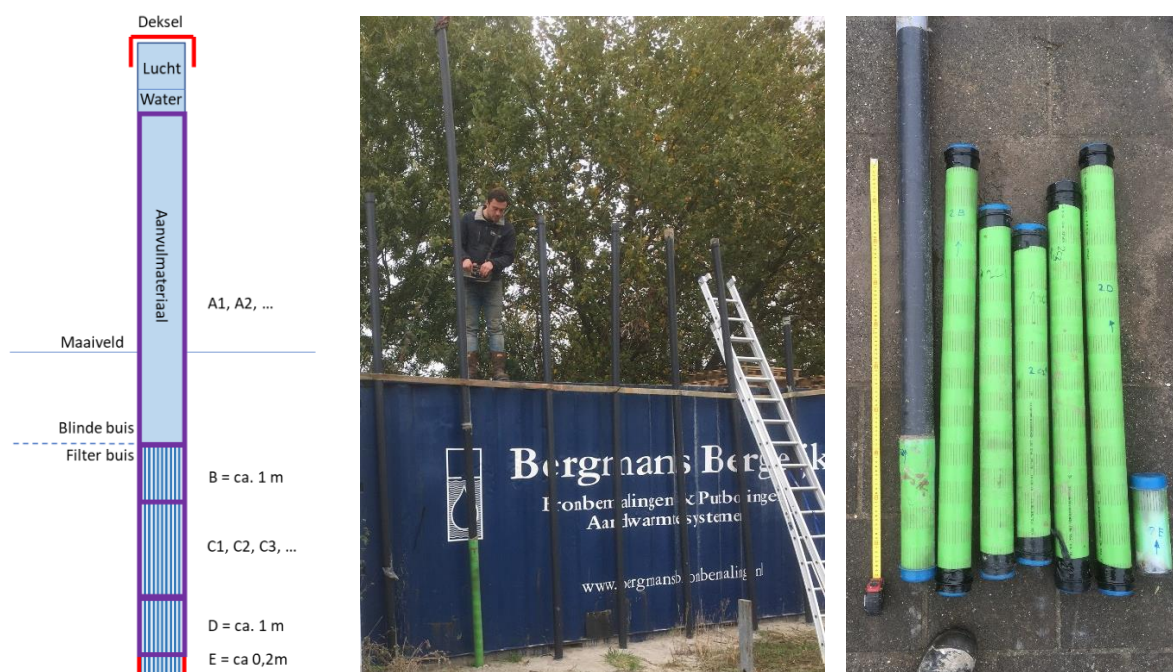


Figuur 3-2. Schematische weergaven van de kolommen gebruikt voor de laboratoriumproeven over magnetische detectie van grout (links) en een foto van de kolom gebruikt voor de detectie van aanvulklei (rechts).

3.3 Veldproeven in ondiepe boringen

Voor alle aanvulmaterialen is volgens opgave van de leverancier (of in geval van HOM door Inpijn Blokpoel ingenieurs) een test uitgevoerd waarin is vastgesteld dat de doorlatendheid maximaal 10^{-9} m/s bedraagt, conform de eisen van BRL 2100. Er is echter weinig bekend over hoe de aanvulmaterialen zich in de praktijk gedragen in een boorgat. Aspecten zoals doorlatendheid en stratificatie door ontmenging zijn lastig om op praktijkschaal te meten omdat de boringen wel tweehonderd meter diep kunnen zijn. Daarom is een aantal proeven uitgevoerd in ondiepe boringen. Het doel van deze proeven was om inzicht te krijgen wat de permeabiliteit onder veldcondities is en om een eerste indruk te krijgen of er indicaties zijn dat ontmenging optreedt.

De proef bestond uit het plaatsen van 14 geperforeerde PVC-buizen in ondiepe boorgaten op het terrein van boorfirma Bergmans te Bergeijk in een matig grove zandlaag. De kolommen hadden een lengte van maximaal 10 m, en een inwendige diameter van 69 mm (Figuur 3-3). Het bovenste deel van de kolommen, die ca. 3 m boven maaiveld uitstaken, bestond uit een blinde buis die van boven was afgesloten, zodat het materiaal in dit gedeelte afgesloten was van de buitenlucht en de ondiepe ondergrond. Vanaf ca. 1.5 m-mv bestond de kolom uit een filterbuis (PVC, hoogte/breedte filterspleten ca. 46/1 mm, verticale/horizontale afstand tussen spleten ca. 32/8 mm) waardoor het aanvulmateriaal in contact kon staan met het omliggende grondwater (grondwaterstand op circa 1.5 m beneden maaiveld).



Figuur 3-3. Schematische weergaven van de kolommen voor de ondiepe boringen (links) en foto's van de kolom in de bodem (midden) en na het opboren en in stukken zagen van de monsters (rechts)..

Vervolgens zijn zes verschillende typen aanvulmateriaal in duplo ingebracht in oktober 2021 (totaal 12 kolommen). Helaas is hierbij verzuimd om het ingaande materiaal te bemonsteren. Op 2 november 2021 is van elk tweetal één kolom uit het boorgat getrokken en in stukken gezaagd tot monsters van circa 1 m lengte (Tabel 3-2). Voor het HOM uit een grove formatie is ook de duplo kolom getrokken (kolom nr. 2 in Tabel 3-2 omdat deze op een andere wijze aangevuld was dan de andere kolom met hetzelfde materiaal (kolom 1). Van elk monsters in de filterbuis en een monster halverwege de blinde buis zijn in het veld het gewicht en lengte bepaald en omgerekend tot een dichtheid van het aanvulmateriaal. Hierbij is gecorrigeerd voor de diameter en dichtheid van eventueel aanwezige verloren vulling. Op een selectie van de monsters zijn korrelverdeling- en/of doorlatendheidstesten uitgevoerd door Raadgevend Ingenieursbureau Wiertsema en Partners (Tabel 3-2, laatste kolommen). De waterdoorlatendheid is gemeten d.m.v. de Falling Head methode conform NEN 5124 met een bovenbelasting van 90 kPa bij een temperatuur van 10 °C. Het aanvulmateriaal in de monsters van de kolommen 9 en 13 was te ver uitgehard, waardoor op deze monsters geen korrelverdeling- of doorlatendheidtest uitgevoerd kon worden.

Tabel 3-2: Specificaties van de ondiepe boringen die zijn getrokken, inclusief welke monsters zijn geanalyseerd op korrelverdeling en doorlatendheid.

Kolom nr.	Aanvulmateriaal	Specificaties	Aanvulwijze	Korrelverdeling*	Doorlatendheid*
1	HOM	HOM uit grove formatie	Getrokken vulling	B, C2, D	C2, D
2	HOM	HOM uit grove formatie	Storten		
3	HOM	HOM uit matig fijne formatie	Verloren vulling	B, C2, D	C2
5	HOM	HOM uit fijne formatie	Getrokken vulling	B, C2, D	D
7	Bentoniet gebaseerd grout	Eco Mud Green Tracer	Storten	B, C2, D	D
9	Cement gebaseerd grout (met bentoniet)	Eco Therm 2.0 Tracer	Storten		
13	Cement gebaseerd grout (zonder bentoniet)	TG 1.6 W/mK	Verloren leiding		

(*) B, C2 en D verwijzen naar het dieptetraject in de boring waarover monsters zijn genomen. B is bovenin de filterbuis, C2 is in het midden en D onderin de filterbuis. Zie Figuur 3-3 links.

3.4 Veldproeven op praktijkschaal

Om meer inzicht te verkrijgen in de betrouwbaarheid van de in Nederland gangbare aanvulmethoden, zijn metingen verricht bij 31 boringen (Tabel 3-3) verdeeld over acht locaties (Figuur 3-4a). Hierbij is ook gekeken naar alternatieve aanvulmethoden (omgekeerd grouten) en zijn verschillende type grout toegepast, waaronder HOM. De boringen zijn geplaatst door Bergmans, Duratherm, Nathan en Encor als onderdeel van lopende warmteprojecten waardoor de proeven representatief zijn voor de huidige praktijk.

Tabel 3-3: Locaties waar de veldproeven zijn uitgevoerd en de gebruikte wijze van aanvullen en aanvulmateriaal per boring. De dichtheidsmetingen betreffen de bemonstering van het ingaande en uittredende materiaal.

Laagsgewijs Aanvullen									
Locatie	Boring	Gebruik stortkoker	Type Aanvulmateriaal	Merknaam Aanvulklei	Mengwijze	Einddiepte (m -mv)	Boorgat-diameter (mm)	Diameter bodemlus (mm)	Dichtheidsmetingen
Culemborg	9	Nee	Klei + grind	Mikolit OOD	n.v.t.	140	140	40/32	n.v.t.
	17	Nee	Klei + grind	Mikolit OOD	n.v.t.	140	140	40/32	n.v.t.
	36	Ja	Klei + grind	Mikolit OOD	n.v.t.	140	140	40/32	n.v.t.
Dongen		Ja	Klei + grind	Mikolit OOD	n.v.t.	200	150	40/32	n.v.t.
Stavoren		Ja	Klei + grind	Mikolit OOD	n.v.t.	188	140	40/32	n.v.t.
Weesp	86_1	Nee	Klei + grind	Mikolit OOD	n.v.t.	130	170	32/25	n.v.t.
	86_2	Nee	Klei + grind	Mikolit OOD	n.v.t.	130	150	32/25	n.v.t.
	87_1	Ja	Klei + grind	Mikolit OOD	n.v.t.	130	170	32/25	n.v.t.
Volledig Aanvullen									
Locatie	Boring	Aanvul-leiding	Type Aanvulmateriaal	Merknaam Grout	Mengwijze	Einddiepte (m -mv)	Boorgat-diameter (mm)	Diameter bodemlus (mm)	Dichtheidsmetingen
Bergen op Zoom	Lus 1	Getrokken	HOM	n.v.t.	Roerwerk	120	190	32/25	Nee
	Lus 2	Getrokken	HOM	n.v.t.	Roerwerk	122	190	32/25	Ja
	Lus 3	Getrokken	HOM	n.v.t.	Roerwerk	120	190	32/25	Ja
	Lus 5	Getrokken	HOM	n.v.t.	Roerwerk	120	190	32/25	Ja
Culemborg	33	Getrokken	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Doorstroommenger	140	140	40/32	Nee
	31	Getrokken	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Colloidaalmenger	140	140	40/32	Nee
	40	Getrokken	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Colloidaalmenger	140	140	40/32	Nee
	35	Verloren	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Doorstroommenger	140	140	40/32	Nee
	37	Verloren	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Doorstroommenger	140	140	40/32	Nee
Eerbeek	39	Verloren	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Doorstroommenger	140	140	40/32	Ja
	Lus 1	Verloren	Bentoniet gebaseerd grout	Eco Mud Green Tracer	Colloidaalmenger	127	140	40/32	Ja
	Lus 2	Verloren	Bentoniet gebaseerd grout	Eco Mud Green Tracer	Colloidaalmenger	152	140	40/32	Ja
Etten-Leur	Lus 3	Verloren	Bentoniet gebaseerd grout	Eco Mud Green Tracer	Colloidaalmenger	150	140	40/32	Nee
	Lus 1	Verloren	Cement gebaseerd grout	Terragriet (TG 1.6 W/mK)	Voorgemengd in centrale	161	160	40/32 (x2) ³	Ja
	Lus 2	Verloren	Cement gebaseerd grout	Terragriet (TG 1.6 W/mK)	Voorgemengd in centrale	200	160	40/32 (x2) ³	Ja
	Lus 3	Verloren	Cement gebaseerd grout	Terragriet (TG 1.6 W/mK)	Voorgemengd in centrale	190	160	40/32 (x2) ³	Ja
Heerde	Lus 4	Verloren	Cement gebaseerd grout	Terragriet (TG 1.6 W/mK)	Voorgemengd in centrale	170	160	40/32 (x2) ³	Nee
	Lus 1	Verloren (O.G.) ¹	Cement gebaseerd grout	Terragriet (TG 1.6 W/mK)	Voorgemengd in centrale	120	160	40/32	Nee
Weesp	Lus 2	Verloren (O.G.) ¹	Cement gebaseerd grout	Terragriet (TG 1.6 W/mK)	Voorgemengd in centrale	120	160	40/32	Ja
	87_2	Verloren	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Doorstroommenger	140	170	32/25	Ja
	89_1	Verloren	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Doorstroommenger	130	150	32/25	Ja
	89_2	Verloren	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Doorstroommenger	130	150	32/25	Ja
	90_2	Verloren	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Doorstroommenger	130	150	32/25	Ja
Weesp	91_1	Verloren	Cement gebaseerd grout ²	Eco Therm 2.0 Tracer	Doorstroommenger	130	150	32/25	Ja

¹Aanvulmethode is omgekeerd grouten (O.G.) ²Cement gebaseerd grout bevat bentoniet ³Twee bodemplussen aanwezig in het boorgat

Op elke locatie, behalve in Eerbeek, is een boorgatmeting in een open boorgat verricht om de bodemopbouw te bepalen. In Dongen en Stavoren is de natuurlijke gammastraling en de elektrische geleidbaarheid van de ondergrond gemeten met een EM-inductie sonde. Op de overige locaties is de natuurlijke gammastraling en elektrische weerstanden gemeten met een elektrische weerstand sonde. Voor locaties waar laagsgewijs is aangevuld is met de boormeester een aanvulschema afgesproken op welke diepte kleiafdichtingen te plaatsen. Op locaties met weinig kleilagen zijn extra fictieve kleilagen toegevoegd die de boormeester ook moest afdichten.

Op 4 locaties zijn ook scheidende lagen geïdentificeerd door de boormeester tijdens het boren en vergeleken met de boorgatmeting. Hoewel dit geen vooraf afgesproken doelstelling was binnen het project, is op deze locaties ook gekeken naar de nauwkeurigheid waarmee de boormeester in staat was om kleilagen en hun start- en einddiepte te detecteren.

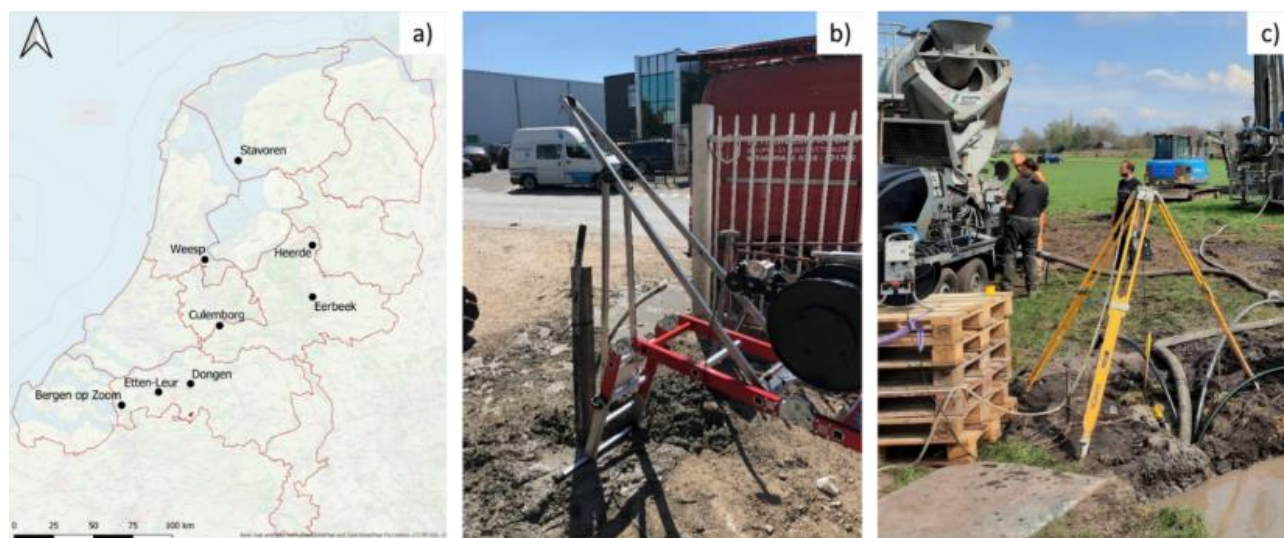
Na aanvullen van het boorgat is in beide benen van de bodemlus de magnetische susceptibiliteit van het materiaal rondom de bodemlus gemeten. Per boring zijn dus twee metingen uitgevoerd. Hierbij is dezelfde MagSoil magnetometer gebruikt als waarmee de laboratoriumproeven zijn uitgevoerd (Figuur 3-4b).

Bij een deel van de volledig aangevulde boorgaten (Tabel 3-3) zijn monsters genomen van het ingaande grout, de boorspoeling die tijdens het aanvullen uit het boorgat treedt en het uit het boorgat tredende grout. De eerste monsternamen van uittredend grout volgde op het moment dat visueel een verandering van kleur en viscositeit was vastgesteld bovenin het boorgat. Vervolgens werd ongeveer elke één tot twee minuten bemonsterd totdat het betreffende boorgat volgens het oordeel van de boorploeg afdoende was afgedicht. De monsters zijn vervolgens gewogen om in beeld te brengen hoe de dichtheid van het uittredende materiaal zich verhoudt tot het ingebrachte grout en hoe de dichtheid van het uittredende materiaal ontwikkeld over de tijd.

Daarnaast is door Wiertsema de korrelverdeling bepaald van enkele monsters die zijn genomen tijdens het aanvullen. Het betreft boorspoeling, ingaande grout, uittredend materiaal 2 minuten na verkleuring van Lus 1 in Eerbeek. In Bergen op Zoom zijn ook monsters genomen van de boorspoeling (alleen lus 2), het ingaande grout (lus 2 en 3) en het uittredende materiaal (lus 2 en 3) kort nadat de HOM uittrad in het voorgegraven gat. (NB: HOM-boring stopt snel). De korrelanalyses waren niet mogelijk op andere locaties waar cement gebaseerd grout werd gebruikt, omdat de monsters te ver waren uitgehard.

Om een beeld te krijgen van het verbruik en verlies van grout is het verpompte volume aanvulmateriaal tijdens het aanvulproces vergeleken met de theoretische inhoud van het boorgat. Hierbij is de theoretische inhoud bepaald op basis van de nominale boorgatdiameter en einddiepte. Het verpompte volume is in Bergen op Zoom relatief nauwkeurig bepaald met een debietsensor en vermenigvuldigd met de benodigde tijdsduur voor het aanvullen. Op andere locaties kon het debiet minder nauwkeurig vastgesteld. Zo is bij de veldproeven in Eerbeek en Weesp het verpompte volume bepaald aan de hand van het een de boorploeg opgegeven aanvuldebiet. In Heerde is het aanvulvolume ingeschat op basis van de vermindering van de hoeveelheid aanvulmateriaal in de betonmolen waaruit het aanvulmateriaal geleverd werd.

Tot slot zijn door onderzoekers van KWR en Deltares observaties gedaan over de werkwijze van de boorploeg voor de locaties Bergen op Zoom, Eerbeek, Culemborg, Weesp, Heerde en Etten-Leur aan de hand van de aandachtspunten op het formulier in het bijlagen rapport.



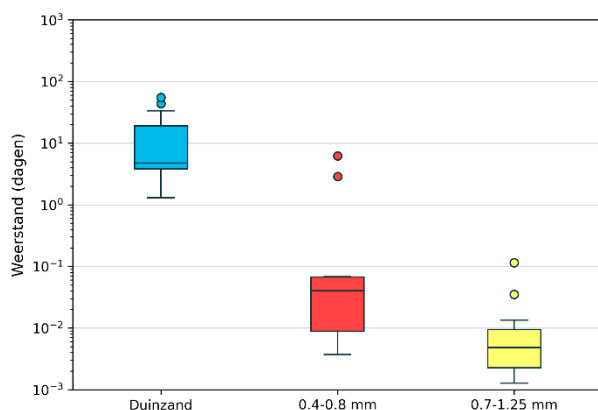
Figuur 3-4: a) ligging van de veldproeflocaties. b) Opstelling van de magnetometer bij de veldproef in Dongen. c) Inbrengen van voorgegemengd grout uit betonwagen tijdens omgekeerd grouten in Heerde.

4 Resultaten

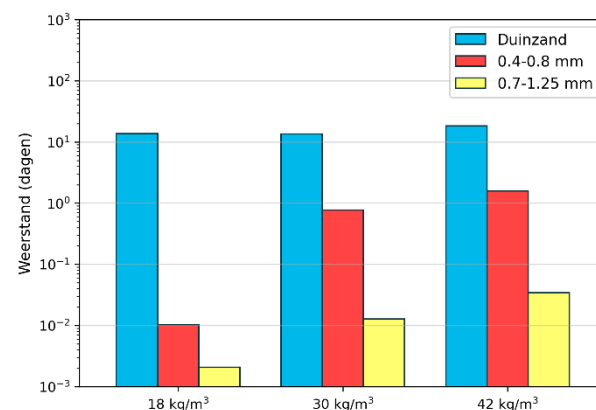
4.1 Laboratoriumproeven boorspoeling

Uit de labproeven met boorspoeling blijkt dat het formatiemateriaal van grote invloed is op de hydraulische weerstand van de filtercake (Figuur 4-1). De mediane c-waarde van alle proeven met duinzand (5 d) was factor 100 tot 1000 groter dan in respectievelijk grof zand (0,04 d) en grind (0,005 d). De concentratie booradditieven en duur van de belasting hadden een beperkte invloed in fijn zand. Maar in het grove zand en grind was de c-waarde bij een zware boorspoeling (42 kg/m³) factor 155 en 17 groter dan bij een lichte boorspoeling (18 kg/m³) bij respectievelijk grof zand en grind. Dit komt doordat de poriehalzen in het duinzand veel kleiner zijn waardoor de booradditieven al vrij snel een afsluitende laag kunnen vormen bovenop het formatiemateriaal. In de grovere formaties zijn de poriehalzen groter, waardoor de poriehalzen vermoedelijk eerst vernauwd moesten worden door indringing van de boorspoeling in de formatie totdat ze voldoende nauw zijn en er een filtercake gevormd kan worden. Het aanvullen van het boorgat in aan- of afwezigheid van boorspoeling heeft een beperkte invloed, omdat er weinig boorspoeling in de filtercake penetreerde tijdens het aanvullen.

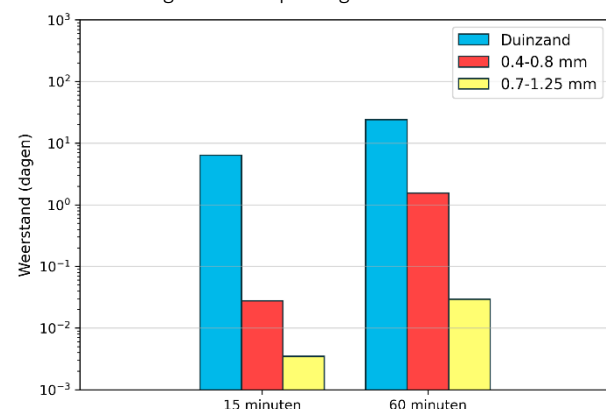
A: formatiemateriaal



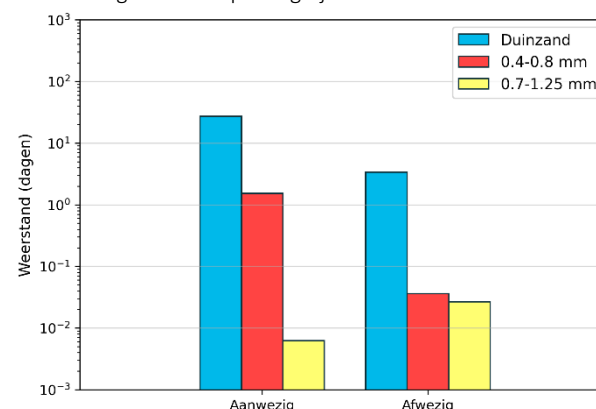
B: concentratie booradditieven



C: Duur belasting met boorspoeling



D: Aanwezigheid boorspoeling tijdens aanvullen

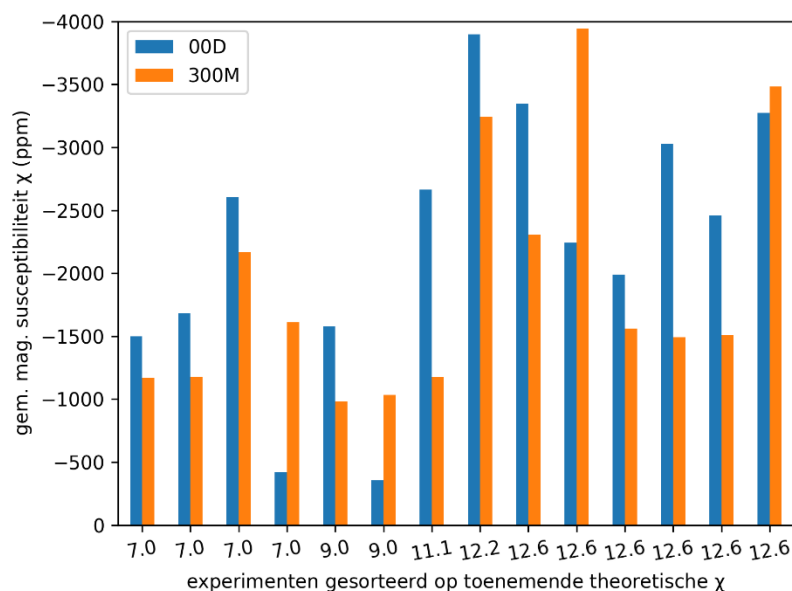


Figuur 4-1: Invloed op de hydraulische weerstand van filtercake van formatiemateriaal (A), concentratie booradditieven (B) duur van de belasting (C) en afdichting in aan- of afwezigheid boorspoeling (D) gemeten tijdens laboratoriumproeven met boorspoeling. Bij duplo en triplo metingen zijn alleen de gemiddelde c-waarden gebruikt

4.2 Laboratoriumproeven magnetische detectie van aanvulmateriaal

4.2.1 Detecteerbare klei

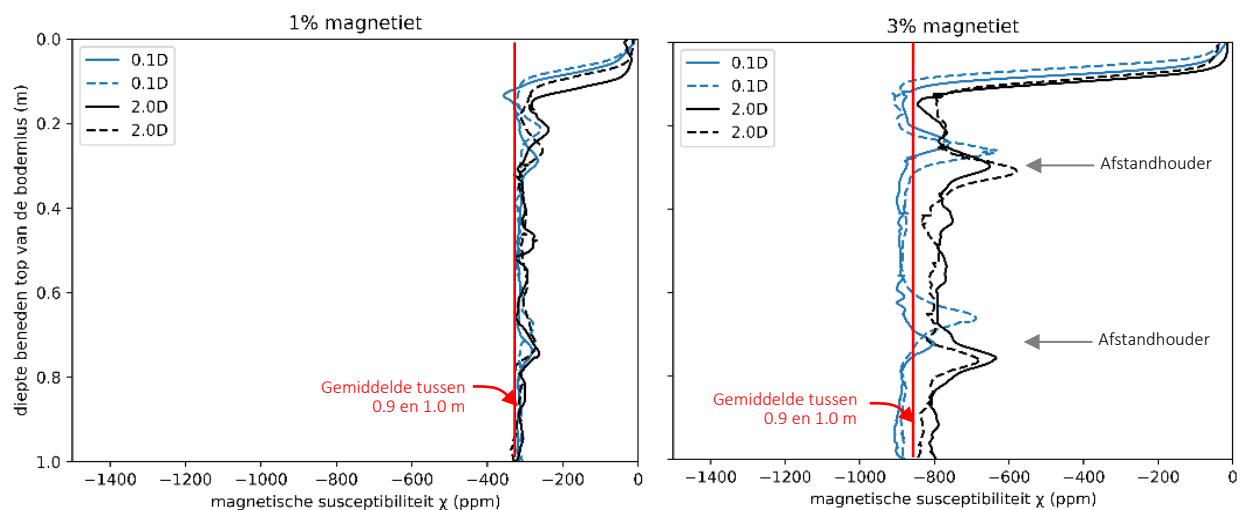
De sterkte van het waargenomen magnetisch signaal (χ) in de kolomproeven met **detecteerbare aanvulklei** is in Figuur 4-2 weergegeven voor alle experimenten. Je zou hier een oplopende trend verwachten aangezien de experimenten zijn gesorteerd op basis van toenemende theoretische sterkte voor de 14 beschouwde configuraties. Het magnetisch signaal is namelijk afhankelijk van de hoeveelheid magnetiet binnen het meetbereik van 2.5 cm en is dus afhankelijk van de positie van de bodemlussen in de kolom (afstand tot rand) en van de meetsonde in de lus. Maar in werkelijkheid lijkt er sprake van een willekeurige spreiding van factor 10 (-400 tot -4000 ppm) voor Mikolit OOD en factor 4 (-1000 tot -4000) voor Mikolit 300M. Ook valt op dat OOD vaak hoger uitvalt dan 300M, terwijl het theoretisch gezien lager zou moeten zijn. We vermoeden dat deze onverwachte verschillen tussen beide soorten aanvulklei en spreiding tussen de verschillende configuraties veroorzaakt wordt door ruimtelijke variatie in de magnetietgehalten en de pakking van de korrels in de kolom. Dit laatste met name in de nauwe op te vullen ruimte in geval beide benen zich tegen de wand bevinden. Een dergelijke situatie is ook in de praktijk te verwachten wanneer de benen niet gecentreerd worden.



Figuur 4-2: Gemiddelde sterkte van het gemeten signaal tussen 15 en 30 cm beneden het referentieniveau (y-as) voor de verschillende configuraties van bodemlussen en posities van de meetsonde (x-as). De experimenten zijn van links naar rechts gesorteerd op toenemende theoretische sterkte van het magnetisch signaal voor Mikolit OOD en ook weergegeven voor Mikolit 300M. De getallen op de horizontale as geven de theoretische, relatieve (%) sterkte van het signaal weer.

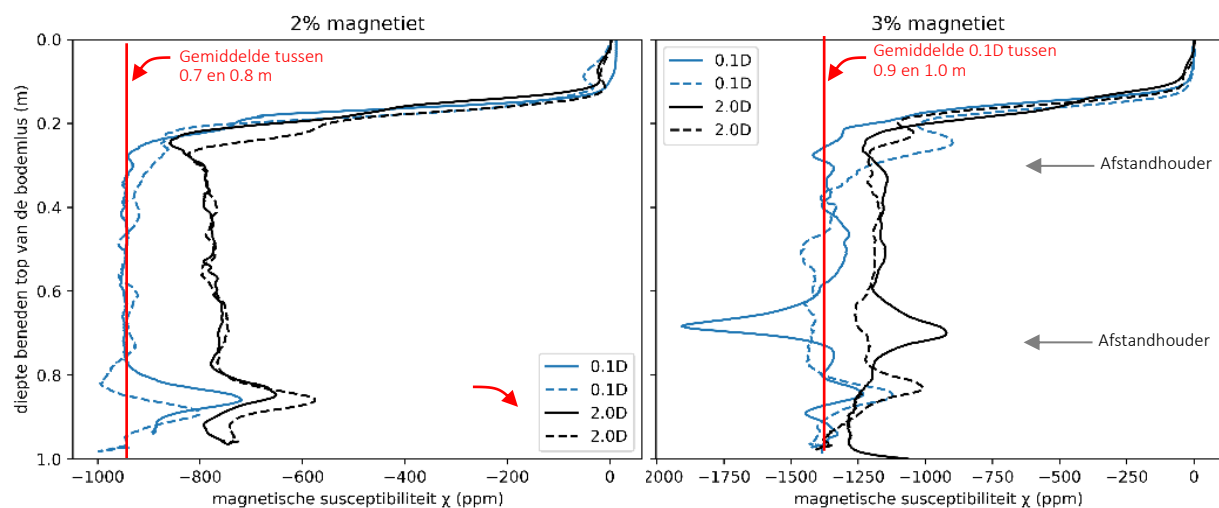
4.2.2 HOM en Grout-D

De sterkte van het magnetisch signaal (χ) in de kolomproeven waarbij magnetiet was gedoseerd aan **HOM** varieerde veel minder met de diepte dan de aanvulklei. De afnames rond 0.3 en 0.7 m in Figuur 4-3 zijn vermoedelijk veroorzaakt door de afstandhouders die zijn gebruikt om de lussen in de juiste positie te houden. De waarden van 0.1 tot 0.2 m diepte zijn in alle proeven vergelijkbaar met 0.9 tot 1.0 m diepte, wat in indicatie is dat er geen uitzakking heeft plaatsgevonden van magnetiet. Het magnetisch signaal was bij de experimenten met 3% magnetiet duidelijk hoger dan 1%. De fijne korrelgrootte (0.1D) leverde een wat hoger magnetisch signaal dan de grovere korrels (2.0D) en bovendien leek bij het experiment met 2.0D het signaal bovenin iets lager, wat een indicatie kan zijn van uitzakken. Voor de veldproeven met het HOM is daarin gewerkt met 3% bijmenging van magnetiet type 01D.



Figuur 4-3: Diepteprofiel van de metingen in de kolom met HOM. De metingen zijn uitgevoerd met magnetiet type 0.1D (blauw) en 2.0D (zwarte lijn) en weergegeven voor 1% magnetiet (links) en 3% (rechts).

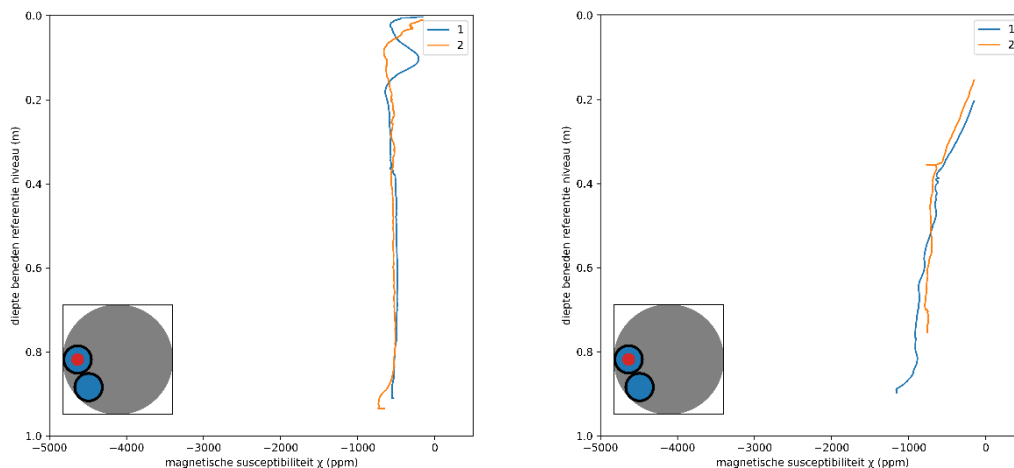
In de kolomproeven met **Grout-D** was het verschil in magnetisch signaal tussen het fijne magnetiet (0.1D) en grovere materiaal (2.0D) veel groter dan bij HOM (zie Figuur 4-4). Bovendien lijkt er voor 2.0D een trend met de diepte, wat kan duiden op ontmenging en/ of uitzakken. De sterkte van het magnetische signaal was bij 2% vergelijkbaar met 3% HOM (beiden circa 900 ppm). Daarom is besloten de veldmetingen voor grout-D uit te voeren met 2% bijmenging van magnetiet type 01D.



Figuur 4-4: Diepteprofiel van de metingen in de kolom met Grout-D. De metingen zijn uitgevoerd met magnetiet type 0.1D (blauw) en 2.0D (zwarte lijn) en weergegeven voor 1% magnetiet (links) en 3% (rechts).

Tot slot zijn de grout-typen die in de veldproeven zijn toegepast, op vergelijkbare wijze getest als de detecteerbare aanvulklei (Figuur 4-5). Hieruit bleek dat ook bij grout er een sterke relatie is tussen de positie van de lussen en sensor en het magnetisch signaal. Voor HOM met 3% 0.1D magnetiet varieerde het magnetisch signaal van -400 ppm (experiment met sonde dichtbij boorgatwand en beide lus naast elkaar aan de wand) tot -1400 ppm (been midden in het boorgat en sonde aan rand van lus). De waarden voor Eco-Mudgreen Tracer liggen tussen -500 en -1000 ppm en voor Eco-Thermal Plus Tracer tussen -300 en -700. Daarnaast valt op dat bij een aantal experimenten

met HOM en Grout-D het magnetische signaal enkele tientallen procenten toenam met de diepte. Dit kan duiden op ontmenging en/ of uitzakken van het magnetiet. Voor Grout-D gaf Duratherm aan dat dit mogelijk werd veroorzaakt doordat het grout op andere wijze was aangemaakt dan gebruikelijk. Voor HOM kan het verschil in signaal ook veroorzaakt zijn door variatie in de positie van de sonde in de bodemlus. Bovenin de kolom was deze positie goed te controleren, onderin bleek tijdens de metingen dat een constante positie over de lengte van de kolom niet altijd verzekerd kon worden.



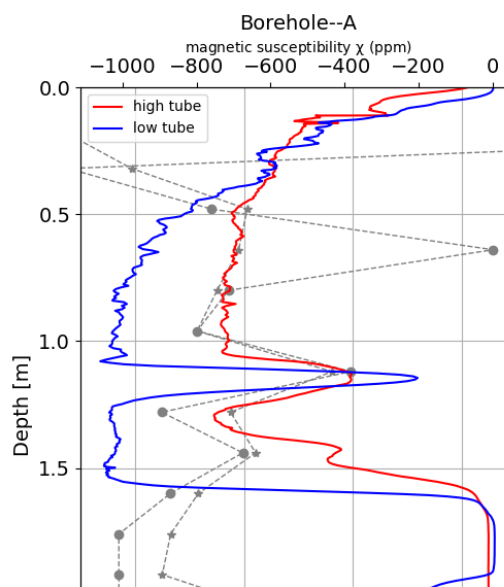
Figuur 4-5: Illustratie van diepteprofielen van het magnetisch signaal gemeten in een kolom gevuld met HOM (links) en grout-D (rechts) en beiden aangemengd met 0.1D magnetiet.

4.2.3 Nauwkeurigheid en grenswaarden

De kolomproeven maken duidelijk dat alle geteste aanvulmaterialen onder alle omstandigheden detecteerbaar zijn. De magnetometer is in staat om aan te tonen of er in het veld magnetiet aanwezig is rondom de lussen of niet. Ook kleine verstoringen over een hoogte van enkele decimeters zijn detecteerbaar, zoals te zien in het voorbeeld van een zandinsluiting door instorting van een boorgat in Figuur 4-6. Dit biedt echter geen garantie dat de kleiaanvulling of grout over de gehele diameter van het boorgat aanwezig zijn. Vanwege de grote spreiding in de metingen kunnen op basis van het magnetisch signaal geen conclusies worden getrokken over de concentratie van het magnetiet en dichtheid van het aanvulmateriaal op een bepaalde diepte, laat staan de afdichtende werking ervan. Wel kan in geval van laagsgewijs aanvullen goed beoordeeld worden of een afdichting op de juiste diepte is aangebracht.

Voor de beoordeling van de veldproeven is een bandbreedte van -300 ppm tot -1500 ppm aangehouden, overeenkomstig de laagst en hoogst gemeten waarden in de laboratoriumproeven. Deze ondergrens waarde wordt ook gehanteerd door Encor. Een zwakker signaal duidt op een tekort aan magnetiet en dus een mogelijk tekort aan aanvulmateriaal. Deze bandbreedte is gebaseerd op metingen voor een boorgat met een diameter van 150 mm en een enkele bodemlus met een buitendiameter van 40 mm en een wanddikte van 3.7 mm. Omdat tijdens de veldproeven de boor- en lusdiameter vaak anders was dan de labexperimenten, zijn de verkregen waarden alleen indicatief als referentie te beschouwen.

Voor een gedetailleerd verslag van de kolomproeven wordt verwezen naar Pauw (2022b).



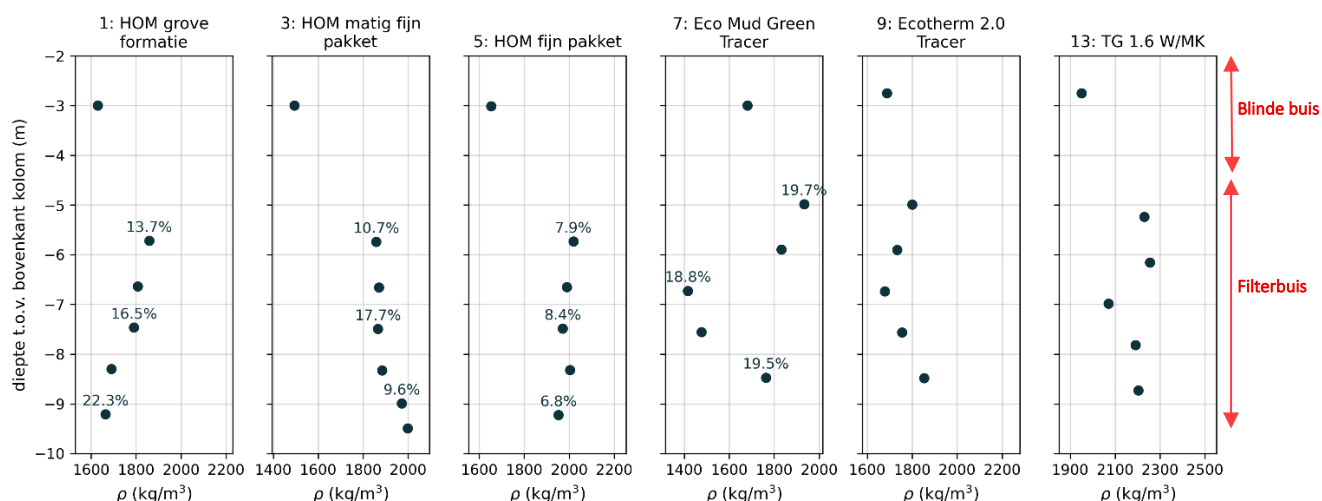
Figuur 4-6. Zandinsluiting (links) gedetecteerd tijdens het VSP-DAP onderzoek (Pauw en Obando 2022). In de meting is deze te herkennen aan de afname van de magnetische susceptibiliteit op een diepte van ~1.2 m.

4.3 Veldproeven in ondiepe boringen

De bovenste dichtheidsbepalingen in de ondiepe kolommen geeft de dichtheid van het materiaal in het gedeelte waar het aanvulmateriaal omgeven werd door een blinde buis (zie zwarte bollen in Figuur 4-7 op ca. -3 m). Op deze diepte kon het water niet uit het materiaal treden en het materiaal niet uitharden, waardoor de dichtheid van het aanvulmateriaal hier over het algemeen lager was dan voor diepere monsters waar het water wel uit het aanvulmateriaal kon treden.

In het dieptetraject van het filtertraject treedt vaak ook een substantieel verschil in dichtheid op. Van de drie kolommen aangevuld met HOM, laat Kolom 1 de meest duidelijk trend over de diepte zien. De dichtheid van het aanvulmateriaal neemt hier af over de diepte. Uit de korrelgrootteanalyse blijkt bovendien dat de fractie fijn materiaal (lutum + silt) (weergegeven met de zwarte getallen in Figuur 4-7), juist sterk toeneemt over de diepte. Dit duidt op ontmenging van het aanvulmateriaal, al is het wel opmerkelijk dat de zwaarste fractie bovenin het filtertraject zit. Of er is zwaarder materiaal uit de blinde buis naar beneden gezakt. In Kolom 3 is juist sprake van een, wat minder sterke, omgekeerde trend waarbij de dichtheid van HOM met de diepte toeneemt. In kolom 5 is de dichtheid constant over de diepte.

De overige 3 kolommen waren aangevuld met respectievelijk bentoniet gebaseerd grout (kolom 7), en cement gebaseerd grout mét (kolom 9) en grout zónder bentoniet (kolom 13). In alle 3 is ter hoogte van het filtertraject de laagste dichtheid gemeten halverwege, op ca. -7 m. De variatie met de diepte is het grootst bij kolom 7, al is deze fluctuatie niet terug te zien in de fractie fijn materiaal. Mogelijk is sprake van een combinatie van processen: uitzakken van de zware fractie vanuit het blinde (niet uitgeharde) buistraject naar het bovenste deel van de filterbuis doordat de grout vloeibaar bleef, en uitzakken in het filtertraject zelf, waardoor onderin de dichtheid ook toeneemt. Mogelijk speelt ook mee dat het grout in de kolommen niet van onderaf is aangevuld met een vulslang maar van bovenaf erin is gestort.



Figuur 4-7: Vergelijking van de waargenomen dichtheid (x-as) als functie van de gemiddelde diepte t.o.v. de bovenkant van de kolom (y-as) van de monsters van de ondergrondse kolommen. De getallen geven de fractie silt + lutum weer die zijn gemeten in een deel van de monsters. De even kolommen zijn niet getrokken/ geanalyseerd en kolom 11 en 12 zijn niet gevuld.

Volgens BRL2100 is de maximaal toelaatbare doorlatendheid van het aanvulmateriaal 10^{-9} m/s. Uit de falling head-proeven (Tabel 4-1) blijkt dat slechts één van de vijf monsters (C2 in kolom 1) aan deze eis voldoet. In de overige monsters was de doorlatendheid factor 3 tot factor 50 hoger. Het was niet mogelijk om een falling head test te verrichten op de Ecotherm 2.0 Tracer (kolom 9) en TG 11.6 W/MK (kolom 13) omdat deze te ver waren uitgehard om in te bouwen in de meetopstelling.

Tabel 4-1: Waargenomen poriëgehalte en verticale doorlatendheid bij 10 °C (K_v) gemeten in deelmonsters van de ondergrondse kolomproeven.

Kolom nr.	Monster	Diepte-interval t.o.v. bovenkant kolom (m)	Poriëngehalte (%)	Doorlatendheid (m/s)
1	C2	7,05 – 7,88	40	2,83 E-10
1	D	8,71 – 9,71	29	2,63 E-8
3	C2	7,07 – 7,91	42	7,14 E-8
5	D	8,73 – 9,72	39	1,96 E-7
7	D	7,97 – 8,97	45	3,21 E-8

4.4 Veldproeven op praktijkschaal: laagsgewijs aanvullen

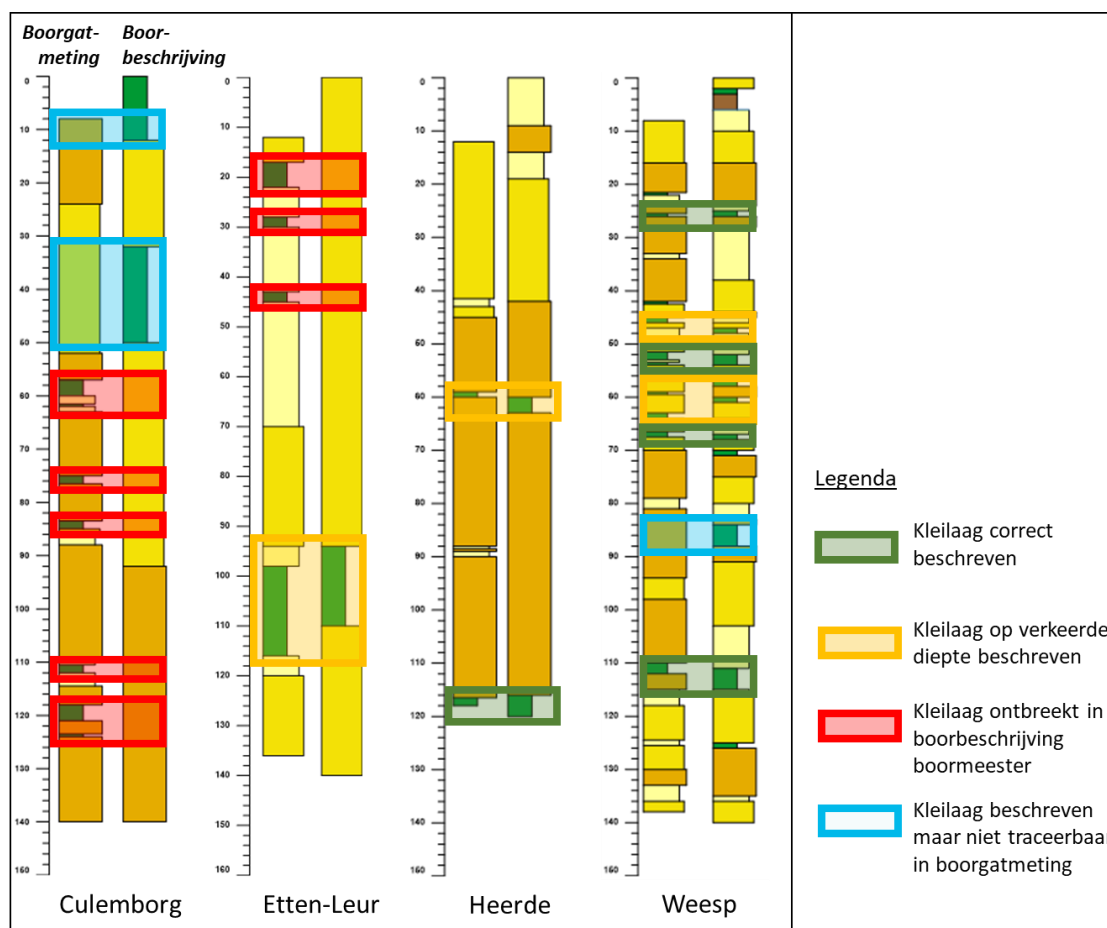
4.4.1 Identificeren van kleilagen bij spoelboringen

Een voorwaarde voor laagsgewijs aanvullen is dat de boormeester alle scheidende lagen op de juiste diepte beschrijft. Dit om te voorkomen dat kleilagen niet of op de verkeerde diepte worden aangevuld. Uit vergelijking van de boorbeschrijvingen van de boorbedrijven in Culemborg, Heerde, Etten Leur en Weesp met geofysische boorgatmeting bleek dat een derde van de kleilagen binnen 1.0 m nauwkeurig zijn gedetecteerd (Figuur 4-8). Hierbij zijn alleen kleilagen beschouwd met een dikte van minimaal 1 m ($n=17$). De overige twee-derde van de kleilagen zijn op een andere diepte beschreven of ontbreken zelfs helemaal in de boorbeschrijving. Hierbij moet bedacht worden dat de betreffende boormeesters ervaring hadden met boorbeschrijving. Bovendien waren ze vooraf op de hoogte van de controlemeting en hadden dus belang bij een goede beschrijving. Er is dus een gerede kans dat er op deze locaties kleipropen op de verkeerde hoogte waren geplaatst bij laagsgewijs aanvullen op basis van alleen de boorbeschrijving.

Bij de boring in Culemborg is klei als bijmenging beschreven over een dieptetraject van 60 m waarin volgens de boorgatmeting 5 afzonderlijke kleilagen zijn geïdentificeerd (NB: bijmenging is niet weergegeven in de boorbeschrijving in Figuur 4-8). Zelfs als de boorfirma deze 5 afzonderlijke kleilagen zou beschouwen als één dik kleipakket van 60 m, dan nog kan dit bij laagsgewijs aanvullen leiden tot een foutieve afdichting, omdat het voor dikke kleilagen volgens BRL 2100 volstaat om deeltrajecten van de kleilaag aan te vullen met aanvulklei. Bij de boring in Culemborg zou dus een grote kans bestaan op foutieve afdichtingen wanneer deze uitsluitend gebaseerd was op de boorbeschrijving van de boormeester. Daarnaast valt op dat in Culemborg en Weesp kleilagen zijn beschreven door de boormeester op diepten waar volgens de boorgatmeter geen klei aanwezig is.

Het ontbreken van een enkele kleilaag uit de boorgatmeting in een boorbeschrijving en vice versa zou nog wel te verklaren zijn omdat de boorgatmetingen ook niet altijd eenduidig te interpreteren zijn. Echter, de verschillen zijn zeer groot en het komt ook regelmatig voor dat kleilagen op een verkeerde diepte zijn geïdentificeerd wat duidt op een foutieve inschatting van de reistijd (vertraging) tussen het moment dat de boorbeitel sediment los boort en bemonstering van het losgeboorde materiaal in de spoelbak aan maaiveld. Het is dus aannemelijk dat de verschillen met de boorgatmetingen het gevolg zijn van afwijkingen bij de boorbeschrijving door de boormeester.

In Dongen, Stavoren, Eerbeek en Bergen op Zoom zijn geen boorbeschrijvingen gemaakt.

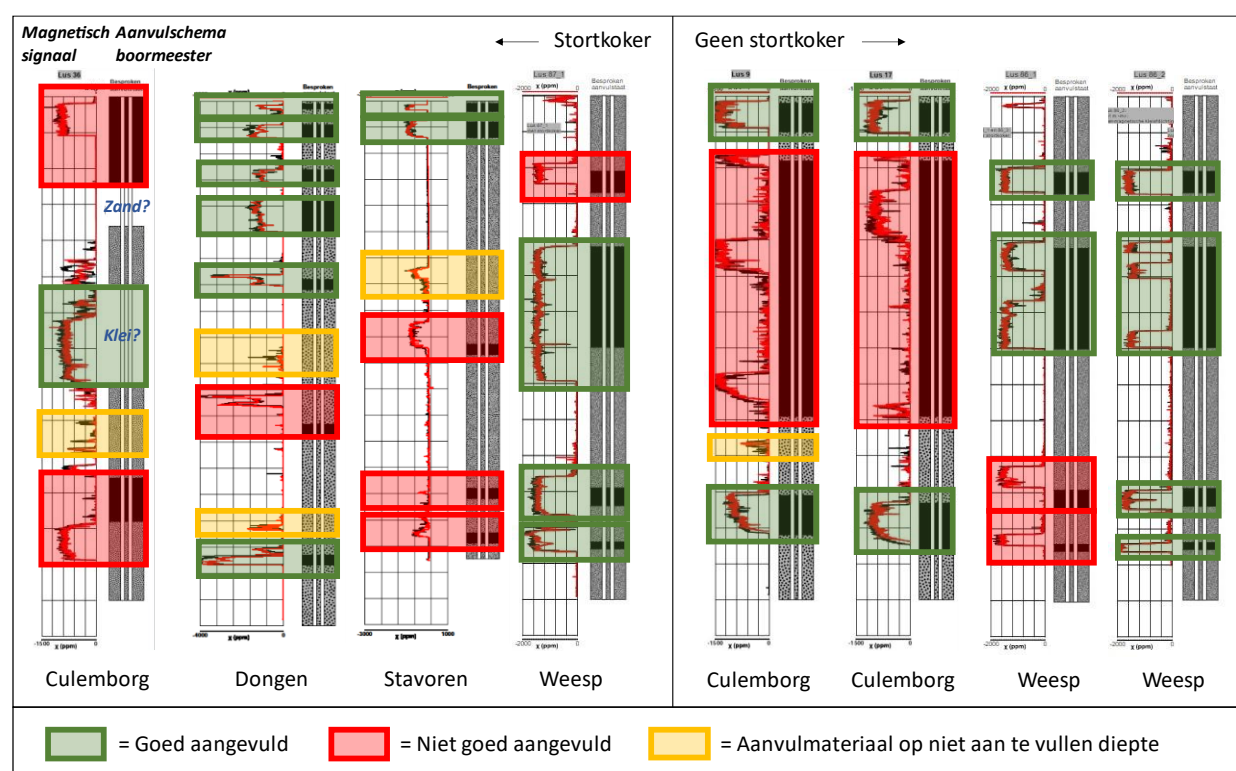


Figuur 4-8: Vergelijking tussen de kleilagen geïdentificeerd met een geofysische boorgatmeting ("boorgatmeting") met de beschrijving van kleilagen opgesteld door de boormeester tijdens de boring ("boorbeschrijving"). Alleen lagen met een dikte van ten minste 1 meter zijn beoordeeld.

4.4.2 Aanbrengen van kleiafdichtingen ter hoogte van kleilagen

Uit vergelijking van de magnetometermetingen met de afgesproken diepte-intervallen blijkt dat een aanzienlijk deel van de afdichtingen niet was uitgevoerd op de beoogde diepte (Figuur 4-9). Met storkoker is het boorgat op 12 van de 19 (63%) afsluitende lagen of afgesproken locaties op de juiste diepte hersteld; zonder storkoker zijn dit 10 van de 14 locaties (71%). Het is opvallend dat werken met storkoker geen duidelijk beter resultaat oplevert, omdat de BRL 2100 juist voorschrijft om met een storkoker te werken omdat dit nauwkeuriger zou zijn.

Bij een aantal boringen is ook een hogere magnetische susceptibiliteit aangetroffen op een diepte waar geen aanvulling was afgesproken (Figuur 4-9). Een logische verklaring is dat aanvulmateriaal soms vast kwam te zitten in het boorgat boven de gewenste diepte en zo het boorgat deels blokkeerde. Het aanvulmateriaal kon zich daardoor gaan ophopen, wellicht totdat het door toename van het bovenliggende gewicht losschiet. Mogelijk heeft dit ook bijgedragen aan de foutieve afdichtingen op grotere diepte.



Figuur 4-9. Beoordeling van de kleiafdichtingen door vergelijking van de aanwezigheid van magnetische aanvulklei (bepaald met de magnetometer) versus de beoogde diepte van de kleiafdichting besproken met de boormeester.

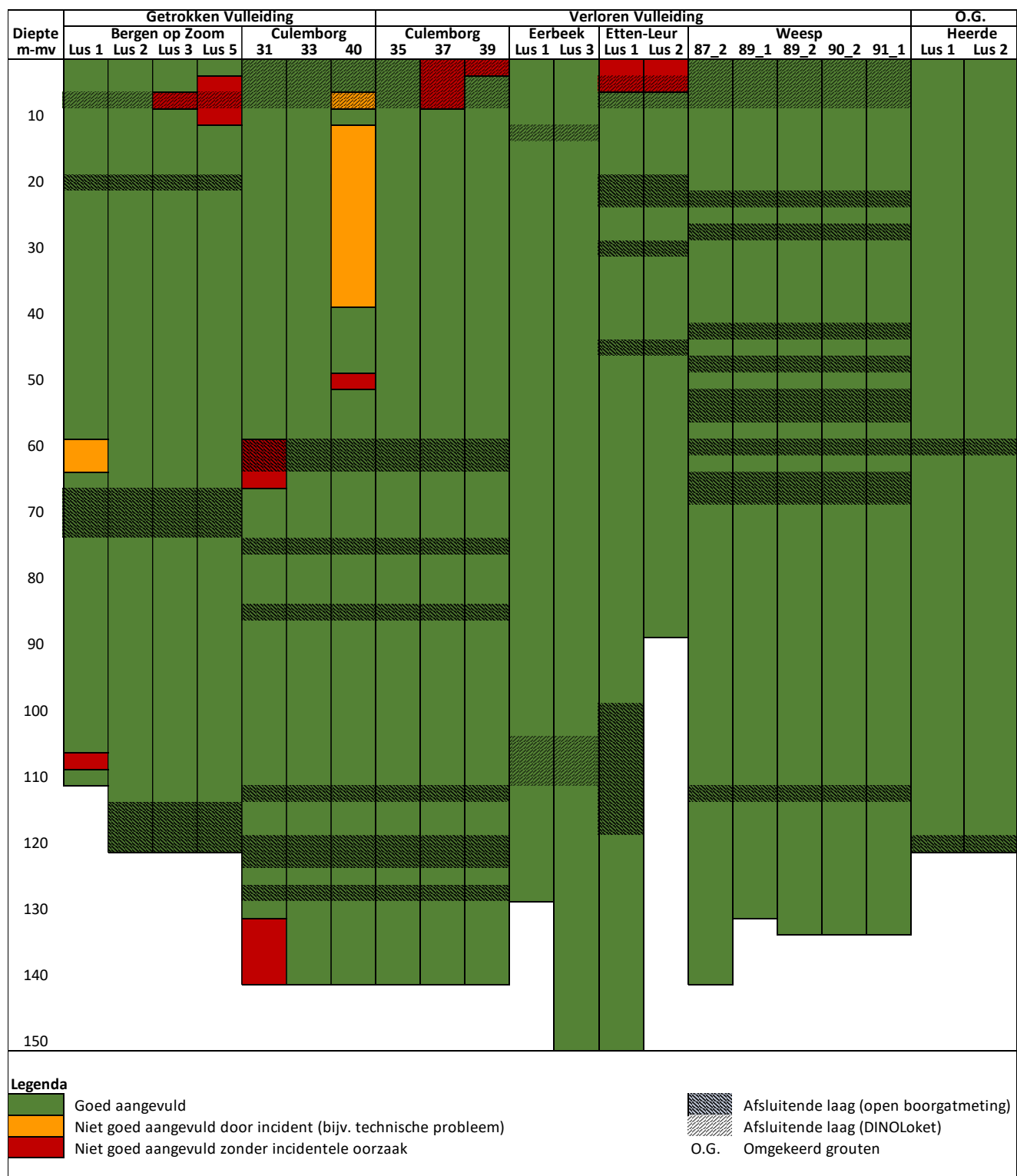
4.4.3 Observaties werkwijze boorploeg

Het bemonsteren en detecteren van kleilagen en laagsgewijs aanvullen van boorgaten bleek een aanzienlijke tijdsinspanning te vergen waardoor de aanleg veel langer duurt dan bij volledig aangevulde boorgaten. In Dongen en Stavoren deed de boorploeg ruim een dag over het boren en het aanvullen (met storkoker). In Culemborg en Weesp zijn op een (lange) werkdag twee gaten geboord en laagsgewijs aangevuld, maar hier waren reeds boorbeschrijvingen of interpretaties van boorgatmetingen voorhanden. Het werken zonder storkoker levert ook een aanzienlijke tijdsbesparing omdat de koker niet in- en uitgebouwd hoeft te worden.

4.5 Veldproeven op praktijkschaal: volledig aanvullen

4.5.1 Magnetisch signaal: relatie met aanvulmethode

Uit evaluatie van het gemiddelde magnetisch signaal over een lengte van 2.5 m blijkt dat in de boorgaten met getrokken vulleiding 32 van de 36 afsluitende lagen (89%) correct zijn hersteld.



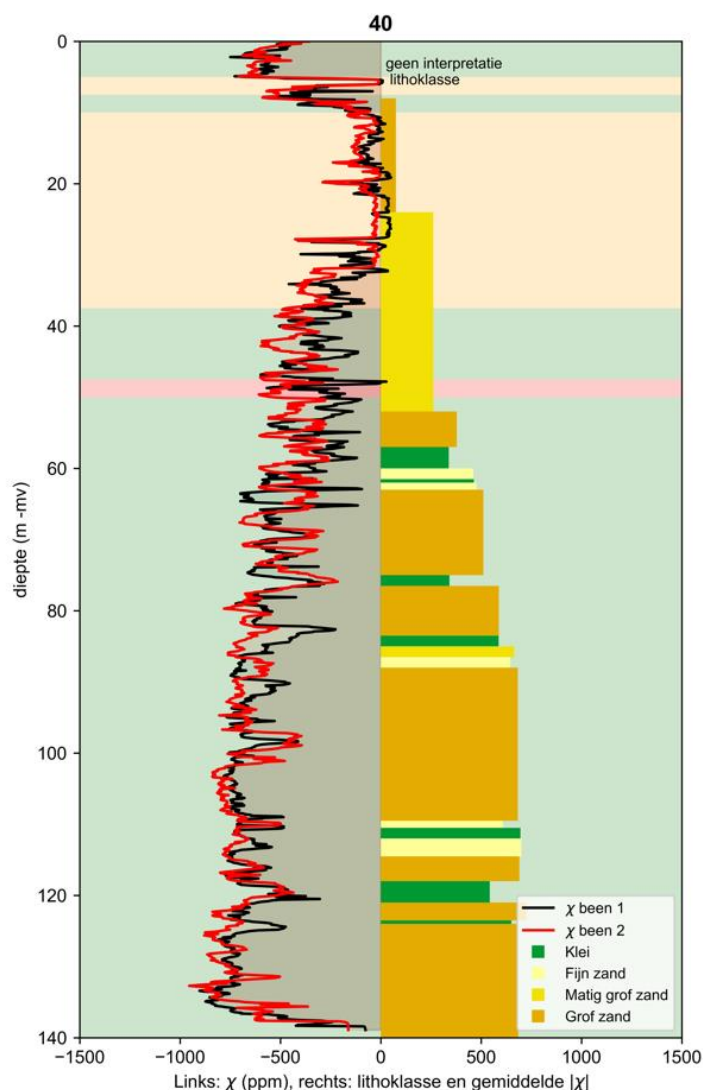
Figuur 4-10. Beoordeling van de volledig aangevulde boorgaten door (visuele) vergelijking van het magnetisch signaal met de grenswaarde van -300 ppm.

In 823 m van de 890 m gesommeerde boordiepte (92%) was het magnetisch signaal sterker dan de grenswaarde van -300 ppm. Dit is een indicatie dat dat de scheidende werking in 11% van de scheidende lagen 8% van het dieptetraject onvoldoende is hersteld (=rode en oranje zones in Figuur 4-10). Een deel van de foutieve afdichtingen zijn gevonden op dieptes waar de boorfirma incidenten meldde tijdens het aanvullen zoals een vastzittende

vulleiding in Bergen op Zoom (=oranje zones in Figuur 4-10). Bij de vaste vulleiding was het magnetisch signaal sterker dan -300 ppm in 75 van de 79 afsluitende lagen (95%) en 99% van het totale dieptetraject (1,583 m van de 1,603 m) inclusief zandlagen. Vergelijken met de optrekkende vulleiding is er dus (1) een veel geringer percentage scheidende lagen (5%) die verdacht zijn c.q. waar een verdenking bestaat dat de scheidende werking onvoldoende is hersteld. Bovendien bevinden (bij de vaste vulleiding) deze trajecten zich vooral bovenin het boorgat en is bij kleilagen op diepte wel magnetisch signaal aangetroffen. Bij omgekeerd grouten zijn in 4 van de 4 afsluitende (100%) en over het gehele dieptetraject (100% over 240 m) voldoende magnetisch signaal gedetecteerd.

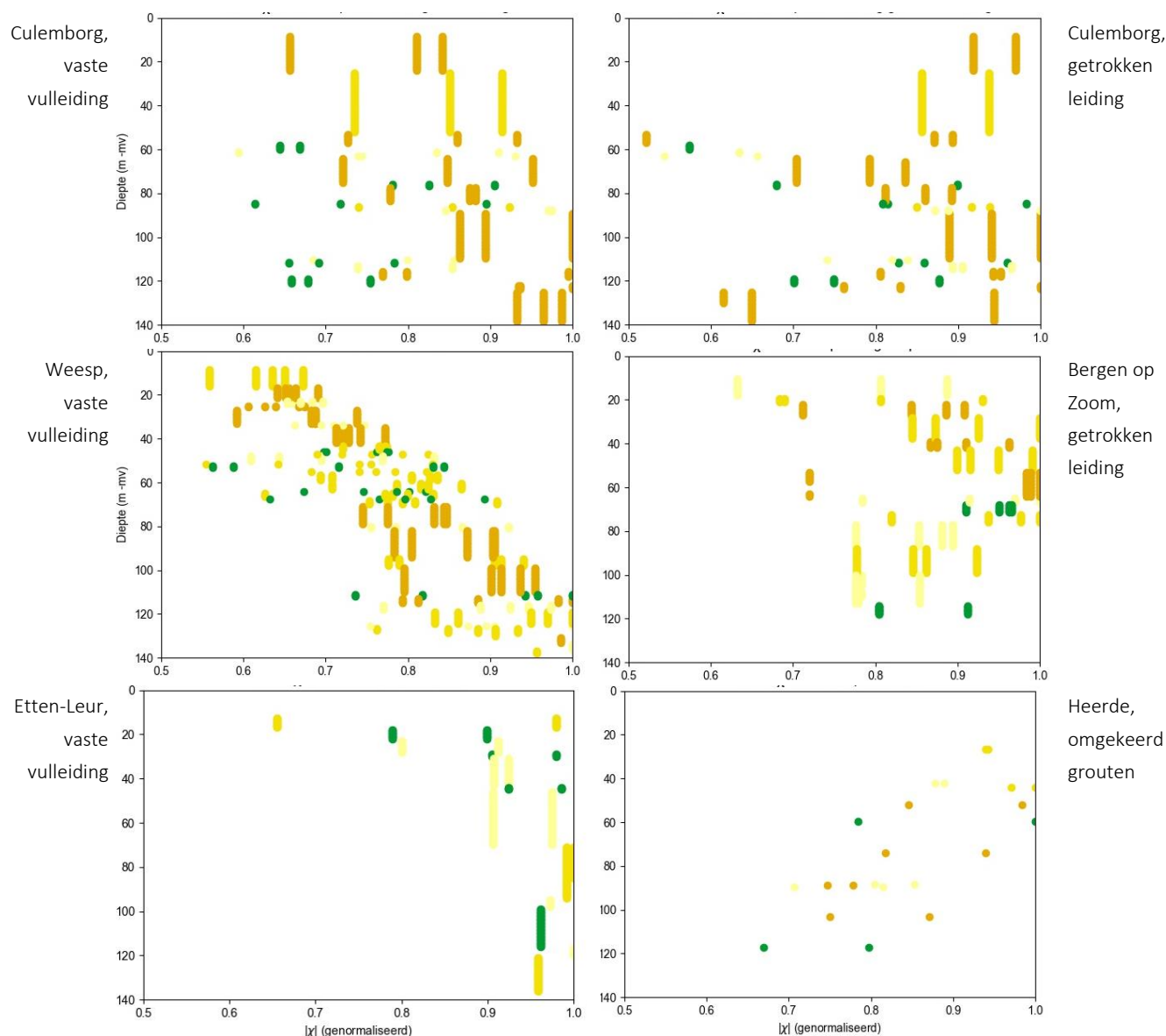
4.5.2 Magnetisch signaal: relatie met lithologie en diepte

Om de relatie met de lithologie en de diepte te onderzoeken zijn eerst per bodemlaag (gebaseerd op de lithoklasse-interpretatie van de boorgatmeting) de gemiddelde waarden van het magnetisch signaal berekend. Vervolgens zijn de metingen genormaliseerd t.o.v. de maximale gemiddelde waarde. Uit deze geaggregeerde metingen (Figuur 4-11) zijn wat duidelijker patronen te halen dan uit de gedetailleerde weergave van het magnetische signaal in de linker figuur. Zo is in boring 40 een algemene toename van de magnetische susceptibiliteit met de diepte zichtbaar en is bij enkele kleilagen juist een afname te zien.



Figuur 4-11: Voorbeeld van de beide magnetometer metingen (zwarte en rode lijnen), de geclassificeerde kwaliteit van de afdichting (rood en oranje buiten beschouwing gelaten voor de analyse) en de gemiddelde absolute (positieve) magnetische susceptibiliteit per lithoklasse.

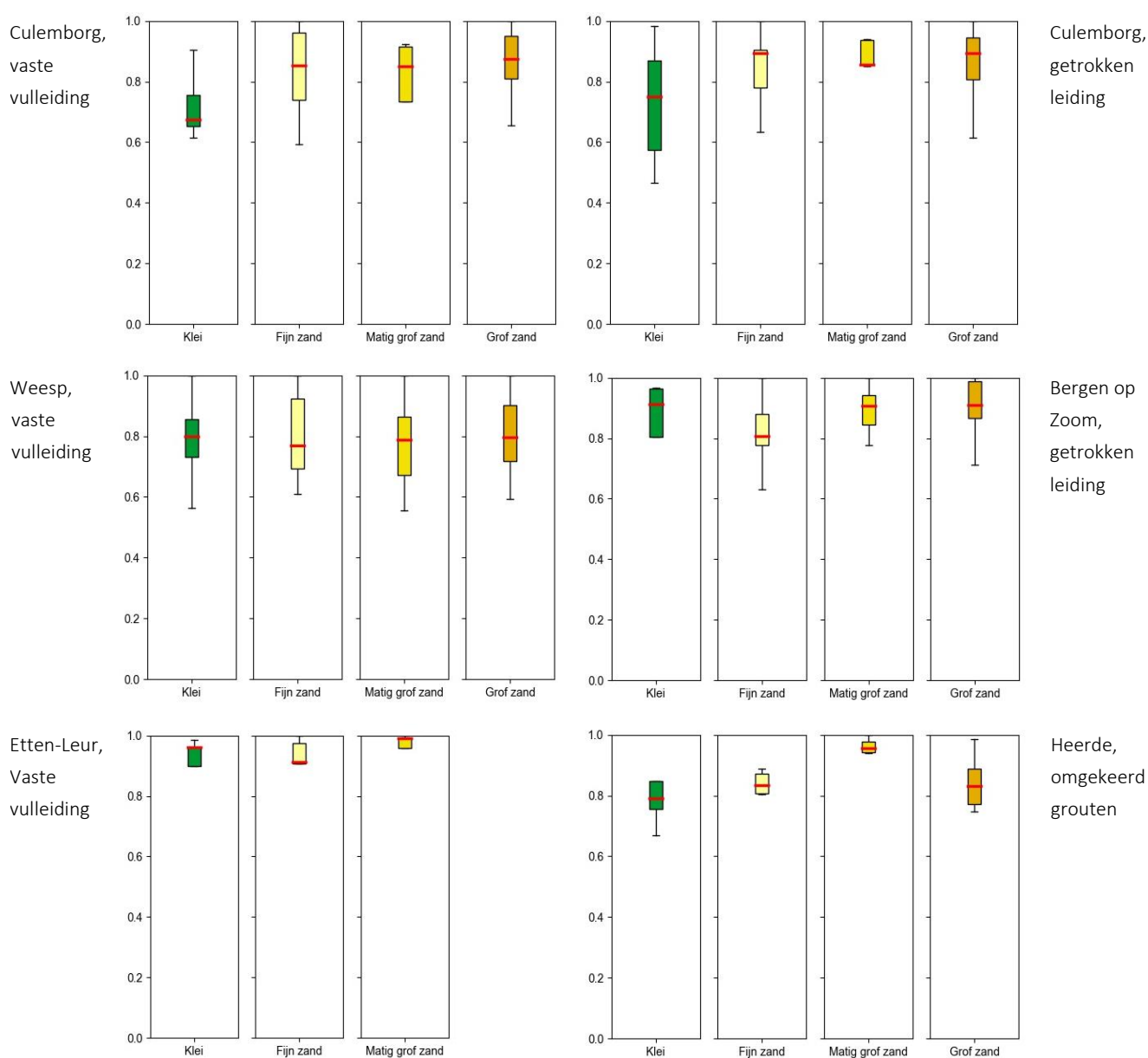
De diepteplots in Figuur 4-12 tonen voor Weesp en in mindere mate de boringen in Culemborg met vaste vulleiding een toename van het magnetisch signaal in diepere lagen. Voor de opgetrokken vulleiding is geen duidelijke trend en bij omgekeerd grouten lijkt de trend eerder gespiegeld, al zijn hier maar slechts twee locaties beschouwd. Een mogelijke verklaring voor de grotere dichtheid bij de vaste vulleiding is dat de benodigde overdruk toeneemt naarmate het boorgat verder is aangevuld, waardoor er meer water uit het aanvulmateriaal wordt geperst voordat het (enigszins) uithardt terwijl het magnetiet achterblijft in het boorgat. Deze grotere dichtheid zou zich dan vervolgens kunnen vertalen in een hoger magnetisch signaal. Bij een optrekkende vulleiding neemt de tegendruk t.p.v. het injectiepunt niet toe gedurende het aanvullen.



Figuur 4-12. Verband tussen het genormaliseerde magnetisch signaal (x-as) en de diepte (y-as), voor verschillende locaties. Het magnetische signaal is genormaliseerd door te delen door de maximale waarde per boorgat. De kleuren geven de lithoklasse weer (zie legenda Figuur 4-11). Afwijkende waarden zwakker dan -300 ppm, weergegeven in oranje en rode achtergrond in Figuur 4-11, zijn hierbij buiten beschouwing gelaten.

De sterkte van het genormaliseerd magnetisch signaal verschilt niet alleen per locatie maar ook per bodemtype. Zo geven de kleilagen in Culemborg en Heerde gemiddeld een zwakker magnetisch signaal dan zandlagen (zie boxplots in Figuur 4-13) maar in Weesp juist iets sterker. Het signaal verschilt op elke locatie ook naar gelang de grofheid van het zand, maar zonder eenduidig patroon dat op alle locaties terugkomt. Vermoedelijk is het verschil tussen diepe en ondiepe monsters relatief groot, waardoor het lastig is om effecten van korrelgrootte op het magnetische signaal te visualiseren. Zo lijkt het magnetisch signaal voor klei en fijn zand in de diepteplot van Weesp zwak t.o.v. de grovere lagen, maar bevinden deze lagen zich vooral op grotere diepte waar het magnetisch signaal sterker is. Bovendien kan er veel “ruis” optreden in de metingen doordat het magnetisch signaal sterk afhankelijk is van de positie van de lussen en sonde in de lus.

Redenen waarom het magnetische signaal zwakker zou kunnen zijn in fijne zandlagen/ klei zijn: (1) minder infiltratie van vloeistof in formatie en dus minder indikking (2) zwellen van klei waardoor het formatiemateriaal binnen het meetbereik komt van de magnetometer (3) kleinere diameter boorgat want minder gevoelig voor uitspoelen.

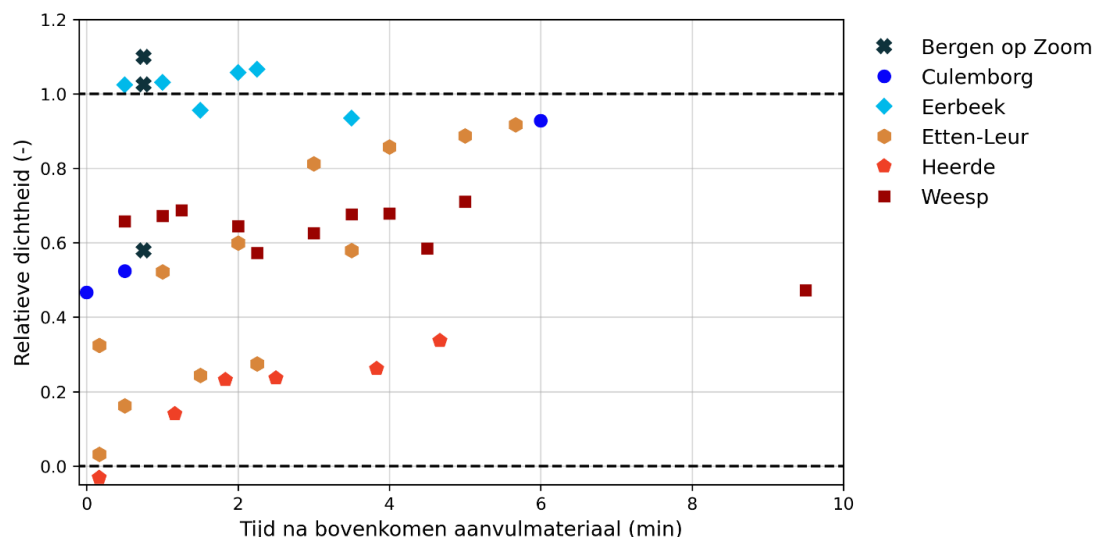


Figuur 4-13. Verband tussen de geïnterpreteerde lithoklasse (x-as) en het genormaliseerde magnetische signaal (y-as). Het magnetische signaal is genormaliseerd door te delen door de maximale waarde per boorgat.

4.5.3 Ingaand en uittredend materiaal

In Figuur 4-14 is de genormaliseerde dichtheid van het uit het boorgat tredende materiaal weergegeven. De normalisatie is uitgevoerd door te schalen tussen de gemeten dichtheid van de boorspoeling op de betreffende boorlocatie (0%) en de dichtheid van het ingaande aanvulmateriaal (100%). Voor de absolute dichtheden per boorlocatie wordt verwezen naar de deelrapporten per veldproef.

De laagste genormaliseerde dichtheden zijn aangetroffen bij de boorgaten in Heerde die zijn aangevuld middels omgekeerd grouten. Dit komt doordat het front van de groutkolom zich, in tegenstelling tot conventioneel grouten, eerst van boven naar beneden verplaatst en vervolgens via de vulleiding omhoog stroomt. Het aanvulproces van omgekeerd grouten stopt vanzelf wanneer de druk aan de bovenkant van de groutkolom gelijk is aan de druk aan de bovenkant van de leiding. Door de wrijving van de boorgatwand en de leiding op het stromende grout vindt dit plaats voordat het uittredende materiaal dezelfde dichtheid heeft als het ingaande materiaal en dus volledig uit grout bestaat. Hierdoor is het niet duidelijk wat de dichtheden die zijn gemeten aan maaiveld zeggen over de kwaliteit van het aanvulmateriaal op diepte.



Figuur 4-14: Vergelijking van de dichtheid van het aanvulmateriaal dat boven aan het boorgat uitkomt, genormaliseerd naar het inkomende materiaal (100%) en boorspoeling (0%) (y-as) uitgezet t.o.v. de tijd na bovenkomen van aanvulmateriaal (x-as).

De dichtheid van het uittredende bentoniet-gebaseerde grout in Eerbeek was bij alle metingen nagenoeg gelijk aan het ingaande materiaal. Ook de zeefkrommes (Tabel 4-2) gaven aan dat het ingaande en uittredende materiaal een vergelijkbare korrelverdeling kenden, wat een indicatie is dat er nauwelijks ontmenging in de ondergrond optrad.

In Culemborg en Etten-Leur nam de dichtheid langzamer toe dan in Eerbeek. Dit duidt erop dat er een veel minder scherp groutfront door het boorgat naar boven bewoog dan in Eerbeek. De dichtheid was ook bij de laatste meting na 6 minuten lager dan het ingaande materiaal. Het is niet bekend of de dichtheid nog verder zou toenemen wanneer langer zou zijn doorgepompt. Vermoedelijk treedt er in het boorgat menging op met het oorspronkelijke grondwater.

In Weesp en één van de drie met HOM gevulde boorgaten in Bergen op Zoom (lus 2) bleef de genormaliseerde dichtheid van het uittredende cement-gebaseerde grout circa 30% tot 40% lager dan het ingaande materiaal. Bovendien was de fractie fijn materiaal in het uitgaande water aanzienlijk hoger dan in de ingaande grout, wat duidt op vermenging met werk- of grondwater.

Tabel 4-2: Korrelgrootteverdeling van de monsters uit veldproeven bij Bergen op Zoom en Eerbeek.

Locatie	Boring nr.	Monstertype	Grind (%)	Zand (%)	Fijne fractie: Silt + Lutum (%)
Bergen op Zoom	Lus 2	In	0	88.6	11.4
		Uit	0.4	82	17.7
		Boorspoeling	0	3.4	97.7
	Lus 3	In	0	88.8	11.2
		Uit	0.4	87.7	11.9
Eerbeek **	Lus 1	In	0	80.9	19.1
		Uit	0	78.8	21.1
		Boorspoeling	0	8.3	91.7

(**) monster genomen 2 minuten na het bovenkomen van het uittredende materiaal

In Bergen op Zoom speelt mee dat de aanvulleiding bijna direct wordt gestopt nadat het HOM in de spoelbak begint uit te stromen waardoor onvoldoende lang wordt doorgespoeld om onverdund grout aan maaiveld te krijgen (zie Figuur 4-15). Verder kwam op beide locaties het uittredende materiaal direct onder in een spoelbak (Weesp) of in een spoelgat terecht (Bergen op Zoom). Hierdoor kon er niet goed grout bemonsterd worden dat direct uit het boorgat kwam. Dit zou een mogelijke oorzaak van de lagere dichtheid van het gewogen uittredende materiaal kunnen zijn. In Heerde en Weesp werd het uittredende materiaal via een buis vanaf het boorgat naar een spoelbak geleid. Hier kon materiaal dat kort geleden uit het boorgat in de buis was getreden direct bemonsterd worden. In Etten-Leur was er een klein spoelgat boven het boorgat dat uitmondde in een groter spoelgat. Doordat de inhoud van het kleine spoelgat hierdoor snel ververst werd, kon ook hier relatief onverdunde grout direct uit het boorgat bemonsterd worden.



Figuur 4-15: Situatie van het boorgat tijdens het aanvullen. a) Spoelbak in Weesp, b) T-stuk in Eerbeek waarvandaan het aanvulmateriaal stroomt naar c) een spoelbak. d) Spoelgat in Bergen op Zoom e) Spoelgat in Etten-Leur.

4.5.4 Benodigde aanvulmateriaal versus theoretische inhoud boorgat

Uit Tabel 4-3 blijkt dat het verpompte volume aanvulmateriaal gemiddeld 30% hoger is dan de theoretische inhoud van het boorgat. Dit verschil varieert van 10% tot 120% en ook binnen een boorlocatie worden verschillende waarden aangetroffen.

Er zijn meerdere oorzaken denkbaar voor deze verschillen. Allereerst kan de boorgatdiameter groter zijn dan de theoretische diameter op basis van de boorkop, zeker in grovere lagen. Daarnaast kan een deel van het grout al tijdens het aanvullen de formatie indringen. Ook kan het aanvulmateriaal worden samengedrukt op diepte door de druk van de bovenliggende kolom boorspoeling en/of aanvulmateriaal. Ook de werkwijze van de boorploeg kan invloed hebben op het verschil, bijvoorbeeld doordat er meer aanvulmateriaal werd ingebracht nadat de inhoud van het boorgat al 1x was ververst (dit scheelt paar procent van de totale tijdsduur van aanvullen) of dat het opgegeven aanvaldebiet niet gehaald wordt door een andere mengverhouding. Tot slot is het de vraag of het verpompte volume grout wel nauwkeurig wordt gemeten.

In Tabel 4-3 is ook de benodigde tijdsduur voor het aanvullen van de boorgaten weergegeven. Dit gebeurde het snelst in Bergen op Zoom, waar met HOM is aangevuld. Op de andere vier locaties is gebruik gemaakt van grout voor het aanvullen van de boorgaten. In Heerde, waar de boorgaten zijn aangevuld door de methode 'omgekeerd grouten' ging dit 1,5 á twee keer zo snel als in Eerbeek, Etten-Leur en Weesp, waar de boorgaten werden aangevuld door conventioneel te grouten.

Tabel 4-3 Vergelijking van de ingeschatte hoeveelheid gebruikt aanvulmateriaal versus het theoretische volume van het boorgat op basis van de boordiameter, einddiepte van de boring en de diameter van de bodemlus.

Locatie	Boring nr.	Tijdsduur aanvullen (min)	Gemiddeld aanvaldebiet (m ³ /uur)	Volume verpompt aanvulmateriaal (m ³)	Theoretisch volume boorgat (m ³)	Verhouding Verpompt / Theoretisch (-)
Bergen op Zoom	Lus 2	19	14.2	4.5 *	3.3	140%
	Lus 3	13	18.9	4.1 *	3.2	130%
	Lus 5	15	16.4	4.1 *	3.2	130%
Eerbeek	Lus 1	67	2.5 – 3.0	2.8 – 3.4 **	1.6	180 - 210%
	Lus 2	50	2.5 – 3.0	2.1 – 2.5 **	2.0	110 – 130%
Etten-Leur	Lus 1+2	108	3.5	8.7 ***	5.4	160%
Heerde	Lus 1	33	5.5	3.0 ***	2.1	140%
	Lus 2	38	4.7	3.0 ***	2.1	140%
Weesp	87_2	70	3.6	4.2 **	3.0	140%
	89_1	63	3.6	3.8 **	2.1	180%
	91_1	77	3.6	4.6 **	2.1 – 2.2	210 – 220%

(*) gemeten met debietsensor, (**) berekend aan de hand van door boorfirma opgegeven gemiddelde aanvaldebiet, (***) ingeschat op basis van afname aanvulmateriaal in betonmolen.

4.5.5 Observaties werkwijze boorploeg

Aanvulsnelheid

Van alle onderzochte methoden was de aanvulsnelheid van het HOM het grootst. Het is niet duidelijk of dit komt door de aard van het materiaal zelf, het vooraf mengen of de gebruikte apparatuur (bijvoorbeeld pompcapaciteit).

Registratie aanvulsnelheid

Een struikelblok bij toepassing van een getrokken vulleiding is het bepalen van het aanvulniveau in het boorgat en er vervolgens voor waken dat het uitstroompunt van de vulleiding continue beneden dit niveau blijft. Op de veldlocatie Bergen op Zoom werd het verpompte volume bijgehouden (o.b.v. slagen en slagvolume van plunjerpomp) en aan de hand van conversietabellen vertaald naar een inschatting van het aanvulniveau. Dit werd vervolgens vergeleken met het uitstroomniveau van de vulslang dat werd geregistreerd door de vulmachine. De onderzoekers van KWR en Deltares hebben niet kunnen vaststellen dat de boorploeg dit tijdens het werk nauwkeurig bijhielden. Uit gesprekken met de boorfirma kwam naar voren dat er waarschijnlijk voorafgaand aan

het aanvullen een inschatting werd gemaakt van de aanvuelsnelheid op basis van de diameter van het boorgat, in te stellen debiet van de pomp en conversietabellen. De optreksnelheid van de vulleiding wordt hierop ingesteld, rekening houdend met een veiligheidsmarge van orde grootte 10 meter onder het berekende aanvulniveau.

Op andere locaties waar laagsgewijs werd aangevuld met een getrokken vulleiding was geen debietmeter aanwezig en werd het aanvuldebiet geschat op basis van periodieke debietmetingen in de werkplaats van de boorfirma. Deze waarden kunnen verschillen t.o.v. de debieten in het veld doordat de tegendruk gedurende het aanvullen varieert.

Een complicerende factor is dat het in de praktijk lastig is om het aanvulniveau te bepalen. Uit Tabel 4-3 blijkt dat het door de boorfirma geschatte volume aangevuld materiaal 10% tot 130% groter is dan de theoretische volume van het boorgat. De registratie van het aanvulniveau ging dan ook mis bij Lus 1 op de locatie Bergen op Zoom, waar de vulleiding vast kwam te zitten doordat deze te ver onder aanvulniveau lag.

De betreffende boorfirma heeft in gesprek met Deltares en KWR aangegeven dat ze de komende tijd de dieptemeter direct gaan koppelen met de boordcomputer die de verpompte hoeveelheid aanvulmateriaal registreert. Samen met een 'praktische boordiameter' zal dan automatisch bepaald worden waar de uitstroomopening zich moet bevinden, en zal de vulleiding automatisch en traploos de slang optrekken zodat deze 10 m onder het berekende aanvulniveau blijft. De komende periode zal de boorfirma in het veld gaan monitoren hoe goed de theoretische inschatting van de 'praktische boordiameter' overeenkomt met de praktijk.

Registratie dichtheid grout

Op locaties waar conventionele grout werd toegepast, werd door de boorploeg consequent de massa van de ingaande grout en het uit het boorgat uitkomende materiaal gewogen. Aan de hand van het verschil werd bepaald of het grouten kon worden stopgezet. Echter gaf de boorploeg vaak aan dat er onduidelijkheid bestaat over de marge van verschil die er zou mogen bestaan tussen de dichtheid van het gewogen ingaande en uittredende aanvulmateriaal. Ook is niet duidelijk hoe lang moet worden doorgepompt als het niet lukt om de dichtheid voldoende gelijk te krijgen.

Op sommige locaties (Culemborg, Eerbeek en Heerde) kon het aanvulmateriaal direct via een leiding uit het boorgat bemonsterd worden voordat het aanvulmateriaal in een spoelbak of spoelgat terecht kwam. Op andere locaties (Bergen op Zoom en Weesp) was dit niet het geval, waardoor op deze locaties niet kan worden uitgesloten dat de monsters van het uitgaande materiaal deels vermengd zijn geraakt met materiaal dat al aanwezig was de spoelbak of het spoelgat.

Nazakking

Met uitzondering van de testlocatie in Heerde vond op elke locatie nazakking plaats, variërend van enkele decimeters tot enkele meters. Op alle locaties werd de eerste nazakking gecompenseerd door het boorgat van bovenaf na te vullen. Over de effecten van nazakking op lange termijn is minder bekend.

Bovenstaande observaties zijn verder uitgewerkt in de deelrapporten van de veldproeven.

5 Discussie

Het aanvullen van boorgaten van GBES kan met veel verschillende materialen, op veel verschillende manieren en onder veel verschillende condities plaatsvinden. Binnen dit project is onderzocht hoe de gangbare technieken in de Nederlandse praktijk functioneren en kunnen worden verbeterd. Er zijn echter nog veel aspecten die niet zijn beschouwd, of nog verder onderzoek vergen. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste kansen voor verbetering van de techniek en risico's voor de kwaliteit van aanvulmateriaal en methode besproken.

5.1 Boortechniek en addities

5.1.1 Detectie van scheidende lagen

Het identificeren van scheidende lagen is een belangrijke voorwaarde om boorgaten laagsgewijs aan te vullen. Uit een beperkte steekproef ($n=12$) is geconstateerd dat **66%** van de kleilagen niet of op een verkeerde diepte zijn beschreven door de boorploeg. Om meer zekerheid te krijgen over de omvang van het probleem, ook bij historische boringen, is het daarom wenselijk om deze metingen te herhalen in meerdere boorgaten (Kennisleemte A). Om de kans op foutieve aanvullingen te verkleinen, is het wenselijk om de detectie van kleilagen te verbeteren. Dit kan bijvoorbeeld door boorgatmetingen met een gamma-sonde in een open boorgat (zie aanbeveling 1).

Het grote percentage fouten is opvallend omdat de boormeesters in het kader van hun certificering een boorbeschrijving hebben gemaakt welke is vergeleken met een gamma sonde meting. De mogelijke oorzaak dat het de boormeesters in de praktijk toch niet lukt, is dat dit "examen" is uitgevoerd in een niet representatief (te ondiep) boorgat. De vertraging tussen het moment dat de boorbeitel een kleilaag raakt, en de klei aan maaiveld komt dan veel kleiner dan bij boorgaten tot 200 m. Het zou beter zijn wanneer de boormeesters voor hun certificering examen doen in een boorgat dat representatief is voor praktijksituaties, dus met een diepte tot circa 200 m. Bovendien is de aanwezigheid van een certificerende instantie wenselijk om de controle in het veld bij te wonen, iets wat in de praktijk nauwelijks voorkomt (zie aanbeveling 17).

Om scheidende lagen wel goed in beeld te brengen zou dus altijd een gamma meting moeten worden uitgevoerd. Daarbij zou het helpen als er commercieel beschikbare software is om metingen van een gamma-sonde te interpreteren en scheidende lagen te identificeren. Als zulke software niet beschikbaar is, dient de kennis te worden ontwikkeld en beschikbaar gesteld om dergelijke software te maken (Kennisleemte B).

Ook bij volledig grouten van boorgaten is het wenselijk om in ieder geval grindlagen en (in zand- en kalksteen) verkarsting te detecteren. Dit om te zorgen voor een booradditief dat de boorgatwand voldoende afsluit om verlies van grout naar de formatie te voorkomen en om grout te selecteren dat minder gevoelig is voor verlies naar de formatie. Daarom wordt geadviseerd om bij alle type boringen (ook volledig aanvullen) in ieder geval detectie van grof zand en grindlagen te waarborgen via goede opleiding (zie aanbeveling 16).

5.1.2 Filtercake als barrière tegen kortsluitstroming

Om een indruk te geven hoe effectief een filtercake een boorgat afsluit, is de kortsluitstroming die optreedt in een referentieboorgat met een skinlaag op de boorgatwand (scenario 3 in Tabel 5-1) vergeleken met een klei/groutafdichting conform BRL 2100 (scenario 1). Hierbij is uitgegaan van een boorgat met diameter (d_b) 0.15 m, een doorboorde kleilaag van 1 m (D_k) en dat de boring 1 m is doorgezet in een onderliggende zandlaag (D_z). De filtercake heeft een hydraulische weerstand (c) van 5 dagen die volgens de labproeven met boorspoeling representatief is voor duinzand (Figuur 4-1). De hydraulische weerstand van het aanvulmateriaal is afhankelijk van

de dikte van de over afgedichte kleilaag en de doorlatendheid (k) van het aanvulmateriaal (10^{-9} m/s conform BRL 2100):

$$c_{aanvul} = \frac{D_k}{k_{aanvul}} \quad [5-1]$$

Het lekdebiet is afhankelijk van het stijghoogteverschil (ΔH) en het doorstroomde oppervlak ter plaatse van de weerstand (A):

$$Q = \Delta H \frac{A}{c} \quad [5-2]$$

Dit oppervlak is voor het scenario met skin gelijk aan de boorgatwand in het onderliggende zandpakket ($\pi \cdot d_b \cdot D_z$), en het scenario met aanvulklei gelijk aan het boorgat ($\pi \cdot d_b^2 / 4$).

Tabel 5-1 Indicatieve berekening van de kortsluitstroming door een doorboorde kleilaag van 1 m dik voor een open boorgat met filtercake versus een klei-afdichting met doorlatendheid van 10^{-9} m/s conform BRL 2100.

Scenario			1. Doorboorde kleilaag aangevuld met klei/grout	2. Doorboorde kleilaag aangevuld met zand	3. Skinlaag op boorgatwand
Parameter					
Dikte kleilaag	D_k	m	1	1	
Dikte zandpakket	D_z	m			1
Diameter boorgat	d_{bh}	m	0.15	0.15	0.15
Doorstroomde oppervlak	A	m ²	0.02	0.02	0.47
Doorlatendheid	k	m/s	1.00E-09	1.16E-04	
Hydraulische weerstand	c	d	11574	0.10	5.0
Debiet	Q	m ³ /d	1.53E-06	0.18	0.09
			100%	11 574 074%	6 172 840%

Uit de berekeningen blijkt dat het lekdebiet voor een boorgat met alleen een skinlaag op de boorgatwand ongeveer zestigduizend maal hoger is dan een correct aangevuld boorgat. Het debiet is qua orde grootte vergelijkbaar met het gebruik van zand als afdichtmateriaal in het boorgat (=scenario 2). Dit komt mede doordat het doorstroomde oppervlak van de skin vele malen groter is dan de diameter van het boorgat.

De hogere c -waarden van de kolomproeven (tot 50 dagen) waren qua orde grootte vergelijkbaar met proeven bij Dunea waarbij kolommen langer (8 uur) maar met een lichtere vloeistof van natuurlijke boorspoeling met PAC additieven zijn blootgesteld (ongepubliceerd rapport KWR). Zelfs toepassing van deze gunstiger waarden leidt tot berekende verliezen die zesduizend maal hoger zijn dan een correct aangevuld boorgat.

In de praktijk heeft een skinlaag waarschijnlijk nog minder invloed op de kortsluitstroming dan in bovenstaande berekeningen. Zandlagen zijn namelijk meestal dikker dan kleilagen waardoor het doorstroomde oppervlak ook groter is. Bovendien zal, wanneer ook grovere zandlagen worden aangeboord, de opbouw van weerstand in de filtercake ook lager zijn. Tot slot kan de filtercake tijdens het inbrengen van de bodemlussen en het aanvullen van het boorgat verstoord raken waardoor de afdichtende werking afneemt. Bij grondwaterputten treedt namelijk ook regelmatig een toename op van het werkwaterverlies tijdens het inbouwen van de buizen en aanvullen.

Al met al zorgt een filtercake voor een stukje extra weerstand voor grondwater om een boorgat in en uit te stromen, en beperkt daarmee eventuele kortsluitstroming tussen 2 watervoerende pakketten in een niet goed aangevuld boorgat. De mate waarin deze weerstand ook daadwerkelijk optreedt is echter beperkt bij boorspoeling samenstellingen die in de praktijk worden toegepast en veel kleiner dan de barrièrewerking van een aanvulmateriaal conform BRL 2100. Een filtercake kan op basis van deze metingen dan ook nooit als afdichtende maatregel worden toegepast. Gezien de potentie is het wellicht interessant om te verkennen hoe met nog

verstoppender boorspoelingsamenstelling deze weerstand kan worden vergroot. Dit als extra barrière, bovenop goede aanvulling (Kennisleemte C).

5.1.3 *Verlies van werkwater (en aanvulmateriaal)*

Uit gesprekken met boorbedrijven en op basis van observaties in het veld is gebleken dat werkwaterverlies, verlies van grout tijdens aanvullen en nazakking van grout vrijwel altijd voorkomt. De ervaring van boorbedrijven is dat dit doorgaans samenhangt met de ondergrond; daar waar relatief veel grof materiaal voorkomt is het verlies groter. Werkwaterverlies en verlies van grout tijdens aanvullen komen met name voor in grovere formaties en bij gebruik van een te dunne boorspoeling. Met name bij grindlagen is het verlies groot. Het verlies van grout kan verklaard worden door infiltratie van grout in de formatie of door filtratie van grout. Bij filtratie fungeert de boorgatwand als een filter, waarbij de grove fractie achterblijft en het fijne deel en de vloeistof infiltreert in de formatie. Daarmee dikt het grout dat achterblijft in het boorgat in.

Daarnaast is het de vraag wat er gebeurt boven de zone waar verlies optreedt: kunnen er bijvoorbeeld holtes ontstaan onder uitgeharde delen van het boorgat, wanneer grout over een bepaald dieptetraject onder invloed van haar eigen gewicht in de formatie stroomt. En wat gebeurt er met het magnetiet: Zitten deze aan de grove delen van het grout mengsel of juist aan de fijne delen? Of bewegen ze vrij en bewegen ze met het werkwater de formatie in? (zie Kennisleemte I)

Uit interviews bleek dat boorfirma's het liefst één type booradditief en grout gebruiken; dit is logistiek eenvoudig en goedkoop en sluit ook het beste aan bij het opleidingsniveau van de meeste boorploegen. Leveranciers voor de GBES markt leveren materialen die onder zo breed mogelijke condities weliswaar niet optimaal maar wel voldoende presteren (one-size-fits-all). Om verlies van werkwater en aanvulmateriaal te voorkomen is het belangrijk om booradditieven en grout af te stemmen op de formatie en diepte, conform de productbladen van leveranciers. Bijvoorbeeld door gebruik van meer op PAC-gebaseerde boorspoeling in boorgaten met grovere formatielagen (CEBO) of toepassing van grover zand in grout (RKV). Daarnaast werd door RKV gesteld dat het belangrijk is dat er een seal ontstaat rond het grout. Een aandachtspunt hierbij is dat bij een hogere dichtheid van grout de hydrostatische druk op de boorgatwand en daarmee het filtratieverlies kan toenemen (pers. med. CEBO).

Geadviseerd wordt om altijd een boorspoeling van ten minste 25 kg/m³ te gebruiken, tenzij de specificaties van de leverancier een lagere dichtheid adviseren voor matig fijn zand (zie aanbeveling 4). Daarnaast is het wenselijk om duidelijker aan productbladen toe te voegen voor wat voor type formatiemateriaal ze bedoeld zijn, inclusief Nederlands vertaling, of via een eenvoudige folder (zie aanbeveling 13).

Tot slot is het wenselijk om triggers te ontwikkelen waarboven het noodzakelijk is om andere booradditieven en grout te gebruiken. Bijvoorbeeld wanneer het werkwaterverlies boven een bepaalde grenswaarde uitkomt. Er zou dan pas begonnen mogen worden met grouten wanneer het werkwaterverlies beneden deze grenswaarde is gezakt. Of wanneer de boorploeg schelp- of grindlagen tegenkomt in een boring (aanbeveling 3). Maar is de boorbeschrijving van de boorploeg hiervoor voldoende nauwkeurig, of moeten ze kijken naar de aanwezigheid van grind in een schudzeef of uitgaan van REGIS? Hoe werkt dit door in diepere boorgaten waar de overdruk t.o.v. de formatie vaak groter is als gevolg van de hoge dichtheid van de boorspoeling en grout. Is het wenselijk om andere materialen toe te passen in diepere boorgaten? Of moeten er limieten gesteld aan de maximale diepte van GBES boorgaten? Het is duidelijk dat te groot verlies van werkwater en grout aan de formatie niet wenselijk zijn. Maar het is eigenlijk niet duidelijk welke gevolgen dit heeft. Welke verliezen zijn acceptabel? Tot slot is het de vraag hoe je deze triggers in eenvoudige regels kunt vatten, zodat ze toepasbaar zijn voor een boorploeg en achteraf te controleren door een externe kwaliteitsbewaker zoals CI, omgevingsdienst? (zie Kennisleemte C)

Booradditieven zoals bentoniet zijn gericht op het zo snel mogelijk creëren van een dunne filtercake op de boorgatwand. Deze filtercake limiteert vervolgens verstopping in de formatie zelf (door "diepbed-filtratie") doordat

er geen boorspoeling de formatie in kan stromen. Het is de vraag of dit wenselijk is. Tijdens het inbrengen van de slangen en grout kan er namelijk beschadiging en erosie optreden van de skinlaag, waardoor het werkwater direct een goede hydraulische verbinding heeft met eventuele goed doorlatende formaties, resulterend in verlies van werkwater en grout. Wellicht is het mogelijk om deze verliezen te beperken door toepassing van boorspoeling waarbij meer infiltratie optreedt, zodat de weerstand altijd intact blijft, en er ook na aanvullen een grotere intrede weerstand resteert in het boorgat. Hoeveel moet er minimaal infiltreren om een goede verstopping van de formatie rondom het boorgat te bewerkstelligen? (Kennisleemte C)

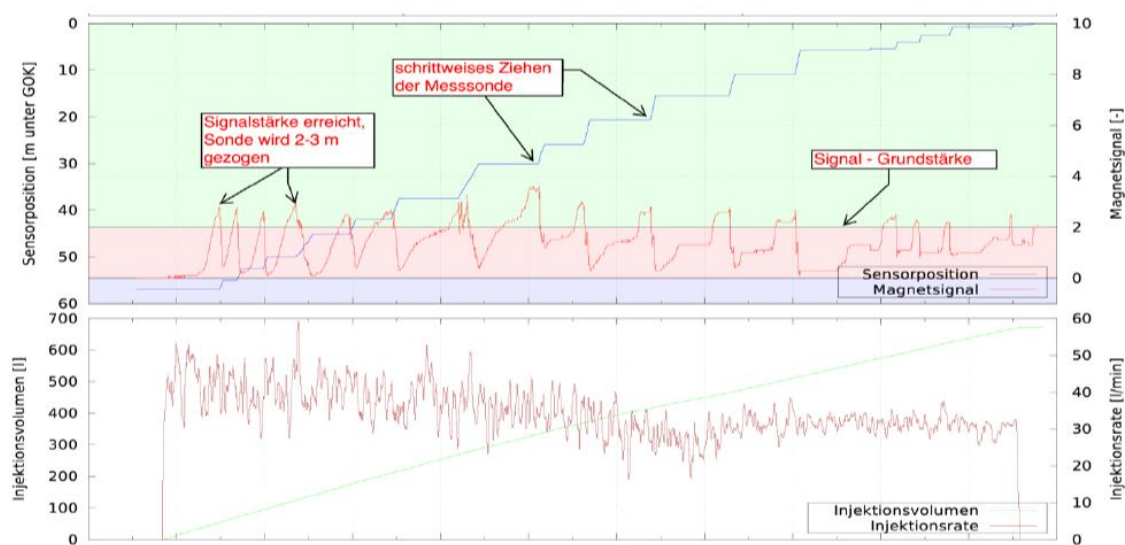
5.2 Aanvulmethode

5.2.1 Laagsgewijs aanvullen

Uit de evaluatie van het magnetisch signaal bleek dat bij **laagsgewijs aanvullen** het detecteren van scheidende lagen regelmatig onnauwkeurig is (zie §5.1.1). Bovendien was **33%** van de scheidende lagen niet of niet op de juiste hoogte afgedicht (n=33, verdeeld over 7 boringen). Hierbij was opvallend dat werken met stortkoker geen duidelijk beter resultaat oplevert, omdat de BRL 2100 juist voorschrijft om met een stortkoker te werken omdat dit nauwkeuriger zou zijn. Mogelijk komt dit ook doordat het boorgat te klein is, waardoor er onvoldoende werkruimte is en de stortkoker ook een te kleine diameter heeft. Wellicht dat vergroting van de boordiameter en diameter van de stortkoker tot minder fouten leidt (zie aanbeveling 2).

De laagbeschrijving en het aanvulproces (met name stortkoker) zijn tijdrovend, wat uitnodigt tot gehaast werken. Tot slot blijkt het ook lastig om te voorkomen dat er kleikorrels blijven steken. Het volledig aanvullen van een boorgat met kleikorrels zal naar verwachting niet direct leiden tot geringere risico's omdat de kleikorrels eerder blijven steken vanwege lagere soortelijk gewicht dan aanvulgrind. De kans op foutieve afdichtingen lijkt dan ook zeer groot bij deze techniek.

De meest kansrijke methode om foutief laagsgewijs aanvullen te voorkomen is door het toepassen van magnetisch detecteerbare aanvulklei en grout (aanbeveling 6) en dit te laten volgen door de boorploeg tijdens aanvullen zoals weergegeven in het voorbeeld in Figuur 5-1 (aanbeveling 7) en achteraf steekproefsgewijs te laten meten door een controlerende instantie (aanbeveling 15, §5.6). Eigenlijk geven de metingen aanleiding om te overwegen het laagsgewijs aanvullen wel wenselijk is (Kennisleemte G).



Figuur 5-1: Illustratie van hoe het aanvulniveau van magnetische grout stapsgewijs is te volgen door een magnetometer stapsgewijs omhoog te trekken totdat de grout passeert. (bron: informatiefolder RKV)

5.2.2 Volledig aanvullen met optrekkende vulleiding

In de boorgaten met **getrokken vulleiding** was bij **11%** van de afsluitende lagen (n=36, verdeeld over 10 boringen) het magnetisch signaal lager dan de vooraf gestelde grenswaarde, wat een sterke aanwijzing is dat deze lagen onvoldoende zijn afgedicht. Een deel van de foutieve afdichtingen is gevonden op dieptes waar de boorfirma incidenten meldde tijdens het aanvullen, zoals een vastzittende vulleiding. Bovendien blijkt het in de praktijk lastig om de vulleiding continue onder het aanvulniveau van het grout te houden (=eis BRL 2100). Dit komt doordat het volume ingebracht grout sterk afwijkt (10% tot 130%) van het theoretische volume van het boorgat op basis van boordiameter en einddiepte. De ratio's bleken op de in dit onderzoek beschouwde locaties ook binnen één locatie sterk uiteen te lopen. Het is dus de vraag of het überhaupt mogelijk is om op basis van de groutverliezen tijdens een eerste boring op een locatie of ervaringen in nabijgelegen boorgaten de aanvulhoogte voldoende nauwkeurig te berekenen (schatten) tijdens het aanvullen. Wellicht zou een betere schatting van het aanvulniveau, in combinatie met een ruimere veiligheidsmarges t.a.v. optreksnelheid van de vulleiding een optie kunnen zijn om fouten te voorkomen. Wellicht in combinatie met het meten van de trekkracht die nodig is om de vulleiding op te trekken. Maar dit alles vergt nader onderzoek (Kennisleemte F).

Maatregelen om al op korte termijn fouten te voorkomen zijn vergelijkbaar met het laagsgewijs aanvullen: gebruik magnetisch detecteerbaar grout (aanbeveling 6) en volg het aanvulniveau tijdens aanvullen (aanbeveling 7). De verificatiemetingen hoeven minder vaak plaats te vinden dan bij laagsgewijs aanvullen (aanbeveling 15) omdat het percentage foute afdichtingen kleiner lijkt (op basis van de beperkte steekproef van dit onderzoek) en omdat er minder tijdsbesparing c.q. financieel voordeel is te behalen met een foutieve werkwijze.

Daarnaast is het (overigens ook bij toepassing van een verloren vulleiding) belangrijk om ervoor te zorgen dat dichtheidsmetingen direct uit het boorgat genomen kunnen worden, voordat het grout (of HOM) in het spoelgat of de spoelbak terecht komt. Bijvoorbeeld door het opkomende materiaal via een mantelbuis met T-stuk op te vangen (zie Culemborg/ Eerbeek in Figuur 4-15) of de spoelvijver leeg te pompen (aanbeveling 11). Hierbij moet ook duidelijk zijn welke bandbreedte de dichtheid mag hebben t.o.v. het ingaande materiaal (aanbeveling 10). Analooq aan het werkwaterverlies, mag er ook niet teveel grout verloren raken aan de formatie (aanbeveling 12) en moet er een makkelijk beslisschema komen voor boorploegen wanneer over te stappen op andere boorspoeling of grout (aanbeveling 14)

5.2.3 Volledig aanvullen met verloren vulleiding

Bij het volledig aanvullen met **vaste vulleiding** was **5%** (n=79) van de afsluitende lagen foutief aangevuld (op basis van het magnetisch signaal) en 1% van de totale boorlengte. Dit is een stuk lager dan de andere beschouwde methoden. Het volstaat hier om detecteerbaar grout te gebruiken (aanbeveling 6) i.v.m. incidentele verificatiemetingen achteraf (aanbeveling 15).

Alleen wanneer er meerdere vulleidingen in diepe gaten worden toegepast kan het wel wenselijk zijn om gedurende de boring het aanvulniveau te monitoren met een magnetometer. Dit zodat de boorploeg zeker is dat het aanvulniveau hoger is dan dat van een ondiepere aanvulslang wanneer deze wordt ingezet (aanbeveling 7). Aandachtspunt is, net als bij de optrekkende vulleiding, om te zorgen dat grout direct uit het boorgat bemonsterd kan worden (zie aanbeveling 11). Daarnaast is het belangrijk dat de pomp voldoende opvoerhoogte heeft zodat de boorploeg niet heel lang hoeft te wachten totdat de dichtheid van het materiaal aan maaiveld gelijk is aan het ingaande materiaal. Gebruik dus een verdringerpomp. Een lange wachttijd kost geld en nodig uit tot afwijkingen (zie aanbeveling 9).

Wel is het verstandig om na te gaan of de aanvulleidingen die gebruikt worden voldoen aan de milieukundige eisen voor materialen die achterblijven in de bodem. Kunnen hier milieuvreemde stoffen uitlogen? Kunnen er holtes ontstaan die de doorlatendheid van het gerijpte grout vergroten? (Kennisleemte E)

Wat opvalt bij de magnetometermetingen (Figuur 4-10) is dat er met name in de bovenste meters een te laag magnetisch signaal is. Het is belangrijk om te zorgen dat er een extra groutvoorraad boven het boorgat blijft (bijvoorbeeld in een mantelbuis of spoelvijver) om verlies van grout door zettingen bovenin het boorgat op te vangen (zie aanbeveling 11). Wellicht is een beter resultaat haalbaar door in de bovenste meters een ander type aanvulmateriaal toe te passen (poederklei?) (Kennisleemte H).

5.2.4 Omgekeerd grouten

Bij **omgekeerd grouten** bleken **100%** van de scheidende lagen correct aangevuld maar was de steekproef (n=4) niet representatief. Nadeel van deze techniek is dat het grout stopt met stromen als de dichtheid van het materiaal in de annulaire ruimte en vulleiding nog niet gelijk zijn door wrijvingsweerstand. Er kan daarom niet worden doorgegaan met aanvullen totdat het materiaal dat via de vulleiding naar buiten treedt dezelfde dichtheid heeft als het ingaande grout. De techniek is technisch kansrijk en ook financieel aantrekkelijk omdat er minder pompdruk nodig is snel. Het is wenselijk om eerst meer ervaring op te doen met deze methode, en na te gaan of het mogelijk is om dichtheidsmetingen te bewerkstelligen van grout dat uit de aanvulleiding omhoog stroomt. Bijvoorbeeld door te werken met een casing waarmee wat meer overdruk kan worden gezet op de annulaire ruimte (Kennisleemte D)

5.3 Aanvulmateriaal

5.3.1 Beoordelingscriteria: wat is het ideale grout?

Op basis van interviews met grout producenten, en de eisen aan grout in de conceptversie van de Europese standaard voor gesloten bodemenergiesystemen (CEN TC451 WG2, versie juni 2021), zijn een aantal criteria opgesteld waar grout idealiter aan zou moeten voldoen. Deze zijn samengevat in Tabel 5-2 en worden hierna toegelicht.

Tijdens inbrengen:

- Viscositeit moet niet te hoog zijn om het te kunnen verpompen. Het grout mag ook niet teveel opstijven tijdens het inbrengen om verhoging van de pompdruk te beperken.
- Dichtheid: Het aanvulmateriaal moet voldoende dichtheid hebben om het boorgat goed af te sluiten en te onderscheiden zijn van de boorspoeling. Een te hoge dichtheid is onwenselijk in diepe boorgaten omdat de benodigde druk voor het verpompen dan te hoog wordt en de filtratieverliezen toenemen door overdruk in het boorgat t.o.v. de formatie. Materiaal met hoge dichtheid is gevoeliger voor ontmenging.

Tijdens uitharden:

- Beperkte sedimentatie, i.e. ontmenging van zandfractie (CEN: maximaal 2% binnen 24 uur).
- Beperkte filtratieverliezen. Het is wenselijk dat het grout in beperkte mate de bodem wordt ingedrukt om kortsluitstroming op de overgang van formatie naar grout te voorkomen.
- Beperkte opwarming: om scheurvorming te voorkomen.
- Beperkte dehydratatie: Bij menging van bentoniet met cement kan het calcium in het cement water onttrekken aan de matrix. Het bentoniet kan hierdoor niet volledig hydrateren. Zelfs een bestaande klei/ bentoniet-afpleistering op de boorgatwand zou hierdoor kunnen dehydrateren waardoor er alsnog grout naar de formatie uitstroomt. Ook cement wordt korrelig indien het uithardt met onvoldoende waterbeschikbaarheid.

Na uitharden:

- Permanent stabiel na uitharden.
- Geen erosie van grout door grondwaterstroming.
- Goed contact met formatie; geen stroming langs overgang grout-formatie.

- Geen uitloging van de omliggende formatie (bijvoorbeeld door te hoge pH in cement) of aantasting van bentoniet -> dit vergt keuze van juiste type cement bij cement gebaseerd grout.
- Resistent tegen chemische uitloging (cement moet bijvoorbeeld resistent zijn tegen sulfaat).
- Resistent tegen temperatuurinvloeden binnen de operationele temperatuurrange van de GBES (geen scheurvorming etc.).
- Beperkte doorlatendheid.
- Thermische geleidbaarheid hoger dan de omliggende grond.
- Enige mate van viscositeit/plasticiteit.

Tabel 5-2: Overzicht van mogelijke methoden om reologische eigenschappen van grout te bepalen.

Criterium	Bestaande grenswaarde	Testmethode en mogelijk protocol	Onderdeel van BRL 2100
Tijdens inbrengen			
Viscositeit afdoende voor verpomping	??	Marsh funnel	Nee
Dichtheid	>1300 kg/m ³ * >300 kg/m ³ dichtheid boorspoeling *	Dichtheidsmeting	Nee
Tijdens uitharden			
Sedimentatie (ontmenging)	Maximaal 2% binnen 24 uur*	???	Nee
	Vrij water 1% **	Cilinderproef	Nee
Infiltratieverliezen	??	(infiltratietest, 7 bar 7.5 minuten na aanmaken)	Nee
Opwarming	??	??	Nee
Na uitharden			
Permanent stabiel	??		Nee
Resistent tegen chemische uitloging	Zie BRL 5078	Zie BRL 5078	Nee
Resistent tegen temperatuurinvloeden	??	Vane Shear test na opwarmen & koelen in oven	Nee
Beperkte doorlatendheid	10 ⁻¹⁰ m/s * BRL 2100: 10 ⁻⁹ m/s	Triaxiaaltest permeabiliteit NEN-EN-ISO 17892-11 ??	Ja, maar zonder eisen aan testprotocol
Thermische geleidbaarheid	???		Ja, maar geen absolute waarde en zonder eisen aan testprotocol
Viscositeit	??	Vane Shear test na rijping	Nee

(*) CEN TC451 WG2 concept versie 11 juni 2021 (**) pers. med CEBO.

5.3.2 Grenswaarden

In Nederland wordt grout alleen beoordeeld op uitloging van materialen (BRL 5078). Daarnaast mag de doorlatendheid maximaal 10⁻⁹ m/s bedragen volgens opgaven van de leverancier (BRL 2100). Het is belangrijk om reologische beoordelingscriteria en grenswaarden te ontwikkelen voor grout en HOM (Kennisleemte H).

5.3.3 Testprotocollen

Van de monsters die zijn genomen tijdens de veldproef in de ondiepe boringen, was de doorlatendheid van zowel het onderzochte groutmonster (n=1) als 3 van de 4 HOM monsters hoger dan de toelaatbare 10⁻⁹ m/s (BRL2100). Wellicht zit er een veiligheidsmarge in de toelaatbare doorlatendheid van 10⁻⁹ m/s, maar als dat zo is dan staat dat nergens omschreven.

De hoge doorlatendheid van het grout komt mogelijk doordat het van boven in de kolommen is gestort in plaats van met een vulleiding. De dichtheid was ook wat lager dan de 1,570 kg/m³ die de leverancier voorschrijft op het productblad. Voor het HOM heeft Bergmans doorlatendheidsproeven laten uitvoeren op verschillende mengverhoudingen van zand en bentoniet. Dit in een poging om aan te tonen hoeveel bentoniet nodig is om te garanderen dat HOM voor alle in Nederland gangbare typen formatiemateriaal voldoet aan de vereiste

doorlatendheid van 10^{-9} m/s. Echter, deze metingen zijn uitgevoerd in een ideaal gemengd monster, zonder rekening te houden met processen als ontmenging / sedimentatie. Het is dan ook aannemelijk om te veronderstellen dat de te lage doorlatendheid veroorzaakt wordt doordat de condities in het boorgat afwijken van de labomstandigheden waarbij de doorlatendheid is bepaald.

In Nederland zijn geen richtlijnen hoe doorlatendheid moet worden getest, laat staan voor andere criteria. Het is dan ook wenselijk om testprotocollen te ontwikkelen of over te nemen uit andere landen en sectoren hoe grout te testen, zodanig dat de waarden representatief zijn voor de condities in een boorgat. Hiervoor dienen ook proeven plaats te vinden naar het gedrag van grout tijdens het inbrengen en uitharden en welke consequenties dit heeft voor de permeabiliteit. Dit kan bijvoorbeeld door het herhalen van de ondiepe veldproeven (met een grotere diepte) en/ of door het magnetisch signaal in de loop van de tijd te volgen in boorgaten (Kennisleemte H).

Mocht magnetiet standaard worden ingevoerd om afdichtmateriaal magnetisch detecteerbaar te maken, dan verdient het ook aanbeveling om naar de resistentie (uitzakbaarheid en chemische weerbaarheid) over langere tijd te kijken. Zo kan bepaald worden hoe lang controlemetingen theoretisch mogelijk zijn (Kennisleemte J).

5.4 Beoordelingscriteria in het veld

De bij dit onderzoek betrokken boorfirma's meten de dichtheid van grout. Volgens de geraadpleegde leveranciers volstaat het wanneer de boorploeg de dichtheid meet van grout en (bij hoge en lage temperaturen) de viscositeit. Daarnaast is het belangrijk dat wordt voldaan aan de eisen op het productblad t.a.v. menging. Dit is al verplicht binnen de huidige BRL 11000. Hierbij mag geen lucht in de grout worden geslagen.

Bij toepassing van HOM is de samenstelling van de toegepaste grondstof per locatie verschillend, afhankelijk van het formatiemateriaal en de instellingen van de schudzeef. Wellicht zijn er voor HOM mogelijkheden om de reologische eigenschappen die nodig zijn voor een goede afdichting van scheidende lagen via eenvoudige tests in het veld te bepalen. Dit vergt echter nader onderzoek (Kennisleemte H).

5.4.1 Afstemming grout op veldcondities

Het grout en het mengproces moeten op elkaar zijn afgestemd. Zo zijn bij doorstroommengers de menging en contacttijd beperkt. RKV adviseert in dat geval producten die snel rijpen gebaseerd op afgerond zand. Om fouten te voorkomen en handhaving te vergemakkelijken zou het helpen om alleen voorgemengd grout en grout gemengd met een colloïdaalmenging toe te staan (Aanbeveling 5).

Daarnaast moet het grout zijn afgestemd op de condities in de ondergrond. Zo kan het bij grofzandige- en grindlagen wenselijk zijn om grout met grovere zandfractie toe te passen om verlies naar de formatie te beperken. De viscositeit (gelstrength) van het grout moet dan wel hoger zijn om sedimentatie te beperken. Hiervoor is het noodzakelijk dat certificaten van de leverancier ten minste aangeven: mengverhouding, mengwijze (welk type menging en mengduur), type formatiemateriaal (maximale korrelgrootte zand/ grind). Boorfirma's zouden alleen materialen moeten toepassen waarvan de reologische eigenschappen en condities waarvoor het grout toepasbaar is voldoende zijn beschreven (Aanbeveling 13). Wellicht is het ook mogelijk om de reologische eigenschappen van HOM te verbeteren en beter voorspelbaar te maken door toevoeging van cement (Kennisleemte K).

Een belangrijk aandachtspunt hierbij is het (lange termijn) effect van ondergrondcondities op het aanvulmateriaal. Met name de effecten van zoet/brak/zout grondwater. Wat gebeurt er met een afdichting wanneer er verzilting optreedt? In veel delen van NL is het rondom GBES boorgaten bovenin zoet en onderin zout. Kan het toegepaste materiaal onder beide condities worden toegepast (Kennisleemte I)?

5.5 Verificatiemetingen

5.5.1 Betrouwbaarheid van magnetometer

De magnetometer is relatief makkelijk toepasbaar en geeft inzicht of magnetisch aanvulmateriaal aanwezig is op een bepaalde diepte. In dit onderzoek is een absolute ondergrens vastgesteld (-300 ppm) voor de beoordeling van de magnetometermetingen. Het is de vraag of het hanteren van een dergelijke vaste ondergrens wenselijk is, aangezien dit boorfirma's zou kunnen stimuleren om te frauderen door extra magnetiet toe te passen. Wellicht is het beter om ook een maximumwaarde op te geven, of een bandbreedte (percentage verschil t.o.v. de hoogst gemeten waarde) waarbinnen de meting moet fluctueren. Een andere optie is om als onderdeel van grout certificatie het gehalte magnetiet te bepalen en hier een bandbreedte op te zetten. Dit vergt nader onderzoek, waarbij ook gekeken zou moeten worden of de magnetometer voldoende betrouwbaar is als instrument voor handhaving. Tevens is meer inzicht wenselijk in de relatie tussen het magnetische signaal en de k-waarde. Tot slot is een combinatie van magnetometer en gamma-gammameting mogelijk nauwkeuriger in staat om te beoordelen of er voldoende aanvulmateriaal aanwezig, wat een voorwaarde is om streng te handhaven op foutieve afdichtingen (Kennisleemte L).

Daarnaast is het de vraag wanneer verificatiemetingen moeten plaatsvinden: direct na aanleg is beter werkbaar en inpasbaar bij bouwproces. Maar wellicht is een meting na enkele maanden juist beter geschikt om ook uitzakking te controleren. In dit onderzoek vonden de magnetometermetingen per locatie vaak op 1 dag plaats, en veelal minimaal een dag na aanvulling van het boorgat. Het is de vraag of het magnetisch signaal in de loop van de tijd verandert. Dit dient te worden uitgezocht, voor een goede interpretatie van de meting en om een bandbreedte vast te stellen hoe lang na aanvullen controlemetingen mogen plaatsvinden (Kennisleemte J).

Tabel 5-3: Aanbevelingen voor beheersing van risico's die samenhangen met een bepaald type aanvulmethode

Aanvulmethode	Toegestaan volgens BRL2100 & BRL11000	Percentage afwijkingen volgens magnetometer	Aanbeveling beheersmaatregel
Laagsgewijs aanvullen met stortkoker	Ja	33% *	Voor aanvullen: Boorgatmeting (gamma) om kleilagen goed te identificeren [aanbeveling 1].
Laagsgewijs aanvullen zonder stortkoker	Nee	33%	Tijdens aanvullen: hoogte aanvulmateriaal controleren met magnetometer [aanbeveling 7]. Achteraf: frequente verificatiemeting door derden [aanbeveling 15].
Volledig aanvullen met getrokken vulleiding	Ja	11%	Tijdens aanvullen: aanvulhoogte controleren met magnetometer. Optreksnelheid vulleiding bij overige boringen hierop aanpassen [aanbeveling 8].
Volledig aanvullen met meerdere vaste vulleidingen	Ja	Geen metingen	Display (scherm) met daarop de diepte van het grout-front en de positie van de leiding [aanbeveling 8]. Onderzoek of het mogelijk is om na 1 ^e boring op locatie de overige boringen zonder magnetometer uit te voeren [Kennisleemte F]. Achteraf: periodieke verificatiemeting door derden [aanbeveling 15].
Volledig grouten met één vaste vulleiding	Ja	Relatief laag 1%	Toepassen verdringingspomp met voldoende opvoerhoogte [aanbeveling 9]. Achteraf: incidentele verificatiemeting door derden [aanbeveling 15].
Omgekeerd grouten	Nee	0%	Deze methode moet nader onderzocht en ontwikkeld worden voordat ze grootschalig kan worden toegepast [Kennisleemte D].

(*) 66% foutieve boorbeschrijving

5.5.2 Toepassing van magnetometer in de praktijk

In §5.2 en Tabel 5-3 is betoogd dat laagsgewijs aanvullen en volledig aanvullen met een opgetrokken vulleiding een grotere kans geven op foutieve afdichting. Geadviseerd wordt om bij risicovolle aanlegmethoden en risicovolle locaties (grindlagen) frequenter achteraf verificatiemetingen uit te laten voeren door een controlerende instelling (aanbeveling 15).

Tijdens de veldproeven zijn onregelmatigheden gecommuniceerd voorafgaand aan het verrichten van de magnetometer meting. Dit heeft geholpen bij de interpretatie van de meting. Het is dus belangrijk dat de boorfirma onregelmatigheden registreert en deelt met controlerende instanties zodat daar rekening mee kan worden gehouden bij de interpretatie van het magnetisch signaal (aanbeveling 18). Dergelijke registratie sluit ook goed aan bij een strategie van risico-gestuurd toezicht en handhaving (aanbeveling 20).

5.5.3 Handelingsperspectief als boorgat foutief is aangevuld

Een andere vraag is hoe om te gaan wanneer uit de verificatiemeting blijkt dat een boorgat niet goed is aangevuld (Kennisleemte P). Hiervoor zijn verschillende opties denkbaar:

- Uitboren: is duur en leidt tot verontreiniging van de ondergrond met PE snippers en grout (= nieuw probleem). Het levert wel een incentive voor boorfirma's om het goed te doen als je dit een keer meemaakt.
- Gele kaart voor boorder. 2^e gele kaart is erkenning inleveren.
- Boete: bijvoorbeeld ter hoogte van de kosten om boorgat uit te boren en opnieuw aan te vullen.

5.5.4 Doorontwikkelen van andere verificatie methoden

In dit kader verdient het ook aanbeveling om verder onderzoek te doen naar de DAS-VSP methode (Pauw en Obando 2022), omdat de gemeten golfsnelheid direct gerelateerd is aan de dichtheid van het materiaal. De volgende stap in dit onderzoek moet zich richten op het beter vaststellen van de verticale resolutie op veldschaal, het maximale dieptebereik en het effect van golfkoppeling wanneer de glasvezel in de bodemlus zelf wordt toegepast (eindsituatie in de praktijk), in plaats van in de aanvulling (zoals bij de experimenten) (Kennisleemte M).

5.6 Kwaliteitsbewaking

In het rapport van de Graaf et al (2021) zijn op basis van interviews (over de hele keten binnen en buiten de sector) en een workshop met de sector voorstellen gedaan hoe het systeem van kwaliteitsborging te verbeteren. Uit deze verkenning blijkt dat het mogelijk is om het toezicht en handhaving beter te organiseren. Na reflectie op de uitkomsten van de interviews en deskundigenbijeenkomst is een pakket aanbevelingen opgesteld dat is samengevat navolgende paragrafen. Hierbij ligt de nadruk op maatregelen die in dit onderzoek als effectief en uitvoerbaar zijn beoordeeld.

De keuze welke aanbevelingen te implementeren is mede een politieke keuze. Ze hangt namelijk samen met welk risiconiveau aanvaardbaar is. Welke werkwijzen er zijn om boorgaten goed aan te vullen en daarmee hoeveel extra een bodemenergiesysteem mag kosten om dit risiconiveau te bereiken.

Daarnaast mogen de voorgeschreven werkwijzen niet ter discussie staan. Dit onderzoek laat zien dat binnen de branche terecht vraagtekens werden gesteld bij de voorschriften, aangezien geen van de voorgeschreven werkwijzen in dit onderzoek 100% waterdicht bleek. Het is discutabel om boorfirma's aan te spreken op afwijkingen op het moment dat de boorfirma afwijkingen bewust maakt omdat ze er van overtuigd zijn dat de door hen gevolgde werkwijze tot een betere afdichting leidt dan de voorgeschreven werkwijze. Onderstaande aanbevelingen gaan er dan ook vanuit dat de te hanteren werkwijzen niet meer ter discussie staan.

5.6.1 *Whereabouts verplichting vereenvoudigen*

Het is voor handhavers/ certificeerders belangrijk om te weten waar ze naar toe moeten om een boorfirma te controleren. Dit kan op verschillende manieren (aanbeveling 19).

Op dit moment hanteert elke omgevingsdienst een eigen systeem waarbij boorfirma's werkzaamheden vooraf moeten aanmelden zodat ze toezicht kunnen inplannen. De vereiste aanmeldtermijn van soms 5 dagen is praktisch lastig voor de boorfirma's omdat de werkplanning sterk kan wisselen. Een oplossing hiervoor is om alle boringen vooraf aan te melden via een centrale website welke ook toegankelijke is voor IL&T en de certificerende instellingen. Een wens van de boorfirma's is meer flexibiliteit te krijgen om tot kort voor de uitvoering nog wijzigingen aan te brengen in hun planning. Dit systeem kan goed ook gekoppeld worden met GPS-trackers op de boorwagens.

Boorfirma's geven aan dat ze bereid zijn om de locatie van boorwagens te laten delen met CI's, OD's en IL&T via een GPS-tracker. Dit leidt niet tot extra kosten omdat de tracker al verplicht wordt door de verzekeraars. Dit leidt tot een vergelijkbare werkwijze als bij transport van puin (BRL 2506).

Het centrale meldingssysteem en de GPS-trackers zouden moeten gelden voor alle mechanische boringen, dus niet alleen voor boringen voor gesloten bodemenergiesystemen. Handhaving kan dan deels op afstand gebeuren door de locatie van boorwagens (GPS-trackers) te vergelijken met aangemelde werkzaamheden. Er dient dan wel actief gemonitord of er boorwagens actief zijn zonder GPS-tracker. En er moet ook een forse sanctie komen op boren zonder GPS-tracker. Op deze manier kunnen IL&T en omgevingsdiensten veel actiever monitoren op bedrijven die werkzaamheden niet melden en buiten de regels werken.

Wel dient goed gekeken worden naar privacy. Dit speelt vooral bij kleine boorfirma's, omdat de GPS-locatie dan makkelijker aan een specifieke persoon is te koppelen.

5.6.2 *Centrale en uniforme registratie van bedrijfsspecifieke afwijkingen*

Omgevingsdiensten, IL&T en certificerende instellingen voeren ieder afzonderlijk veldcontroles uit. Maar de geconstateerde afwijkingen worden niet centraal bijgehouden. Hierdoor is niet duidelijk hoe frequent bij elke boorfirma afwijkingen worden geconstateerd. Mogelijk kan hiervoor een bestaande webapplicatie voor uitwisseling van toezichtresultaten (Inspectieview) worden gebruikt. Dit systeem kent nog geen format voor uitwisseling van resultaten van toezicht op boren voor bodemenergiesystemen. Dit kan echter vrij eenvoudig ontwikkeld worden (aanbeveling 18). Wel moet worden nagedacht hoe complexere informatie zoals verificatiemetingen op te slaan en uit te wisselen (Kennisleemte N)

Momenteel gebruiken CI's, IL&T en OD's verschillende eigen checklijsten. Dit leidt tot verschillen tussen regio's (naast verschillen in intensiteit van het toezicht). Een voorwaarde voor centrale registratie van overtredingen is dat alle instanties dezelfde uniforme controlelijsten hanteren. De verwachting is dat door de controlelijsten te vergemakkelijken (bijvoorbeeld minder controlepunten) de beoordelingen minder subjectief worden. Een voldoende kennisniveau van de betrokken inspecteurs blijft noodzakelijk. In de uniforme controlelijsten kunnen ook de sancties bij afwijking van de voorschriften worden omschreven. Dit leidt tot uniformering van het sanctiebeleid.

5.6.3 *Informatie-gestuurde intensiteit van toezicht*

De intensiteit en inrichting van het toezicht verschilt per gemeente/omgevingsdienst. Geadviseerd wordt om hier meer één lijn in te trekken. Hiervoor kan landelijk een gezamenlijke risicogerichte toezichtstrategie worden gevolgd. Bedrijven waar vaak overtredingen worden geconstateerd (evt. in verhouding tot het jaarlijks aantal uitgevoerde boringen) worden dan frequenter bezocht (aanbeveling 20).

5.6.4 *Verzwaren van sancties*

Op dit moment zijn de consequenties voor het niet naleven van voorschriften voor zover bekend beperkt tot enkele boetes en een aantal last onder dwangsom. Door afwijkingen structureel in beeld te brengen via centrale registratie kunnen de sancties ook verzaamd worden. Bijvoorbeeld door het aantekenen van het bedrijf (conform ISZW sancties voor asbestverwijderaars), of zelfs het intrekken van de certificaten wanneer op voortschrijdende jaarbasis bij meer dan bijvoorbeeld 10% van de boringen afwijkingen zijn geconstateerd.

Nadeel van een dergelijk systeem is dat bedrijven snel een nieuwe BV kunnen starten na intrekking van het certificaat. Alternatief is dan ook om niet alleen het bedrijf maar ook de eigenaar of boormeester te registreren. Deze optie vergt nadere uitwerking, want er is in het huidige stelsel geen sprake van persoonsregistratie van boormeesters.

Een andere mogelijkheid om de intensiteit van het toezicht te verhogen bij geconstateerde afwijkingen is dat na iedere door IL&T/OD geconstateerde afwijking een verplichte onaangekondigde audit volgt door de certificerende instantie (aanbeveling 21).

5.6.5 *Periodiek rouleren van CI*

Het feit dat de certificaathouder zelf een CI inhuurt en betaalt is een belangrijke perverse prikkel die strenge handhaving door CI's in de praktijk lijkt te voorkomen. Periodiek rouleren van CI (bijvoorbeeld iedere 4 jaar) door certificaathouders zou dit kunnen ondervangen (aanbeveling 22).

5.6.6 *Verankering van aanbevelingen in BRL's*

De technische en organisatorische aanbevelingen uit voorgaande paragrafen zullen alleen worden uitgevoerd en effectief zijn wanneer ze voor alle boorfirma's gelden. Dit is belangrijk om voor een level playing field te zorgen. Dit kan het beste worden gewaarborgd door verankering in de BRL 2100 en 11000 (aanbeveling 23).

5.7 **Rolverdeling bij kwaliteitsbewaking**

Zolang er geen goede techniek beschikbaar is om achteraf te kunnen vaststellen of het boorgat goed is afgedicht blijven veldcontroles cruciaal bij het toezicht op het aanvullen van boorgaten voor GBES. Op dit moment voeren omgevingsdiensten, IL&T en certificerende instellingen ieder afzonderlijk veldcontroles uit. Deze aanpak met zelfregulering door de markt naast overheidstoezicht is in lijn met aanbevelingen uit de Beleidsbeoordeling Kwalibo (Witteveen en Bos 2020) en het Kabinetsstandpunt Certificatie en accreditatie in het kader van het overheidsbeleid (EZ 2016).

Maar bij audits door de certificerende instellingen ligt de focus op de implementatie van het kwaliteitssysteem van het boorbedrijf en is vaak geen tijd beschikbaar voor controle of er ook daadwerkelijk volgens protocol wordt gewerkt. Met signalen over overtredingen kunnen CI's binnen de beperkte randvoorwaarden van beschikbare tijd eigenlijk onvoldoende optreden, met als resultaat dat de aangekondigde audits van de CI's onvoldoende bijdragen aan een verhoogde (perceptie van) de pakkans bij onjuist afdichten en waarborging van de kwaliteit. CI's en overheden wisselen hun bevindingen van veldcontroles momenteel bovendien onvoldoende uit, waardoor er geen eenduidig beeld bestaat van welke bedrijven zich minder goed aan de regels houden en extra toezicht behoeven. Voor de verdere uitwerking van de rolverdeling van toezicht zijn hieronder als gedachte experiment drie uitersten geschetst. Geadviseerd wordt om nader onderzoek te doen naar de effectiviteit en haalbaarheid hiervan (zie Kennisleemte O).

Optie 1: Veldcontroles door Certificerende Instellingen

Een eerste optie is om het toezicht hoofdzakelijk neer te leggen bij de certificerende instellingen. Dit is bijvoorbeeld de situatie bij asbestsaneringen. Dit betekent een sterke verhoging van het aantal onaangekondigde veldcontroles

door CI's. Om de effectiviteit daarvan zo hoog mogelijk te maken kunnen de certificerende instellingen de bevoegdheid krijgen om boetes uit te delen. Om de afhankelijkheid van de CI van het boorbedrijf (het boorbedrijf betaalt de CI voor de certificering) te doorbreken kunnen boorfirma's verplicht worden om periodiek van CI te wisselen. De overheid richt zich dan vooral op het opsporen van boorfirma's die illegaal boren (dus zonder GPS-tracker / vooraanmelding). IL&T houdt toezicht op de kwaliteit van de Certificerende Instellingen door steekproefsgewijs ook controles uit te voeren. Wanneer uit steekproef controles van IL&T blijkt dat gecertificeerde boorfirma's zich niet aan de regels houden, dan moet dit ook consequenties hebben voor de certificerende instelling.

Een voordeel van deze optie is dat het toezicht in het hele land gelijk wordt. Wel zal het voor de boorfirma's tot hogere kosten leiden voor certificering, en daarmee kosten verhogend werken voor GBES.

Optie 2: Veldcontroles door de overheid

Een tweede optie is om veldcontroles te laten uitvoeren door de overheid. De veldaudits door certificerende instellingen komen dan te vervallen. Certificerende instellingen krijgen wel de conclusies van alle veldcontroles aangereikt van de controlerende overheid en krijgen de mogelijkheid om certificaten in te trekken wanneer bij een boorfirma een bepaald aantal (ernstige) tekortkomingen zijn geconstateerd.

Voorwaarde is dat de overheid voldoende budget beschikbaar stelt voor capaciteit en scholing van de toezichthouders.

Optie 3: Grotere rol voor eindgebruiker

Een derde optie is om de eindgebruiker en financiers een grotere rol te geven. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door eindgebruikers meer mogelijkheden te geven om geld terug te vragen via een boeteclausule wanneer een GBES systeem niet goed is aangelegd via protocol of aantoonbaar niet voldoet aan de in het ontwerp voorgespiegelde prestaties (inclusief milieuprestaties in de vorm van een aantoonbaar goede afdichting van scheidende lagen). Voor veel financiële instellingen wordt het voorkomen van klimaat- en milieuschade een steeds belangrijker onderdeel van hun *due diligence*, dus financiers krijgen ook een directer belang om rapportages te controleren. Van eindgebruikers kan niet verwacht worden dat ze zelf controles gaan uitvoeren. Maar er kan wel worden vereist dat er een rapportage wordt aangeleverd waarmee de boorfirma aantoont dat hij voldoet aan de eisen van BRL 2100 en BRL 11000. Ze kunnen dit dan laten controleren door een deskundige derde partij die rapportages inhoudelijk kan beoordelen. De rapportage en verantwoording zal daarmee een stuk minder vrijblijvend worden dan momenteel het geval is.

6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

6.1 Aanleiding en doel

De toepassing van gesloten bodemenergiesystemen (GBES) neemt de komende decennia naar verwachting sterk toe, van ruim 50.000 systemen in 2022, naar mogelijk meer dan een miljoen in 2050. Bij de aanleg van GBES worden slecht doorlatende lagen in de bodem doorboord. De scheidende werking van deze lagen moet tijdens het aanvullen van het boorgat weer worden hersteld om risico's voor de grondwaterkwaliteit te voorkomen. Echter, het aanvullen van de diepe boorgaten (>100m) met een relatief kleine diameter (<200 mm) is foutgevoelig en lastig achteraf te controleren met bestaande technieken. Uit onderzoek van de Inspectie voor Leefomgeving en Transport is gebleken dat regelmatig wordt afgeweken van voorschriften omdat ze niet goed werkbaar zijn, kostenverhogend werken, of omdat er discussie is over hun effectiviteit. Dit levert risico's op voor verslechtering van de waterkwaliteit van de steeds schaarsere schone grondwaterreserves. De bodemenergie- en drinkwatersector hebben daarom de handen ineengeslagen om samen te verkennen hoe de huidige praktijk te verbeteren.

Het doel van dit onderzoek is het evalueren van in Nederland toegepaste methoden om de scheidende lagen in de bodem te herstellen bij de realisatie van gesloten bodemenergiesystemen. Op basis van deze evaluatie zijn mogelijkheden verkend om het aanvullen van boorgaten te verbeteren (werkpakket 1), de kwaliteit van aanvullingen in-situ te detecteren (werkpakket 2) en het systeem van kwaliteitsbewaking te versterken (werkpakket 3). Ook zijn kennisleemtes in beeld gebracht.

6.2 Aanpak op hoofdlijnen

Voor het identificeren van meetmethoden om de kwaliteit van de afdichtende werking van het aanvulmateriaal in-situ te bepalen (werkpakket 2) is een literatuurstudie uitgevoerd naar potentiële en mogelijk toekomstig commercieel beschikbare technieken (zie Pauw 2022a en §2.6). Hieruit kwam de magnetometer als beste optie naar voren, mede omdat de sonde al commercieel beschikbaar is, maar nog niet uitontwikkeld voor toepassing in GBES. In labexperimenten is bepaald welke meetwaarde minimaal verwacht mag worden bij toepassing van voor de magnetometer detecteerbaar aanvulmateriaal (zie §3.2). Deze waarden zijn vervolgens als referentie gebruikt voor metingen bij veldproeven (zie § 3.4). Verder zijn proeven uitgevoerd naar methoden om de kwaliteit van grout in-situ te beoordelen middels Vertical Seismic Profile (VSP), waarbij een akoestische glasvezel (DAS; Distributed Acoustic Sensing) wordt ingebouwd in het boorgat en fungeert als in-situ sensor om de integriteit van het aanvulmateriaal te bepalen (Pauw & Obando 2022).

Om te bepalen wat de range aan scheidende werking is van de skinlaag die in een boorgat ontstaat tijdens boren, zijn in het lab kolomproeven uitgevoerd (werkpakket 2). Tevens zijn veldproeven uitgevoerd waarbij verschillende aanvulmaterialen zijn toegepast in 6 geperforeerde buizen in ondiepe boorgaten met een einddiepte van 7 m. Hierbij is zowel grout getest als Hergebruikt Opgeboord Materiaal (HOM), wat bestaat uit opgeboord sediment vermengd met bentoniet. Deze buizen zijn vervolgens opgetrokken en getest op dichtheid, korrelverdeling en permeabiliteit om inzicht te krijgen in hoe reologische eigenschappen van het toegepaste grout en HOM veranderen na aanbrengen op diepte in een boorgat. Tot slot zijn boorgatmetingen en magnetometermetingen uitgevoerd in enkele boringen op praktijkschaal om voor verschillende aanvulmethoden te testen en te vergelijken of het aanvulmateriaal op de juiste diepte was aangebracht.

Voor de evaluatie van het systeem van kwaliteitsbewaking en handhaving (werkpakket 3) is een literatuurstudie uitgevoerd en zijn interviews en een workshop gehouden met medewerkers van boorfirma's, drinkwaterbedrijven, adviesbureaus, certificerende instellingen en bevoegd gezag. Dit onderdeel is beschreven in de Graaf et al (2021).

6.3 Conclusies

6.3.1 Boortechniek en additieven

Wanneer er veel werkwaterverlies optreedt uit een boorgat is er een kans dat er tijdens (en na) het aanvullen ook aanvulmateriaal de formatie in stroomt. Dit risico speelt met name bij toepassing van grout en HOM. Uit de labexperimenten blijkt dat de in Nederland toegepaste reguliere boorspoeling (bentoniet met een beperkte concentratie polymeren) niet afdoende in staat is om uitgewassen grindpakketten afdoende af te sluiten. Om de verliezen te beperken zouden in dergelijke pakketten eigenlijk andere booradditieven moeten worden toegepast, zogenaamde Lost-Circulation Materials om de grove formaties te pluggen. Om werkwaterverlies te beperken zou het sowieso helpen om ook in niet-grindige pakketten met een zwaardere boorspoeling te werken. Dit is ook makkelijk te controleren door een boorploeg en handhaver.

6.3.2 Aanvulmethoden

In Nederland worden verschillende aanvulmethoden toegepast:

- Bij laagsgewijs aanvullen wordt ter hoogte van kleilagen slecht doorlatend materiaal aangebracht (zwekllei) en de rest van het boorgat aangevuld met grind. Een voorwaarde hierbij is dat de boorploeg de diepte van scheidende lagen tijdens of na het boorproces detecteert.
- Volledig aanvullen omvat het opvullen van het boorgat met een grout (cement-, bentoniet gebaseerd). Dit kan met een vulleiding die op de bodem staat en achterblijft in het boorgat (vaste vulleiding) of met een opgetrokken vulleiding.
- Een alternatief voor grout is om het opgeboorde materiaal te mengen met bentoniet om de doorlatendheid te verlagen en vervolgens te gebruiken om het boorgat aan te vullen. Deze methode is aangeduid als Hergebruik Opgeboord Materiaal (HOM).
- In het kader van dit onderzoek zijn ook proeven gedaan met "omgekeerd grouten". Bij deze techniek wordt het grout in de annulaire ruimte tussen de vulleiding en boorgatwand gepompt waardoor het grout onder invloed van de grotere dichtheid (zwaartekracht) naar beneden stroomt en via de vulleiding ook weer naar boven uitkomt.

Uit evaluatie van het gemiddelde magnetisch signaal bleek dat bij **laagsgewijs aanvullen 33%** van de scheidende lagen niet of niet op de juiste hoogte was afgedicht (n=33, verdeeld over 7 boringen). Hierbij was opvallend dat werken met stortkoker geen duidelijk beter resultaat oplevert, omdat de BRL 2100 juist voorschrijft om met een stortkoker te werken omdat dit nauwkeuriger zou zijn. Bovendien werd **66%** van de kleilagen **niet of op een verkeerde diepte beschreven** door de boorploeg (n=12). De kans op slecht aangevulde boorgaten lijkt dan ook zeer groot bij deze techniek.

In de boorgaten met **getrokken vulleiding** was bij **11%** van de afsluitende lagen (n=36, verdeeld over 10 boringen) het magnetisch signaal lager dan de vooraf gestelde grenswaarde wat een sterke aanwijzing is dat deze lagen onvoldoende zijn afgedicht. Een deel van de foutieve afdichtingen is gevonden op dieptes waar de boorfirma incidenten meldde tijdens het aanvullen zoals een vastzittende vulleiding. Bovendien blijkt het in de praktijk lastig om de vulleiding continue onder het aanvulniveau van het grout te houden (=eis BRL 2100). Dit komt doordat het volume ingebracht grout sterk afwijkt (10% tot 130%) van het theoretische volume van het boorgat op basis van boordiameter en einddiepte. De afwijkingen kunnen ook binnen één locatie sterk uiteenlopen.

Bij de **vaste vulleiding** was **5%** ($n=79$) van de afsluitende lagen foutief aangevuld (op basis van het magnetisch signaal) en 1% van de totale boorlengte.

Bij **omgekeerd grouten** bleken **100%** van de scheidende lagen correct aangevuld, maar was de steekproef ($n=4$) erg klein doordat de methode maar in 2 boringen was toegepast. Nadeel van deze techniek is dat het grout stopt met stromen als de dichtheid in de annulaire ruimte en vulleiding bijna gelijk zijn. Er kan daarom niet worden doorgegaan met aanvullen totdat het materiaal dat via de vulleiding naar buiten treedt dezelfde dichtheid heeft als het ingaande grout.

Al met al lijken de risico's op foutieve afdichtingen het grootst bij laagsgewijs afdichten, gevolgd door het werk met een getrokken vulleiding en als laatste de vaste vulleiding. Het omgekeerd grouten lijkt kansrijk, maar er dient nog wel een oplossing te worden gevonden voor de lagere dichtheid van het uittredende grout (bijvoorbeeld aanzuigen, of extra verificatiemetingen).

6.3.3 Aanvulmateriaal

Vier van de vijf monsters van aanvulmateriaal afkomstig uit de veldproeven, voldeden niet aan de eis van de BRL2100 dat de doorlatendheid van aanvulmateriaal maximaal 10^{-9} m/s mag bedragen. Dit komt mede doordat het aanvulmateriaal alleen is getest onder ideale omstandigheden in een laboratorium. Daarnaast zijn er geen eisen aan de reologische eigenschappen van het aanvulmateriaal, zoals gelsterkte of uitharding. Dit geldt zowel voor een deel van de geteste grouten als het aanvulmateriaal HOM. Bijkomend nadeel van HOM is dat de samenstelling per locatie kan verschillen, afhankelijk van de bodemgesteldheid waardoor een voldoende (en liefst continue) kwaliteit moeilijker is te garanderen.

6.3.4 Verificatiemethoden

De magnetometer blijkt praktisch goed werkbaar in het veld. De techniek werkt echter alleen met aanvulmateriaal dat magnetiet bevat. Een nadeel is dat slechts een deel van de commercieel beschikbare aanvulmaterialen magnetiet bevat. Uit de lab- en veldproeven met de magnetometer bleek dat de metingen een hoge resolutie hebben over de diepte van het boorgat. Omdat het meetbereik beperkt is tot enkele centimeters vanaf de sonde, zijn de metingen sterk gevoelig voor o.a. de positie van de sensor in de bodemlus en de positie van de bodemlus(sen) in het boorgat. Omdat deze posities in de praktijk niet bekend zijn en variëren over de diepte, is de kwaliteit van het aanbrengen van aanvulmateriaal beoordeeld door te bepalen of de minimale meetwaarde niet wordt onderschreden. Deze minimale waarde was bepaald op basis van lab proeven waarbij de lussen op verschillende posities in het boorgat stonden en de sonde zowel gecentreerd als aan de rand van de lus werd ingebracht.

Een belangrijk kenmerk van de magnetometer (en andere beschouwde meetmethoden) is dat de gemeten grootheid geen directe unieke relatie met de scheidende werking van het aanvulmateriaal heeft. De gemeten grootheid kan wel een indicatie geven van de aan- of afwezigheid van aanvulmateriaal, en daarmee als 'diagnose instrument' fungeren. In een vervolgonderzoek zal nader aandacht moeten worden besteed aan empirische relaties om de gemeten grootheid te relateren aan de scheidende werking van het aangebrachte materiaal.

Met het DAS-VSP onderzoek is tot op zekere hoogte een proof-of-concept aangetoond. Aan de hand van het verschil in golfsnelheid kan het grout worden onderscheiden van zand. De glasvezel kan echter niet binnen de bodemlus worden getest, alleen direct in de omstorting, wat dus een forse meerprijs betekent omdat voor elk boorgat dan een glasvezel kabel moet worden geïnstalleerd als deze methode moet worden toegepast.

6.4 Aanbevelingen: uitvoervaar op korte termijn

Tabel 6-1 geeft een overzicht van alle aanbevelingen die in dit rapport zijn gedaan.

Tabel 6-1. Overzicht van de aanbevelingen en motivatie

Nr.	Aanbeveling	Motivatie	Wie
Boorteknik en additieven			
1	Gebruik een gammasonde om scheidende lagen te identificeren bij laagsgewijs aanvullen.	Het blijkt zeer moeilijk om lagen op de juiste diepte te detecteren. Hierdoor bestaat de kans dat afdichtingen op de verkeerde diepte worden aangebracht. Met de gamma meting kan de diepteligging van scheidende lagen goed worden bepaald.	Boorfirma's
2	Gebruik een grotere diameter boorkop (bijvoorbeeld 300 mm) bij laagsgewijs aanvullen.	Zorgen dat er voldoende werkruimte is voor storkoker en peillood om kleiafdichtingen op juiste diepte te plaatsen.	Boorfirma's
3	Zorg voor een beperking van het werkwatervlies (bijvoorbeeld maximaal 1 m ³ /uur) alvorens te starten met grouten.	Beperk verlies van aanvulmateriaal, met name bij boorgaten die volledig worden aangevuld. Bijvoorbeeld door toepassing van een zwaardere synthetische polymeerspoeling in gebieden met grindlagen. Een verlies van 1 m ³ /uur lijkt nog net detecteerbaar gezien de korte wachttijd tussen boren en aanvullen.	Boorfirma's
4	Gebruik een zwaardere boorspoeling (ten minste 25 kg/m ³ additieven).	Betere afdichting en verslechtering van hydraulische verbinding tussen boorgat en formatie. Beperk verlies van aanvulmateriaal aan formatie.	Boorfirma's
Aanvulmethode			
5	Pas alleen colloïdaalmengers toe.	In-line mengers mengen vaak minder lang en resulteren in een korte contacttijd waarbinnen het grout moet hydrateren en mengen.	Boorfirma's
6	Pas magnetisch detecteerbaar aanvulmateriaal toe.	Mogelijk maken om achteraf te controleren of boorgaten over hele diepte aanvulmateriaal bevatten. Materiaal moet of aantoonbaar detecteerbaar zijn volgens specificaties van leverancier en anders ten minste 2% magnetiet bevatten met deeltjes zodanig fijn dat ze niet uitzakken.	Boorfirma's
7	Bij laagsgewijs aanvullen met storkoker: controleer de hoogte van het aanvulmateriaal tijdens het aanvullen met een magnetometer.	Reductie van kans op aanbrengen van zwelklei op een verkeerde diepte.	Boorfirma's
8	Bij volledig aanvullen met getrokken vulleiding & meerdere vaste vulleidingen: Controleer de hoogte van het aanvulmateriaal tijdens het aanvullen met een magnetometer. Zorg dat de boormeester een display heeft met de aanvulhoogte en onderkant van de aanvulslang.	Voorkomen dat aanvulslang te ver omhoog wordt getrokken (foute aanvulling) of te diep (kans dat ie blijft steken). Bij volledig aanvullen met één vaste vulleiding leveren controlemetingen de boorploeg geen extra handelingsperspectief op tijdens aanvullen. Het alleen hanteren van een grotere afstand tussen aanvulniveau en onderkant vulleiding volstaat niet vanwege onzekerheid over verlies van grout aan formatie en risico op vastzitten van leiding.	Boorfirma's
9	Bij volledig aanvullen met een vaste vulleiding: gebruik een verdringingspomp met voldoende opvoerhoogte om de gehele groutkolom vanaf de bodem van het boorgat naar maaiveld te verplaatsen.	Bij verdringingspompen is het debiet constant, ook bij hoge tegendruk, waardoor de boorploeg niet steeds langer hoeft te wachten totdat aanvulmateriaal met de juiste dichtheid uit het boorgat stroomt.	Boorfirma's
10	Bij volledig aanvullen: Formuleer een minimale dichtheid die het	Voorkom dat boorploegen eigenstandig beslissingen gaan maken wanneer te stoppen met grouten als de dichtheid langere periode te laag blijft.	Boorfirma's

Nr.	Aanbeveling	Motivatie	Wie
	uitgaande materiaal mag hebben t.o.v. het ingaande aanvulmateriaal.		
11	Faciliteer bemonstering van de dichtheid van aanvulmateriaal (=stopcriterium aanvullen) en aanvulling van grout vanaf maaiveld bij nazakking. Bijvoorbeeld met een mantelbuis en aftapkraan.	Het bemonsteren van grout is nodig om de dichtheid van uitkomend materiaal te vergelijken met ingaand materiaal. Dit kan met een mantelbuis met bemonsteringskraan of door het leegpompen van de spoelvijver. Door deze constructie enige dagen na aanleg gevuld te houden met grout kan nazakking bovenin het boorgat de worden opgevangen.	Boorfirma's
12	Stop met aanvullen wanneer er veel meer (bijv. 3x zoveel) aanvulmateriaal wordt ingebracht dan verwacht op basis van het theoretische volume van het boorgat, totdat het grout is uitgehard en de diepte gepeild.	Dit kan een teken zijn dat er bijvoorbeeld grote verliezen optreden naar de formatie. De boorfirma moet daarom wachten tot uitharding van het grout, daarna peilen en vervolgens verder gaan met afdichten. Eventueel gebruik makend van een andere boorspoeling of grout die geschikt is voor grover formatiemateriaal. Andere oorzaken zijn bijvoorbeeld foutieve mengverhouding, meetfouten of uitspoeling van het boorgat.	Boorfirma's
Aanvulmateriaal			
13	Pas alleen aanvulmateriaal toe waarvan op productbladen vermeld is wat de reologische eigenschappen zijn en voor welk type formatiemateriaal (mediane korrelgrootte) het product geschikt is.	Naast de eisen die BRL2100 stelt aan permeabiliteit zijn meer eigenschappen belangrijk om bijvoorbeeld ontmenging te voorkomen. Idealiter zouden er direct eisen gesteld worden aan de reologische parameters zoals viscositeit, vochtverlies en gelstrength, maar dit vergt nog extra onderzoek. Door eigenschappen van bestaande materialen in beeld te brengen komt beter in beeld wat de kwaliteit is van grouten die momenteel worden toegepast. Aan de hand van productbladen kunnen boorfirma's betere afwegingen maken welke aanvulmaterialen het beste aansluiten bij hun werkwijze en bodemopbouw.	Boorfirma's
14	Maak een eenvoudige beslisboom voor boorploegen wanneer ze moeten overstappen op ander aanvulmateriaal en boorspoeling.	Ondersteunen van boorploeg welke materialen te gebruiken wanneer condities in het veld afwijken van gebruikelijke condities (aanboren grindlagen, groot werkwatervlies).	Leveranciers
Verificatiemetingen			
15	Laat toezichthouders en/ of certificerende instellingen periodiek boorgaten nameten met een magnetometer. Bij laagsgewijs aangevulde boorgaten is een extra nameting met een gamma-sonde wenselijk om te controleren of alle kleilagen zijn gedetecteerd.	Risico-gestuurde controlemetingen.	ILT, OD, CI
Kwaliteitsbewaking			
16	Zorg voor adequate training zodat boormeesters voldoende achtergrondinfo en tools hebben om technieken goed toe te passen.	Met name kennis over het identificeren van scheidende lagen. Maar ook boorgatmetingen wanneer deze techniek wordt ingezet.	Boorfirma's, branche-vereniging
17	Laat boormeesters voor hun certificering kleilagen identificeren	De huidige wijze van toetsen komt niet overeen met de condities die boormeesters in de praktijk tegenkomen.	CI

Nr.	Aanbeveling	Motivatie	Wie
	in boringen van 200 m diep i.p.v. 20 m diep.		
18	Centrale en uniforme registratie van afwijkingen.	Laat boorfirma's incidenten die optreden tijdens het bereiden van het aanvulmateriaal en het aanvullen registreren. Dit zorgt er voor dat incidenten achteraf vergeleken kunnen worden met controlemetingen met de magnetometer, waardoor minder discussie ontstaat over mogelijke oorzaken bij te laag signaal magnetometer. Momenteel gebruiken CI's, IL&T en OD's verschillende eigen checklijsten. Dit leidt tot verschillen tussen regio's (naast verschillen in intensiteit van het toezicht). Een voorwaarde voor centrale registratie van overtredingen is dat alle instanties dezelfde uniforme controlelijsten hanteren. Bijdragen aan continue verbeterproces door bodemenergiesector en op feiten gebaseerde wet- en regelgeving door bevoegd gezag.	ILT, CI, OD
19	Whereabouts verplichting voor boorstellingen vereenvoudigen (GPS-tracker).	Het afmeldsysteem en een wachttermijn zijn momenteel nodig zodat een inspecteur namens het bevoegd gezag of Certificerende Instelling een controlemeting kan uitvoeren. Door in kaart te brengen waar boorfirma's onder certificering werken kunnen Omgevingsdiensten snel checken wanneer ze een boorwagen in het veld zien of de boring is aangemeld en de boorploeg op papier in orde is. Door dit proces te stroomlijnen voorkomt dat boorfirma's per omgevingsdienst een aparte aanmeldprocedure moeten volgen. Dit levert meer flexibiliteit voor boorfirma's in planning, omdat hun locatie altijd herleidbaar is voor omgevingsdienst en melding van uitvoeringslocatie niet op dag nauwkeurig hoeft.	ILT
20	Informatie-gestuurde intensiteit van toezicht.	De frequentie van controlemetingen kan worden afgestemd op de faalkansen van de aanvulmethode en historische prestaties van de boorfirma.	ILT, OD, CI
21	Verzwaren van sancties.	Een andere mogelijkheid om de intensiteit van het toezicht te verhogen bij geconstateerde afwijkingen is dat na iedere door IL&T/OD geconstateerde afwijking een verplichte onaangekondigde audit volgt door de certificerende instantie. Op dit moment zijn de consequenties voor het niet naleven van voorschriften voor zover bekend beperkt tot enkele boetes/ last onder dwangsom. Dit schrikt overtreders onvoldoende af.	ILT
22	Periodiek rouleren van certificerende instelling, bijvoorbeeld elke 3 jaar.	Het feit dat de certificaathouder zelf een CI inhuurt en betaalt is een belangrijke perverse prikkel die strenge handhaving door CI's in de praktijk lijkt te voorkomen.	Boorfirma, CI
23	Neem bovenstaande aanbevelingen op in BRL 2100 en/ of BRL 11000.	Zodat alle boorfirma's er verplicht naar moeten handelen. Probeer hierbij de regels voor de boormeester zo eenvoudig mogelijk te houden!	SIKB

6.5 Kennisleemten: onderzoeksvragen voor verbetering op lange termijn

Deze paragraaf geeft een overzicht van alle in de loop van het onderzoek benoemde kennisleemten. Dit is een lange lijst. We willen deze graag samen met de projectpartners bespreken, om te bepalen welke vragen prioriteit hebben om het herstel van boorgaten te faciliteren. De lijst met kennisleemtes moet dus nog ingekort en geprioriteerd.

Boortechiek en additieven

- Kennisleemte A: Inzicht in de kwaliteit van boorbeschrijvingen.
Vergelijken van boorbeschrijvingen op basis van bemonstering van opgeboord materiaal met boorgatmetingen.
- Kennisleemte B: Algoritme voor automatische interpretatie van gamma metingen.
Dit zou de foutgevoeligheid van boorbeschrijvingen een stuk verlagen indien boorploegen zelfstandig gammametingen kunnen uitvoeren en een indicatieve beschrijving opstellen.
Zal echter altijd tot hogere kosten leiden.
- Kennisleemte C: Vergroten verstoppingspotentie en diepbed filtratie van boorspoeling.
Voor GBES is het wenselijk dat het boorgat zo goed mogelijk wordt afgepleisterd. Dit kan door gebruik te maken van een zware boorspoeling die een filtercake vormt op de boorgatwand. Maar wellicht is het ook wenselijk om te zorgen dat boorspoeling in de formatie penetreert zodat skin intact blijft bij inbouwen van lussen en toedienen grout.

Aanvulmethoden

- Kennisleemte D: Omgekeerd grouten.
Gedurende het onderzoek zijn veldproeven gedaan met een methode die bekend staat als “Omgekeerd grouten”. Bij deze methode wordt het grout vanaf maaiveld aangebracht in de annulaire ruimte tussen de vulleiding en boorgatwand, zodat het materiaal vervolgens onder invloed van de grotere dichtheid (zwaartekracht) naar beneden stroomt/valt waardoor de boorspoeling uit het boorgat wordt weggedrukt. De eerste resultaten waren succesvol (goed magnetisch signaal met diepte) maar het vergt nog nader onderzoek om de methode verder te ontwikkelen; bijvoorbeeld hoe te zorgen dat het grout langer blijft doorstromen totdat de dichtheid van het uittredende materiaal gelijk is aan dat van de ingaande grout.
- Kennisleemte E: Effect aanvulleiding op bodem.
Wat is lange termijn effect van aanvulleiding in de bodem laten. Leiding is vaak van goedkoop plastic. Kan dit uitlogen?
- Kennisleemte F: Hoogte aanvuilslang bepalen op basis van theoretische volume boorgat.
Wellicht dat het op locaties met meerdere boringen en met weinig ruimtelijke variatie in bodemopbouw volstaat om de aanvuilsnelheid te bepalen op basis van de verhouding tussen ingebracht materiaal en theoretisch volume van het boorgat. (NB: eerste boring moet wel met magnetometer) .
- Kennisleemte G: De metingen geven aanleiding om te overwegen het laagsgewijs aanvullen wel wenselijk is. Dit geldt in mindere mate ook voor het aanvullen met een getrokken vulleiding of meerdere vulleidingen.

Aanvulmateriaal

- Kennisleemte H: Reologische eisen en testprotocol voor grout (en HOM).
Daarnaast moet meer inzicht komen in welke grout (en HOM) mengsels geschikt zijn om boorgaten goed aan te vullen. Hiervoor is het noodzakelijk om een goed testprotocol te hebben voor reologische eisen en meetmethoden. Daarnaast moet duidelijk zijn welke reologische eigenschappen een grout idealiter heeft. Om dit goed te testen is het wenselijk om extra verificatiemetingen uit te voeren, bijvoorbeeld het herhalen van de ondiepe veldproeven in een 20 m diep boorgat. Voor HOM is het wenselijk om te weten hoe in het veld te bepalen of de HOM voldoet aan gestelde eisen.

- Bij volledig aanvullen is het wenselijk om te bepalen of ander aanvulmateriaal in de bovenste meters wenselijk is, aangezien hier de grootste afwijkingen zijn geconstateerd met de magnetometer>
- Kennisleemte I: Inzicht in gedrag grout (en HOM) in boorgat.
Inzicht in het gedrag van aanvulmateriaal (en booradditieven) in zoute of verziltende milieus zou onderdeel moeten zijn van dergelijk onderzoek. Wat gebeurt er als er materiaal uit het boorgat de formatie instroomt.
- Kennisleemte J: Inzicht in gedrag van magnetiet in boorgat.
Mate waarin magnetiet kan uitzakken en (in grove formatie) uit boorgat spoelen.
- Kennisleemte K: Optimalisatie van HOM-samenstelling.
Wat zijn de mogelijkheden om de samenstelling van HOM meer constant te krijgen. Ook bij andere bodemopbouw dan in Noord-Brabant. En is het wenselijk om cement toe te voegen, net als bij een deel van de grout-soorten.

Verificatiemetingen

- Kennisleemte L: Optimaliseren van verificatiemetingen
Idealiter zou via vervolgonderzoek meer inzicht komen in de relatie tussen meetwaarde met een magnetometer, gamma-gamma sonde en natuurlijke gamma-straling en de in-situ doorlatendheid. Het is conceptueel bekend welke factoren invloed hebben op deze metingen en de meting kunnen verstoren. Dit moet bij elkaar worden gebracht met labmetingen en modelsimulaties om tot een bruikbare methode te komen.
- Kennisleemte M: Verder ontwikkelen van akoestische meetmethoden (DAS-VSP).

Kwaliteitsbewaking

- Kennisleemte N: Incidenten- en kwaliteitsregister.
De huidige registratiesystemen bevatten niet alle benodigde informatie om te toetsen of een boring voldoet aan de eisen van BRL 2100 en BRL 11000. Het zou mooi zijn wanneer zaken als boorbeschrijving, opleveringscontrole en magnetometermetingen centraal worden geregistreerd. Hoe ziet zo'n register er uit?
- Kennisleemte O: Rolverdeling bij kwaliteitsbewaking (overheid, privaat, particulier).
Het is wenselijk om na te denken hoe de kwaliteitsbewaking in de toekomst te organiseren. Het huidige toezicht op veldlocaties wordt uitgevoerd door verschillende organisaties (certificerende instellingen, omgevingsdiensten, ILT) die te weinig tijd en expertise hebben. Wellicht is een ander systeem wenselijk waarbij de certificerende instellingen een grotere rol krijgen en sancties opleggen (vergelijkbaar met de branche voor asbestsanering). Of er moet een grotere rol komen voor klanten (via achteraf opeisbare boetes) en financiers (door publieke rapportage in welke mate elke boorfirma voldoet aan milieuprestaties zoals betrouwbaar afdichten van scheidende lagen).
- Kennisleemte P: Handelingsperspectief als boorgat foutief is aangevuld.
Hoe ga je hiermee om; Boete, zelf laten uitboren?

7 Literatuurlijst

- de Boer, C.V., J. Griffioen, A. Menkovic, M.E. van Vliet & W.J. Zaadnoordijk. 2021. Grondwaterkwaliteitsrisico's van bodemenergiesystemen door doorboren van kleilagen in de Brabantse situatie TNO-rapport R11454, TNO.
- de Graaf, A., M. Bloemendal & M.L. van der Schans. 2021. Aanvullen van boorgaten voor gesloten bodemenergiesystemen: Verkenning van en voorstellen tot verbetering van de kwaliteitsborging BTO 2021.004. <https://library.kwrwater.nl/publication/61812832/>
- ILT. 2021. Signaalrapportage: Risico's bij de aanleg van gesloten bodemenergiesystemen, Inspectie Leefomgeving en Transport. <https://www.ilent.nl/documenten/signaalrapportages/2021/05/10/risico%E2%80%99s-bij-de-aanleg-van-gesloten-bodemenergiesystemen>
- Kenniscentrum InfoMil. 2013. Lozingen bij aanleg en onderhoud van bodemenergiesystemen: Beleidsondersteunend document, Rijkswaterstaat.
- Kennisplatform Bodemenergie. 2021. <https://kennisplatform.bodemenergie.nl/wikibodemenergie/kennisbank/inleiding-bodemenergie/wat-is-bodemenergie/>, accessed on: 28 April 2022
- KIWA. 2019. BRL K5078: Groutmengsels voor het afdichten van boorgaten, Rijswijk. <https://www.kiwa.com/nl/nl/service/brl-5078-groutmengsels-voor-het-afdichten-van-boorgaten/>
- Naber, N., B. Schepers, M. Schuurbijs & F. Rooijers. 2016. Een klimaatneutrale warmtevoorziening voor de gebouwde omgeving—update 2016 Publicatie Nr 16.3128.68, CE, Delft. <https://www.ce.nl/publicaties/download/2166>
- Nijhof, R. 2020. The Effect of Filter Cake Deposition on the Hydraulic Conductivity of Boreholes: An experimental Approach (Internship report), KWR & Utrecht University, Nieuwegein & Utrecht.
- Nijhof, R., J. Lopik & M. Bloemendal. 2021. The effect of filter cake deposition on the hydraulic conductivity of boreholes, EGU General Assembly 2021. EGU. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-5456>
- Pauw, P.S. 2022a. Evaluatie meetmethoden afdichting boorgaten voor gesloten bodemenergiesystemen 11204343, Deltares, Utrecht.
- Pauw, P.S. 2022b. Resultaten labproeven magnetisch detecteerbaar aanvulmateriaal 11204343, Deltares, Utrecht.
- Pauw, P.S. & E.A. Obando. 2022. Grout integrity evaluation using distributed acoustic sensing 11204343, Deltares, Utrecht.
- Schout, G. & M. Bloemendal. 2022. Deltafact: effecten van bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit (update 2022), STOWA, Amersfoort. <https://www.stowa.nl/deltafacts/waterkwaliteit/kennisimpuls-waterkwaliteit/effecten-van-bodemenergiesystemen-op-de>
- SIKB. 2018. BRL 2100: Beoordelingsrichtlijn Mechanisch Boren. Stichting Infrastructuur Kwaliteitsborging Bodembeheer, Gouda. <https://www.sikb.nl/bodembeheer/richtlijnen/brl-sikb-2100>
- SIKB. 2019a. BRL 11000 Ontwerp, realisatie, beheer en onderhoud van het ondergrondse deel van installaties voor bodemenergie. Stichting Infrastructuur Kwaliteitsborging Bodembeheer, Gouda. <https://www.sikb.nl/bodembeheer/richtlijnen/brl-sikb-11000>
- SIKB. 2019b. Protocol 11001 Ontwerp, realisatie, beheer en onderhoud van het ondergrondse deel van installaties voor bodemenergie. Stichting Infrastructuur Kwaliteitsborging Bodembeheer, Gouda. <https://www.sikb.nl/bodembeheer/richtlijnen/brl-sikb-11000>
- TAW. 1996. Technisch rapport: klei voor dijken, Technische Adviescommissie voor de Waterkering, DWW, Rijkswaterstaat. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:1adcbb6e-fc1a-42f2-abef-5d75635bc8fc>
- van der Schans, M.L., J. Lopik & M.A. Meerkkerk. 2020. Putten en puttenvelden ten behoeve van drinkwater, deel 3: aanleg, PCD 13-3, KWR, Nieuwegein.
- van Vliet, M., S. Huizer, A. Marsman, M.L. van der Schans & W.J. Zaadnoordijk. in prep. Risicokaart doorboringen, Kennisimpuls Grondwaterkwaliteit.

Rapporten van veldproeven

Pauw, P. & J.H. Lopik. 2022a. Veldproef Dongen: aanvullen boorgaten GBES TKI KWR 2022.059, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Pauw, P. & J.H. Lopik. 2022b. Veldproef Stavoren: aanvullen boorgaten GBES TKI KWR 2022.060, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Pauw, P. and L. Brokx. 2022b. Veldproef Culemborg: aanvullen boorgaten GBES TKI KWR 2022.061, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Pauw, P. & L. Brokx. 2022f. Veldproef Weesp: aanvullen boorgaten GBES TKI KWR 2022.062, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Pauw, P. & L. Brokx. 2022a. Veldproef Bergen op Zoom: aanvullen boorgaten GBES TKI KWR 2022.063, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Pauw, P. & L. Brokx. 2022c. Veldproef Eerbeek: aanvullen boorgaten GBES TKI KWR 2022.064, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Pauw, P. & L. Brokx. 2022e. Veldproef Heerde: aanvullen boorgaten GBES TKI KWR 2022.065, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Pauw, P. & L. Brokx. 2022d. Veldproef Etten Leur: aanvullen boorgaten GBES TKI KWR 2022.066, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.