

**A27 Ring Utrecht -
Interpretatie
geohydrologische proeven**

Pomp-, stop- en retourproeven



A27 Ring Utrecht - Interpretatie geohydrologische proeven

Pomp-, stop- en retourproeven

Hans van Meerten
John van Esch

11202343-007

Titel

A27 Ring Utrecht - Interpretatie geohydrologische proeven

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud Gebouw Westraven, UTRECHT	11202343-007	11202343-007-BGS-0002	92

Trefwoorden

Rijksweg A27, pompproeven, retourproeven, stopproeven

Samenvatting

In het kader van het geohydrologisch onderzoek voor het project A27 Ring Utrecht van Rijkswaterstaat zijn door Deltares in de eerste helft van 2018 pompproeven, stopproeven en retourproeven uitgevoerd en geanalyseerd.



Het geohydrologisch onderzoek is ingezet na afstemming met belanghebbenden in het kader van de vergelijking van uitvoeringsmethoden met gebruik van bemalingsvarianten met of zonder retourbemaling dan wel met of zonder schermwand. De uitgevoerde proeven kenden de volgende doelstellingen:

- Bepaling van de geohydrologische parameters van het watervoerend pakket.
- Bepaling van het voorkomen en de weerstand van de Waalre klei.
- Bepaling van snelheid van opkomend grondwater bij uitval van bemaling.
- Nagaan van de haalbaarheid van de bemalingsoplossing.
- Nagaan van de haalbaarheid van retourbemaling.

De uitgevoerde proeven hebben antwoord gegeven op gestelde onderzoeksvragen.

Het doorlaatvermogen is groot ($2400 \pm 300 \text{ m}^2/\text{d}$) zodat bemalingsdebietsen zonder tegenmaatregelen ter afscherming van de locatie zeer omvangrijk zullen zijn. De weerstand van de Waalre klei is groot (naar verwachting 2000 dagen) maar niet exact te bepalen. De bergings-coëfficiënt is klein (naar verwachting $1,5 \cdot 10^{-3}$) zodat de reactiesnelheid van de grondwaterstijghoogte op veranderingen van onttrekkingen groot is. Ook in de weerstand van de toplaag (naar verwachting 100 tot 250 dagen) zit behoorlijk spreiding aangezien de locatie ligt op een overgang van een zandige toplaag in het oosten naar een gebied met komklei in het westen.

Het ontstaan van gas in de bemalingsinstallatie en daaruit voortkomende verstopping van retourputten kon in de proefopzet en onderzoeksperiode moeilijk worden beheerst. In de traditionele retourputten met een lage druk trad gasverstopping snel op, waardoor het debiet werd beperkt en onderhoud vaak nodig was. Het haalbare retourdebiet van een traditionele retourput was 50 tot maximaal $100 \text{ m}^3/\text{uur}$. Het aantal in te zetten traditionele retourputten bij bemalingen kan dus groot worden. De capaciteit van DSI-retoursystemen waarin door hogere druk gasverstopping een minder grote rol speelt, komt gunstiger uit met een debiet van 10 tot $30 \text{ m}^3/\text{uur}$ per filter in een streng die uit 8 filters was opgebouwd. De benodigde onderhoudsfrequentie van DSI-systemen kon binnen de beschikbare onderzoekstijd niet worden achterhaald.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	nov. 2018	ir. J.J. van Meerten		dr.ir. W.J. de Lange		ing. A.T. Aantjes	
		dr.ir. J.M. van Esch		ir. H.T. Sman			

Status

definitief

Titel

A27 Ring Utrecht - Interpretatie geohydrologische proeven

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Grote
Projecten en Onderhoud
Gebouw Westraven,
UTRECHT

Project

11202343-007

Kenmerk

11202343-007-BGS-0002

Pagina's

92

Inhoud

Samenvatting	1
1 Inleiding	6
2 Doelstelling van de proeven	8
2.1 Vraagstellingen	8
2.2 Te meten variabelen	9
3 Inrichting van de locatie voor pomp- en retourproeven	11
3.1 Onderzoekslocatie	11
3.2 Inrichting van het werkterrein	11
3.3 Leidingmateriaal	12
3.4 Proevenprogramma	13
4 Initiële kennis over geologie en geohydrologie	14
4.1 Globaal verwachte bodemopbouw	14
4.2 Informatie over de ondiepe ondergrond	15
4.3 Informatie over de diepe grondlagen	18
4.4 Schematisatie en verwachte waarden van geohydrologische parameters	19
4.5 Natuurlijke grondwaterstanden en stroming	21
4.6 Grondwaterkwaliteit en putverstopping	21
5 Gegevens van de meetpunten voor de proeven	23
5.1 Plaatsingsgegevens van de pompputten PP1 en PP2 en retourput RP3	23
5.2 Plaatsingsgegevens van de DSI-retourfilters	23
5.3 Plaatsingsgegevens van de peilbuizen in de meetraaien	25
5.4 Peilbuizen nabij de DSI-retourpunten	26
5.5 Meetpunten van waterstand in sloten	26
5.6 Watermeters	26
6 Resultaten van de boringen, boorgatmetingen en laboratoriumproeven	27
6.1 Boorbeschrijvingen en daaruit afgeleide bodemopbouw	27
6.2 Boorgatmetingen	28
6.3 Flowmetingen in de putten	29
6.4 Putcapaciteit	33
6.5 Doorlatendheidsproeven op de steekmonsters uit de pulsboringen	33
7 Verloop van de proeven, grondwaterstanden en debieten	34
7.1 Logboek van de pompproeven	34
7.2 Logboek van de retourproeven	35
7.2.1 Retourproeven op traditionele retourput RP3	35
7.2.2 Retourproeven op DSI® retoursystemen	36
7.3 Registratie van debieten	37
7.4 Registratie en opslag van grondwaterstanden en elektromagnetische debietmeters	38
7.5 Gegevens over het weer tijdens de proeven	41
7.6 Referentiepeilbuizen	43
7.7 Effect zuivering op de kwaliteit van geloosd water	45

8	Interpretatie van de pompproeven	46
8.1	Interpretatiemethode	46
8.2	Pompproef volkomen pompput PP1 Fase 1	46
8.2.1	Debietregistratie	46
8.2.2	Patroon van grondwaterverlagingen tijdens pompproef PP1	46
8.2.3	Stationaire uitwerking pompproef PP1	48
8.2.4	Niet-stationaire uitwerking PP1 meetraai Noord	49
8.2.5	Uitwerking PP1 meetraai West	55
8.3	Interpretatie pompfase volkomen pompput RP3	58
8.3.1	Debietregistratie	58
8.3.2	Uitwerking pompfase RP3 uit de meetraai	58
9	Interpretatie van de pomp/stopproeven	61
9.1	Waarnemingen van de stopfasen van onvolkomen pompput PP2	61
9.2	Interpretatie van de pompfase van onvolkomen pompput PP2	63
9.2.1	Debietregistratie	63
9.2.2	Uitwerking pompfase PP2 meetraai Noord	63
9.2.3	Uitwerking pompfase PP2 meetraai West	64
9.2.4	Uitwerking stopfase PP2 meetraai Noord	65
9.2.5	Uitwerking stopfase PP2 meetraai West	66
9.3	Samenvatting van de geohydrologische eigenschappen van de bodemlagen	66
10	Evaluatie van de retourproeven	70
10.1	Verloop van de retourproeven op RP3	70
10.2	Stijghoogtepatroon tijdens de retourproeven op RP3	71
10.3	Uitwerking van de putcapaciteit van RP3 tijdens de retourproeven	72
10.4	Verloop van de retourproeven op de DSI-strengen	75
10.5	Stijghoogtepatroon tijdens de DSI-retourproeven	77
10.6	Uitwerking van de capaciteit van de DSI-retourfilters	78
10.6.1	Capaciteit op basis van stijghoogte bij DSI-peilbuizen	79
10.6.2	Capaciteit van DSI-retour op basis van peilbuis RP3	81
10.6.3	Werking van de DSI-retour op basis van peilbuis B22	81
10.6.4	Capaciteit van de DSI-retourfilters op basis van de leidingdruk	81
10.7	Vergelijking van de effectiviteit van RP3 en DSI	81
10.8	Evaluatie van de putverstopping tijdens retourneren uit bemonstering door KWR	83
10.9	Drukverdeling in het leidingsysteem	84
11	Conclusies en aanbevelingen	86
11.1	Interpretatie van grondboringen voor peilbuizen en pompputten	86
11.2	Resultaat van de pompproeven	86
11.3	Resultaat van de stopproeven	88
11.4	Resultaat van de retourproeven	88
11.4.1	Putverstoppingsrisico	88
11.4.2	Traditionele retourput	88
11.4.3	DSI-retoursysteem	89
11.5	Aanbevelingen	89
11.6	Beantwoording van gestelde onderzoeksvragen	90
12	Referenties	92

Bijlage(n)

A Gegevens van geplaatste boringen, putten en peilbuizen	A-1
B Toegepast leidingmateriaal	B-1
C Fotografisch overzicht van de testlocaties	C-1
D Logboek van de uitgevoerde proeven	D-1
E Pompproeven gevoeligheidsanalyse parameterbepaling	E-1
F Rapport A Henk van Tongeren Water en Techniek BV: waterzuiveringsinstallatie	F-1
G Rapport B Henk van Tongeren Water en Techniek BV: boringen en peilbuizen,	G-1
H Rapport C Henk van Tongeren Water en Techniek BV: waarnemingen	H-1

Samenvatting

In het kader van het geohydrologisch onderzoek voor het project A27 Ring Utrecht van Rijkswaterstaat zijn door Deltares pompproeven, stopproeven en retourproeven verricht op het terrein Tussen de Rails (zie Figuur 1.1). Voor de uitvoering van de werkzaamheden is de firma Henk van Tongeren Water en Techniek BV uit Apeldoorn ingehuurd.

Het geohydrologisch onderzoek is ingezet na afstemming met belanghebbenden naar aanleiding van de risico-inventarisatie van de uitvoering van bemalingsvarianten met of zonder retourbemaling dan wel met of zonder schermwand. Vanwege de gesignaleerde risico's zijn aan de proeven de volgende doelstellingen meegegeven:

- Bepaling van de geohydrologische parameters van het watervoerend pakket.
- Bepaling van het voorkomen en de weerstand van de Waalre klei.
- Bepaling van snelheid van opkomend grondwater bij uitval van bemaling.
- Nagaan van de haalbaarheid van de bemalingsoplossing.
- Nagaan van de haalbaarheid van retourbemaling.

Ten behoeve van de proeven zijn in het eerste watervoerende pakket 2 pompputten, 1 traditionele retourput, 2 DSI retourstrengen en tientallen peilbuizen geplaatst. Tevens zijn 4 diepe pulsboringen tot circa NAP – 75 à 78 m gemaakt.

Op de pompputten zijn in februari en maart 2018 pomp- en stopproeven uitgevoerd. De proeven voldoen aan de daartoe verleende vergunning van Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden. Er is maximaal 255 m³/uur onttrokken gedurende 2 weken en 150 m³/uur gedurende 10,5 dag, in totaal is volgens de metingen van de watermeter 116.524 m³ geloosd op het oppervlaktewater. Het onttrokken grondwater is voor lozing op open water ontijzerd met een waterzuiveringsinstallatie op locatie.

In april en mei zijn proeven gedaan met een traditionele retourput. Dat heeft een maand langer geduurd dan voorzien vanwege problemen met gasverstopping van de retourput.

De retourput is enkele malen schoon gepompt waarbij een afvoer via de zuivering is geregistreerd van 31.013 m³. In juni zijn proeven gedaan met DSI-retoursystemen. In totaal is circa 50.000 m³ via retoursystemen teruggevoerd in de bodem.

Onderstaand zijn achtereenvolgens samenvattingen gegeven van de bodemopbouw, de interpretatie van de pompproeven en de resultaten van retourbemalingsproeven.

Bodemopbouw

De uitgevoerde boringen geven aan dat de zandlaag van de Formaties van Kreftenheije en Urk tot circa NAP – 30 m bestaat uit grof zand waarin lokaal grindige lagen aanwezig zijn. Deze zandlaag is meer doorlatend dan het zand van de Formatie van Sterksel die hieronder voorkomt tot circa NAP – 60 m. Bovenin de Formatie van Sterksel komen lokaal kleiige lenzen voor op wisselende diepte. Bij onttrekking van grondwater levert het bovenste deel van het watervoerende pakket het meeste water, met name bij proeven ter plekke van de retourput.

In elk van de 4 uitgevoerde diepe pulsboringen is klei van de Waalre Formatie aangetroffen.

Pompproefresultaten

Uit de pompproeven die in februari en maart 2018 zijn uitgevoerd, zijn de waarden van geohydrologische parameterwaarden afgeleid. De meest waarschijnlijke combinatie van

waarden voor de geohydrologische parameters volgend uit de gemeten grondwaterstandverlagingen is in de onderstaande tabel 1.1 vermeld.

Uit de interpretatie van de pompproeven volgt dat het doorlaatvermogen van het eerste watervoerende pakket groot is ($2400 \pm 300 \text{ m}^2/\text{d}$), circa 50% meer dan de waarde die in het vooronderzoek [Deltares 2016B] uit de bodemopbouw was afgeleid. De gevonden waarde komt overeen met het resultaat van een pompproef die het verleden in de nabijheid is uitgevoerd ([IWACO 1975], nu Royal Haskoning DHV).

De weerstand van de Waalre klei is naar verwachting groot (naar verwachting 2000 dagen), Zie Tabel 1.1. Tijdens de pompproeven werden in 4 meetpunten onder de kleilaag nauwelijks verlagingen van de grondwaterstijghoogte gemeten. De weerstand van de Waalre klei kan daarom niet exact worden afgeleid maar is mogelijk groter dan de waarde van 2000 dagen. De waarde voor de bergingscoëfficiënt van het eerste watervoerend is klein zoals voor spanningswater is te verwachten. Dat betekent dat bij uitval van een bemaling de grondwaterstijghoogte binnen 1 tot enkele minuten op het initiële niveau terug komt, mits de verlaging niet zo ver wordt gebracht dat de toestand van spanningswater bij bemaling niet meer geldig is.

Tabel 1.1 Samenvatting van de geohydrologische parameterwaarden die uit de proeven zijn afgeleid voor de schematisatie van de laagopbouw ter plekke van locatie Tussen de Rails nabij de A27 te Utrecht.
Legenda: gele vakken- de waarde is onzeker omdat de gemeten verlagingen in het tweede watervoerende pakket klein waren, oranje vakken - de eigenschappen komen uit regionale modellen.

Geohydrologische interpretatie pompproeven A27 met MLU		Parameterwaarden na kalibratie voor diverse pomp- en stopproeven		
Laagschema	symbool+eenheid	verwacht	min	max
Waterremmende top laag, Holocene kleiige top laag	C1 [d]	100	40	270
Eerste watervoerende pakket, Formaties van Echteld, Kreftenheije, Urk, Sterksel	kD1 [m ² /d]	2400	2300	2700
	S1 [-]	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Scheidende laag Waalre klei	C2 [d]	2000	1000	5000
Tweede watervoerende pakket, Formaties van Peize Waalre	kD2 [m ² /d]	4000	3500	4500
	S2 [-]	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Het eerste watervoerend pakket bestaat uit enkele zandlagen voor verschillende geologische formaties. De doorlatendheden van die lagen zijn uit de uitwerkingen met MLU afgeleid (zie tabel 1.2). Het product van laagdikte en verwachte doorlatendheid voor verschillende lagen past met tabel 1.1. Minimale of maximale waarden zijn extremen per sublaag. Grofzandige en grindige lagen komen in alle Formaties voor en zijn in de boringen op verschillende diepten gevonden.

Tabel 1.2 Samenvatting van de afgeleide minimale en maximale doorlatendheidswaarden voor onderscheiden zandlagen in het eerste watervoerende pakket voor locatie Tussen de Rails nabij de A27 te Utrecht.

Geohydrologische pompproeven A27		interpretatie	Parameterwaarden na kalibratie voor diverse pomp- en stopproeven		
zandlaag	parameter	Laagdikte [m]	k_{\min} [m/d]	k_{\max} [m/d]	
Doorlatendheid van de watervoerende zandlagen [m/d]					
Echteld	k1-1	7,5 à 10	20	120	
Kreftenheije/Urk	k1-2	22,5	20	70	
Sterksel	k1-3	25	20	40	

In het watervoerende pakket komen in de Formaties tussenkleilagen voor die een lokale verbreiding kennen. Wanneer deze kleilagen worden gemodelleerd als lagen met een hydraulische weerstand in MLU blijken de waarden daarvan klein te zijn: 0,1 dagen voor kleilagen in de Kreftenheije/Urk Formatie en 0,5 tot 2 dagen voor kleilagen in de Sterksel Formatie.

Resultaten retourproeven

Bij een lange retourproef op een traditionele retourput kon niet meer dan 50 m³/uur worden teruggebracht. De retourbemaling had te kampen met verstopping door ontgassing, die werd veroorzaakt door vrijkomen van gassen bij te lage drukken in het retourleidingsysteem. Verstopping als gevolg van hoge ijzer- en kalkgehalten trad bij het toegepaste gesloten retour(leiding)systeem niet op.

Aangezien de Holocene kleiige toplaag ter plekke 5 m dik is en de grondwaterstanden in het gebied relatief hoog zijn ten opzichte van maaiveld is de grondwaterstijghoogte rond de retourput niet meer dan 1,5 m opgezet vanwege het risico van vernatting en langsluipheid rond de retourput. Op basis van de bodemopbouw was verwacht dat er 3 keer zoveel debiet in een traditionele retourput teruggebracht zou moeten kunnen worden, terwijl op basis van de dikte van de holocene kleilaag en evaluatie van opbarstgevaar zelfs nog veel meer retour per put mogelijk moeten zijn. Rekening houdend met een veiligheid ten aanzien van vernatting rond retourputten is retourneren van 100 m³/uur via een traditionele retourput het maximum, mits het verstoppingsprobleem wordt beheerst.

Ontgassing moet door een goed ontwerp van het retoursysteem worden beheerst. Om een retoursysteem op basis van traditionele retourputten in de gegeven situatie van de grondwaterkwaliteit ter plekke van de A27 Ring Utrecht gedurende lange tijd te laten functioneren, dient men voorwaarden te stellen aan de bemalingswerken:

- Bij het voorkomende hoge ijzergehalte van het anoxische grondwater maatregelen treffen om verstopping van retourputten door ijzerneerslag te vermijden (toepassing van een gesloten leidingsysteem, menging van zuurstofarm en zuurstofrijk grondwater voorkomen en toetreding van zuurstof voorkomen).
- Het ontwerp van leiding- en putsystemen op de lokale situatie aan te passen ter beheersing van de leidingdruk en zo nodig een ontgassingsinstallatie toe te passen.
- Voor een geoptimaliseerde beheersing van ontgassing in de leiding een druk >2 bar aanhouden om ontgassing te vermijden.

Tijdens de inzet van een DSI-retoursysteem met injectie op een diepte van circa 20 m-MV was een debiet van 10 m³/u per retourfilter makkelijk haalbaar maar bij injectie van 30 m³/u per punt trad opbarsten op van een kwart van de afdichtingen boven de gemaakte filters. Indien een streng van 8 filters wordt gerealiseerd met DSI kan in elk geval een debiet van 160 m³/u worden bereikt. Aangezien DSI-retourfilters snel en met relatief eenvoudige middelen kunnen worden geplaatst op diepten waar de meest doorlatende grondlagen voorkomen, is dit systeem effectief qua kosten en capaciteit.

Uit de uitgevoerde proeven leiden wij af dat bij het op deze locatie voorkomende grote doorlaatvermogen van de eerste watervoerende laag het onttrekkingsdebiet van een bemalingswerk omvangrijk zal zijn, de invloedssfeer van een in te zetten bemaling ook groot zal zijn, dat maatregelen ter beperking van het debiet nodig zijn en de inrichting van benodigde retourputten een grote impact op de infrastructuur in de omgeving zal hebben. Vanwege de geconstateerde snelle verstopping door ontgassing en benodigde leiding- en ontgassingssystemen zal het onderhoud van een retoursysteem met traditionele retourputten in de praktijk zeer veel inspanning vergen.

Bij de opzet van de geohydrologische proeven zijn 5 onderzoeksvragen gesteld, waar nu op basis van de uitgevoerde proeven onderstaande conclusies voor zijn geformuleerd.

1 Risico van uitval van bemaling

Bij uitvoering van een kortdurende bemaling is het grondwatersysteem als van semigespannen grondwater. Aangezien de bergingscoëfficiënt van het eerste watervoerende pakket klein is met naar verwachting $S_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ met een marge volgens een factor van 0,5 tot 2, leidt uitschakelen van de bemaling tot een terugkeer van de grondwaterstand tot beginniveau binnen een minuut tijd. Bij langere duur bemalen tot grotere diepte zal de grondwaterstand sterker verlaagd worden en kan een freatisch systeem ontstaan. Deze freatische situatie kon met de proeven niet worden onderzocht vanwege vergunning en omgevingseffecten. Zeker is dat de terugkeer van de grondwaterstand dan trager verloopt maar niet bekend is in welke mate.

2 Geohydrologisch model voor effectbepaling en gedrag van het grondwatersysteem

Uit de pompproeven blijkt dat het ter plekke geldende doorlaatvermogen van het eerste watervoerende pakket zeer groot is met $kD_1 = 2400 \pm 300 \text{ m}^2/\text{d}$. De waarden liggen aan de bovengrens van de marge die in de voorstudie in 2016 is aangehouden. Het grote doorlaatvermogen leidt ertoe dat het waterbezwaar van bemalingen groot zal zijn en dat verlagingsseffecten van bemalingen zonder tegenmaatregelen tot grote afstand reiken.

3 Haalbaarheid van de bemalingsoplossing

Vanwege het grote doorlaatvermogen van de eerste watervoerende laag is het waterbezwaar van een bemaling zonder afschermdende maatregelen groot. Indien de pompputten op grote afstand van het werk moeten worden geplaatst, neemt het waterbezwaar bij toepassing van een bemaling sterk toe. Door inzet van retourbemaling zal het waterbezwaar door het rondpompeffect verder toenemen. De grootte van een bemaling zal vanwege de vastgestelde condities van een niet eerder in dit gebied gekende omvang zijn. Gedurende een dergelijk werk zal continu toezicht op de bemaling moeten zijn omdat de risico's van niet functioneren erg groot zijn.

Gezien het risico van uitval zullen bijzondere voorzieningen nodig zijn om de bemaling gaande te houden (zoals dubbele uitvoering van energievoorziening en leidingen, noodafvoer en dergelijke).

4 Praktische haalbaarheid van retourbemaling

Aangezien de kleiige deklaag aan de westkant van de Verdiepte Ligging in de A27 een variërende dikte tot maximaal 5 m heeft en de grondwaterstanden in het gebied relatief hoog zijn ten opzichte van maaiveld, en aan de oostkant van de Verdiepte Ligging in de A27 vrijwel ontbreekt, kan de grondwaterdruk rond een retourput niet al te hoog worden opgezet zonder risico van vernatting, langloopsheid of opbarsten rond de retourput.

Uitgaande van een goede beheersing van verstoppingsprocessen kan per klassieke retourput waarschijnlijk niet meer dan 100 m³/u worden teruggebracht in de ondergrond. Klassieke retoursystemen moeten zo worden ingericht dat verstopping door ijzernerslag en ontgassing wordt voorkomen, zodat de druk in de putten niet te hoog wordt. Dit is door middel van een goed ontwerp van het retoursysteem beheersbaar.

Inzet van DSI-retour-systemen lijkt wat gunstiger, met lagere kosten en grotere flexibiliteit maar de werking op lange duur is nog niet voldoende zeker. Aangezien de onttrekkingsdebieten van de bemaling zonder afschermdende maatregelen bij het voorkomende grote doorlaatvermogen van de watervoerende laag omvangrijk zijn, zal het aantal benodigde retourputten bij een voorziene integrale retourbemaling groot zijn.

Het onderhoud van een retoursysteem zal zeer veel inspanning vergen.

5: Hydraulische weerstand van de Waalre klei

Er zijn in de 4 geplaatste diepe waarnemingspunten bij lange duur van grondwateronttrekking met hoog debiet uit het eerste watervoerende pakket nagenoeg geen verlagingen onder de Waalre klei waargenomen. Dat wijst er op dat de hydraulische weerstand van de betreffende waterremmende laag in het onderzoeksgebied waarschijnlijk groot is. Nader onderzoek moet meer zekerheid geven over de continuïteit van deze laag.

1 Inleiding

In het kader van de verbetering van Rijksweg A27 in de Ring Utrecht is door Rijkswaterstaat opdracht verleend aan Deltares om geohydrologisch onderzoek uit te voeren door middel van pompproeven. Door specialisten en belanghebbenden werd de uitvoering van pompproeven noodzakelijk geacht omdat daarmee meer inzicht kan worden verkregen in de grondwater-risico's tijdens de uitvoering van werkzaamheden aan de A27. Specifiek betreft dit de risico's bij ontgravingen binnen de folieconstructie bij bemaling van het grondwater buiten de folie. De opzet van de proeven is beschreven in het Plan van Aanpak van Deltares [Deltares 2017A].

De pompproef is uitgevoerd in het kader van de voorstudie voor het project van Rijkswaterstaat aangaande de verbetering van de A27 in de Ring Utrecht. De voorstudie naar mogelijke uitvoeringsmethoden is toegespitst op het deel folieconstructie van de verdiepte ligging. Er zijn op dit moment de volgende vier uitvoeringsmethoden in onderzoek om de wegverbeteringswerken binnen de folieconstructie mogelijk te maken:

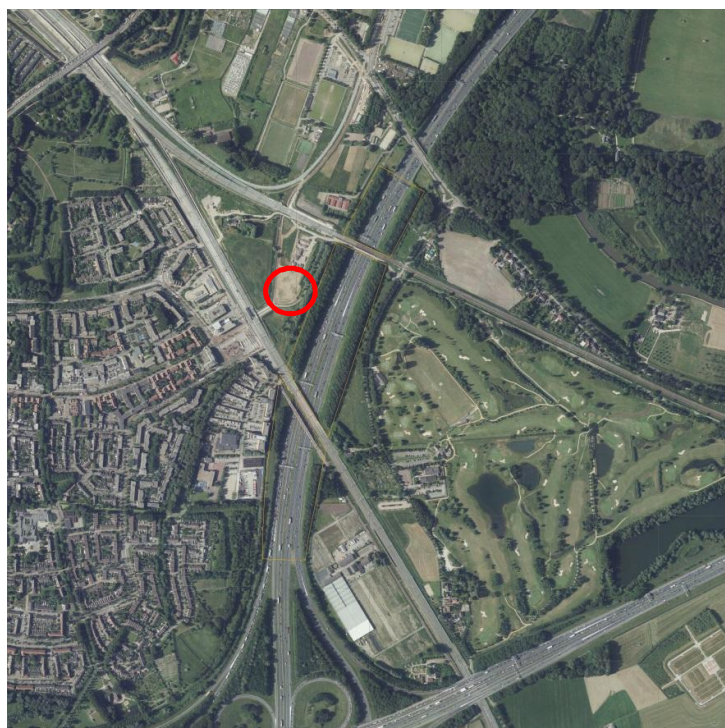
1. Tijdelijke bemaling aan de buitenzijde van de folieconstructie.
2. Tijdelijke bemaling aan de buitenzijde van de folieconstructie met retourbemaling in de omgeving.
3. Tijdelijke bemaling aan de buitenzijde van de folieconstructie binnen een schermwand.
4. Tijdelijke bemaling aan de buitenzijde van de folieconstructie binnen een schermwand met retourbemaling in de omgeving.

De pompproef is noodzakelijk om beter inzicht te krijgen in de lokale geohydrologische eigenschappen zodat ontwerpkeuzes omtrent de toe te passen uitvoeringsmethode goed kunnen worden onderbouwd. Het geohydrologisch onderzoek is er tevens op gericht om informatie te verzamelen waarmee toekomstige aannemers ingrepen in het grondwater kunnen dimensioneren en de effecten daarvan op de omgeving kunnen voorspellen.

Om het onderzoek uit te voeren is een proefterrein geselecteerd op de locatie Tussen de Rails nabij de A27 op enige afstand van de wijk Lunetten en Amelisweerd (zie figuur 1.1).

Het onderzoek bestond uit de inrichting van een proefveld met grondwaterputten, een proefveld met retoursystemen, een monitoringnetwerk met peilbuizen en apparatuur voor automatische registratie, de aanleg van een leidingsysteem en zuiveringsinstallatie en de uitvoering van pomp-, stop en retourproeven. De werkzaamheden voor inrichting en uitvoering van de proeven zijn door Deltares uitbesteed aan de firma Henk van Tongeren Water en Techniek BV uit Apeldoorn (in dit rapport afgekort tot HvT). Voor de inrichting van de monitoring is door HvT de firma Eijkelkamp ingehuurd.

De inrichting van de proefvelden en de uitvoering van de proeven en metingen hebben plaatsgevonden van januari tot en met juni 2018.



Figuur 1.1 Ligging van het proefterrein Tussen de Rails nabij Rijksweg A27

In dit rapport wordt verslag gedaan van de interpretatie van de pomp-, stop- en retourproeven. In de bijlagen F, G, en H zijn de rapportages A, B en C van HvT [Hvt 2018A, HVT2018B, HVT 2018C] bijgevoegd met de verzameling van meetdata, de plaatsing van de monitoring en de zuivering van het deel van het onttrekkingswater dat op oppervlaktewater is geloosd.

2 Doelstelling van de proeven

De nabij de verdiepte ligging van de A27 uitgevoerde pomp- stop- en retourproeven hebben tot doel de geohydrologische eigenschappen van de ondergrond ter plaatse te bepalen. Deze gegevens zijn noodzakelijk om de vier geselecteerde uitvoeringsmethoden te beter te kunnen vergelijken met betrekking tot te onttrekken en te retourneren hoeveelheden grondwater alsmede het kwantificeren van effecten in de omgeving mogelijk te maken bepaling van de geohydrologische parameters van het watervoerend pakket.

2.1 Vraagstellingen

De doelstelling van de pompproeven is om meerdere onderzoeksvragen te beantwoorden:

1. Beoordeling van de risico's van de bemaling in het werk: snel opkomen van waterstand als gevolg van uitval van bemaling met gevaar van opdrukken folie en weginundatie.
2. Bepaling van de geohydrologische eigenschappen ten behoeve van de modellering van de effecten van bemaling op de omgeving: verlaging van de grondwaterstand, omvang van het invloedsgedebied.
3. Vaststelling van de haalbaarheid en werking van de bemaling in de praktijk: drooglegging tijdens de ontgraving en het daarvoor noodzakelijke debiet.
4. Vaststelling van de haalbaarheid en werking van retourbemaling in de praktijk.
5. Bepalen van de hydraulische weerstand van de Waalre klei in verband met mogelijke lek door die laag bij een oplossing met een schermwand.

De volgende activiteiten zijn gedefinieerd om de gestelde onderzoeksvragen te beantwoorden:

Tabel 2.1 Onderzoeksvragen voor de uit te voeren proeven

Onderzoeksvraag	Proefonderdeel
1: risico uitval bemaling	Uitvoeren van pomp- en stopproeven Vaststellen van stijgsnelheid van het grondwater bij uitval van bemaling.
2: geohydrologisch model voor effectbepaling en gedrag van het grondwatersysteem	Uitvoering van een pompproef met een tijdelijk onttrekkingsdebiet van 260 m ³ /uur uit een 60 m diepe pompput, waarbij binnen een straal van 100 m de verlagingen van het grondwater in 2 watervoerende pakketten worden gemeten, om daaruit de geohydrologische eigenschappen van de holocene toplaag, het eerste watervoerend pakket en de Waalre klei af te leiden.
3: haalbaarheid van de bemalingsoplossing	Vaststellen van verlaging van de stijghoogte rond een onvolkomen (30 m diepe) pompput per debietseenheid,
4: praktische haalbaarheid van retourbemaling	Uitvoeren van grondwaterkwaliteitsmetingen met betrekking tot het aspect putverstopping. Uitvoeren van retourproeven ter bepaling van effectiviteit van een standaard retourput en een DSI-retoursysteem.
5: weerstand van de Waalre klei	Meting van de verlaging van de grondwaterstand tijdens de pompproef met peilbuizen onder de Waalre klei om de hydraulische weerstand van die laag te kunnen afleiden.

In de conclusies van voorliggend rapport wordt op de beantwoording van de onderzoeksvragen teruggekomen.

2.2 Te meten variabelen

De verwachte bodemopbouw, waarop in deze paragraaf wordt ingegaan, is beschreven in het hoofdstuk "Initiële kennis over geologie en geohydrologie".

In verband met de uitvoering van de bemalingsoplossing en uitvoering van een "schermwand-oplossing is lokale informatie over de geohydrologische eigenschappen van de ondergrond nodig. Vooruitlopend op de proef is nagegaan welke parameters met welke metingen moeten worden onderzocht en wat de mogelijke onzekerheid is in de parameters zodat het proeven- en meetprogramma daarop kon worden afgestemd. Dit is in tabel 2.2 samengevat.

Tabel 2.2 Benodigde proeven om de onderzoeksvragen te beantwoorden: parameters, belang, methode.
Afkorting in tabel gws=grondwaterstand

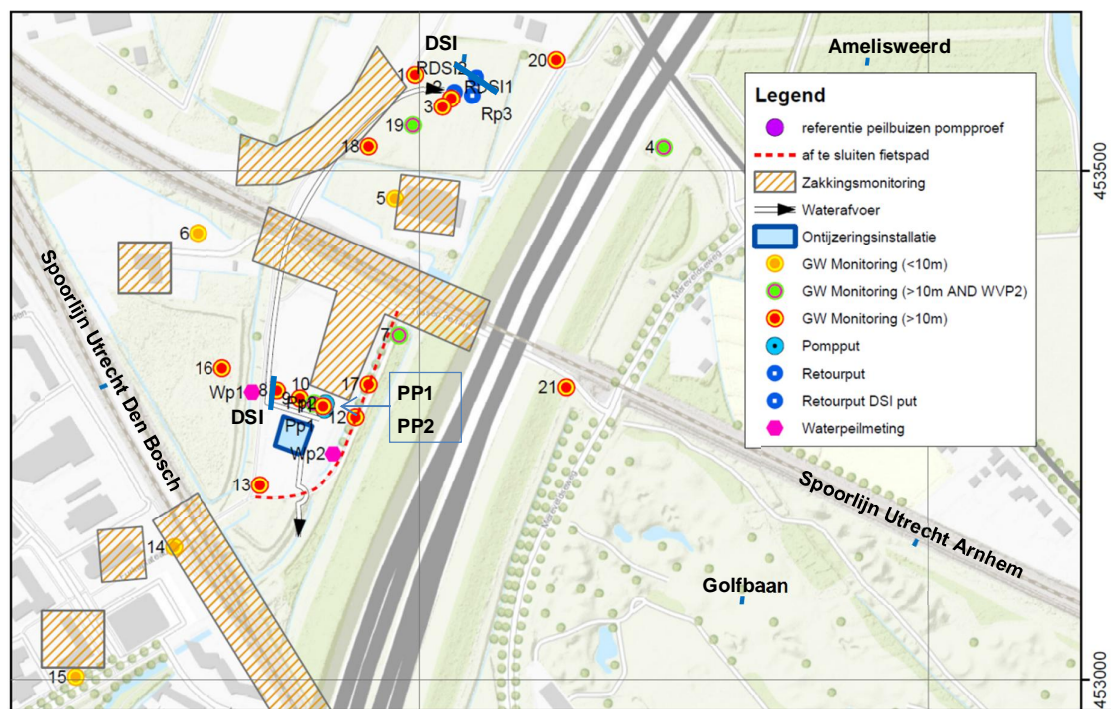
Geohydrologische eigenschap	Belang van de parameter	Wijze van bepaling bij de uitvoering van een pompproef
Verticale hydraulische weerstand C1 bovenste waterremmende laag (Holocene klei)	<ul style="list-style-type: none"> • Verlaging freatische gws • Omvang van invloedsgebied • Grootte van bemalingsdebiet 	<ul style="list-style-type: none"> • Boorbeschrijvingen • Meting verloop gws tijdens pompproef met peilbuizen onder en boven de deklaag op diverse afstanden in raai
Doorlaatvermogen kD1-1 van bovenste deel van het eerste watervoerend pakket (zand van Bostel en Kreftenheije Formatie)	<ul style="list-style-type: none"> • Omvang van invloedsgebied, • Verlaging gws ter plaatse van bemaling, • Grootte van bemalingsdebiet, • Verlaging gws in omgeving 	<ul style="list-style-type: none"> • Boorbeschrijvingen • Bepaling k uit korrelverdelingen van steekmonsters uit pulsboringen. • Put- en stopproef. • Meting verloop gws tijdens pompproef met peilbuizen in raaien
Verticale weerstand van kleilagen in eerste watervoerend pakket (Kreftenheije Formatie)	<ul style="list-style-type: none"> • Verlaging gws ter plaatse van bemaling, • Grootte van bemalingsdebiet 	<ul style="list-style-type: none"> • Sondering bij pompput. • Analyse van steekmonsters uit pulsboringen. • Boorbeschrijvingen. • Boorgatmetingen zuigboorgaten. • Meting verloop gws tijdens pompproef met peilbuizen op ca MV-10m en MV-45m
Doorlaatvermogen kD1-2 van onderste deel van het eerste watervoerend pakket (zandlagen van Kreftenheije Urk en Sterksel Formatie)	<ul style="list-style-type: none"> • Omvang van invloedsgebied, • Verlaging gws in omgeving 	<ul style="list-style-type: none"> • Boorbeschrijvingen • Bepaling k uit korrelverdelingen van steekmonsters uit pulsboringen. • Meting verloop gws tijdens pompproef met peilbuizen op ca MV-45m in raai
Weerstand C2 van waterremmende laag Formatie van Waalre kleilaag 1 (WaK1)	<ul style="list-style-type: none"> • Omvang van het invloedsgebied, • Grootte van bemalingsdebiet • Lek door Waalre klei binnen schermwand-constructie 	<ul style="list-style-type: none"> • Kartering van sondeerresultaten en boorbeschrijvingen. • Analyse van monsters uit pulsboringen voor de peilbuizen. • Meting verloop gws tijdens pompproef met peilbuizen onder en boven de Waalre Klei

Bergingcoëfficiënt S van het zand van de Formatie van Kreftenheije/Urk	<ul style="list-style-type: none"> • Reactiesnelheid geohydrologische systeem, • Herstel van grondwaterdruk op folieconstructie bij uitval van bemaling 	<ul style="list-style-type: none"> • Stopproeven na pompperiodes van verschillende duur tijdens pompproef.
Waterkwaliteit in het eerste watervoerend pakket (Kreftenheije zand)	<ul style="list-style-type: none"> • Eisen aan waterkwaliteit bij lozing op sloten • Verstoppen van retourputten 	<ul style="list-style-type: none"> • Monsternamen via peilbuizen en analyse van ijzergehalte (mogelijk tot [Fe]=20 mg/l), redoxpotentiaal en volgens lozingspakket

3 Inrichting van de locatie voor pomp- en retourproeven

3.1 Onderzoeklocatie

Ter beperking van omgevingseffecten is het terrein "Tussen de rails" als geschikte locatie gekozen [Deltares 2017A]. De bepalende factoren voor de locatiekeuze waren: ligging ten opzichte van het bosgebied Amelisweerd, randvoorwaarden vanuit huidig terreingebruik, effecten op de omgeving en de toegankelijkheid. De globale locatiekaart is opgenomen in Figuur 3.1. De locatiekeuze en inrichting zijn met Gemeente Utrecht en belanghebbenden afgestemd.



Figuur 3.1 Proeflocatie voor de pompproeven A27 Utrecht, Tussen de Rails

3.2 Inrichting van het werkterrein

Er zijn 2 pompputten geplaatst:

- Een diepe pompput (met een filter van MV-17,5 tot -60 m):
Het filter $\varnothing 300\text{mm}$ is geplaatst in een $\varnothing 600\text{mm}$ zuigboorgat waarna fijn grind als omstorting is aangebracht en ter diepte van doorboorde lagen is aangevuld met zwelklei. Bij de realisatie van de diepe pompput is over de volle dikte van de watervoerende laag een boorgatmeting en een flowmeting uitgevoerd. Daaruit is informatie over de opbouw en doorlatendheidsverdeling van de aquifer afgeleid.
- Een ondiepe pompput (met een filter van MV-15,5 tot -29,5 m):
Het filter $\varnothing 300\text{mm}$ is geplaatst in een $\varnothing 600\text{mm}$ zuigboorgat waarna fijn grind als omstorting is aangebracht en ter diepte van doorboorde lagen is aangevuld met zwelklei. De ondiepe (onvolkomen) pompput is geplaatst om in de pompproeven de effectiviteit van verwachte bemaling te testen, het risico van uitval en de invloed van gelaagdheid van het watervoerend pakket op de opbrengst na te gaan.

Er zijn 2 retourssystemen geplaatst:

- Een traditionele retourput met een filter tot grote diepte (met een filter van MV-15,5 tot -60,5 m). Het filter $\varnothing 300\text{mm}$ is geplaatst in een $\varnothing 600\text{mm}$ zuigboorgat waarna fijn grind als omstorting is aangebracht en ter diepte van doorboorde lagen is aangevuld met zwelklei.
Met een traditionele retourput kan via een gesloten leidingsysteem onder geringe overdruk water in de ondergrond worden teruggebracht.
- Een DSI-retoursysteem.
Met een DSI (Düsen Saug Infiltration) wordt via een gesloten leidingsysteem water onder hoge druk via een vernauwing in de valleiding (venturi) via een kort filter zonder omstorting in een goed doorlatende laag geperst. Er zijn 2 proefvelden gemaakt: direct achter de zuivering op circa 80 m afstand van de pompput PP2 en nabij de traditionele retourput. De plaatsingsgegevens zijn opgenomen in paragraaf 6.2. De diepte van de injectiepunten in het DSI-retoursysteem is proefondervindelijk vastgesteld door te spuitboren naar een laag die het water het makkelijkst opneemt. De gerealiseerde diepte is globaal 20 m.

Rond de pompputten zijn in twee raaien peilbuizen geplaatst, in westelijke en in noordelijke richting, waarmee de verandering van de grondwaterstand tijdens de proeven is waargenomen. De locaties zijn aangegeven in figuur 3.1. Voor informatie omtrent de geplaatste boringen en peilbuizen wordt verwezen naar bijlage G [HvT 2018B]. In pulsboorgaten en zuigboorgaten zijn PVC-peilbuizen met filter $\varnothing 50\text{mm}$ geplaatst waarbij fijn grind als omstorting is aangebracht en ter diepte van doorboorde lagen is aangevuld met zwelklei.

Op het werkterrein is een zuiveringsinstallatie opgebouwd met beluchtingseenheden en zandfilters waarmee tijdens de pompproeven het te lozen onttrekkingswater is ontijzerd. Tijdens de retourproeven was de installatie stand-by voor zuivering van water dat bij schoonpompen vrijkwam. Voor de beschrijving van de installatie wordt verwezen naar bijlage H [HvT 2018C].

3.3 Leidingmateriaal

De leiding van de pompputten naar retourput RP3 is aangelegd in de week van 5 februari 2018. De samenstelling van de leiding is in detail aangegeven in de tabel in bijlage B. Globaal genomen is het volgende leidingmateriaal aangeleverd:

- Tussen pompputten en zuivering over circa 40 m een rubberen slang en metalen leiding met diameter 160 tot 250 mm.
- van zuivering naar de eerste pijpenbrug over het fietspad een stalen en PE-leiding over 25 m.
- Vanaf pijpenbrug over een lengte van 240 m in de sloot langs het fietspad en via de duiker onder het spoor door een PE-leiding 250 mm samengesteld uit geflensde pijpdelen.
- Via een tweede pijpenbrug werd weer het fietspad gekruist waarna nog circa 160 m PE-leiding 250 mm tot aan het retourveld.
- Vanaf de ontijzeringsinstallatie is een leiding met diameter 160 mm naar de sloot gelegd voor lozing van behandeld onttrekkingswater tijdens de eerste 2 pompproeffasen.

In bijlage C is door middel van enkele foto's een overzicht gegeven van de installatie die op het werk is gerealiseerd. Het bij de retourput getoonde ontgassingsvat is in een later stadium bijgeplaatst.

3.4 Proevenprogramma

Het programma van de proeven is in 4 fasen uitgevoerd:

- Februari 2018: een pompproef met een debiet van 250 m³/u gedurende 2 weken op PP1 waarvan het onttrokken grondwater na ontijzing via de zuivering is geloosd op het oppervlaktewater.
- Maart 2018: pomp- en stopproeven op PP2 met een debiet van 125 m³/u tijdens opeenvolgende testen van toenemende duur (# uur tot # dagen?). waarvan het onttrokken grondwater na ontijzing via de zuivering is geloosd op het oppervlaktewater.
- April 2018: retourproeven op de traditionele retourput (waarbij het debiet gaande de proef is opgeschaald van 50 naar 100 m³/u).
- Eind mei 2018: proeven op DSI-retoursysteem (waarbij het debiet gaande de proef is opgeschaald van 50 naar 100 m³/u).

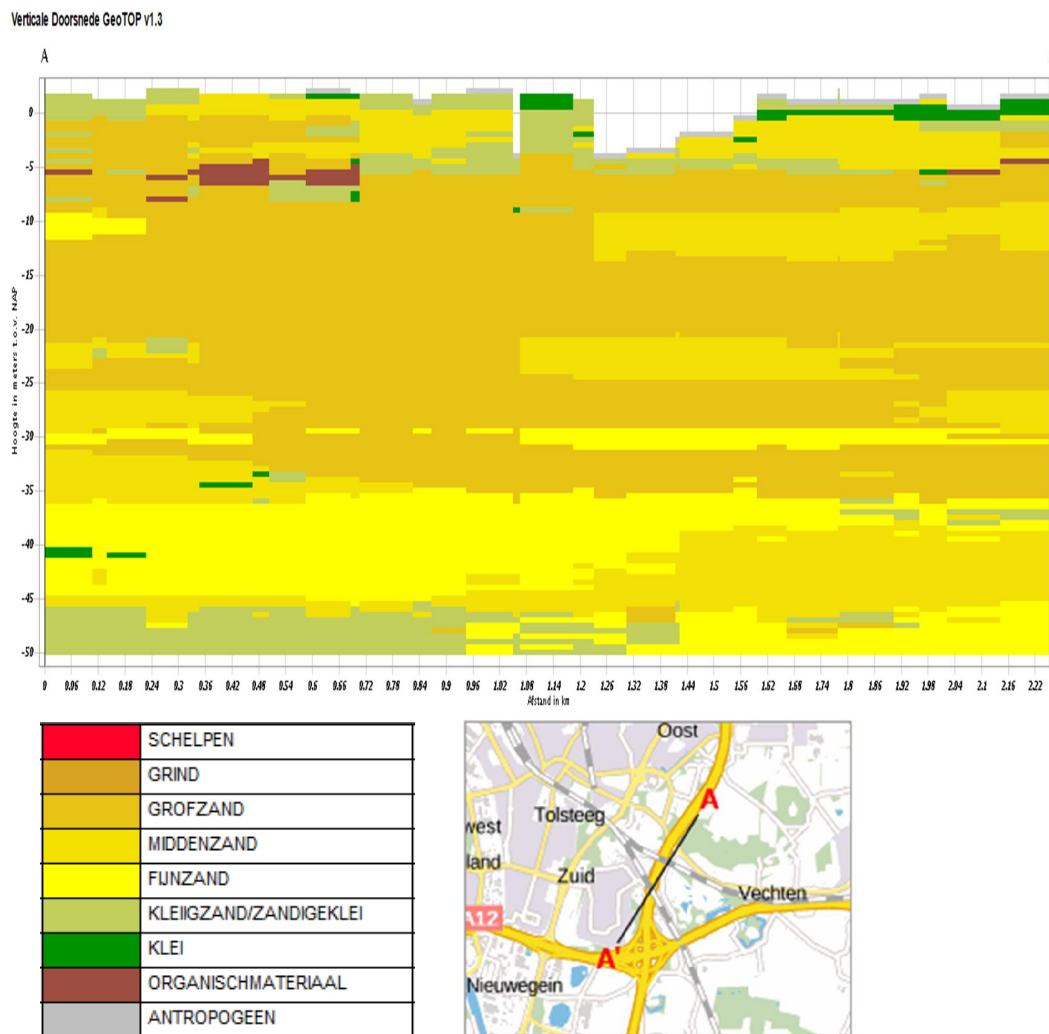
Het uitgevoerde proevenprogramma is in detail aangegeven in het uitvoerings-schema in hoofdstuk 8 "Verloop van de proeven, grondwaterstanden en debieten".

4 Initiële kennis over geologie en geohydrologie

4.1 Globaal verwachte bodemopbouw

Voor het ontwerp van de pompproef met bepaling van de mogelijke onttrekking en bijbehorende verlaging van de grondwaterstand is uitgegaan van de beschikbare waarden voor de geohydrologische eigenschappen van de ondergrond zoals die vooraf aan de proeven bekend waren. Die informatie is verzameld in een conceptueel geohydrologisch model dat is opgesteld op basis van GeoTop en REGIS (TNO, DINOLoket).

In figuur 4.1 is enige informatie uit GeoTop (TNO, DINOLoket) weergegeven in een doorsnede over het gebied tot circa 50 m-NAP, waarin het voorkomen van weinig klei en organisch materiaal (veen) in de toplaag is gepresenteerd. In het deel tot NAP -35 m is opvallend veel aanwijzing op het voorkomen van grof zand. Het maaiveld ligt ter plekke op circa NAP+1m. Het lage deel in het midden van het profiel is de verdiept liggende A27.



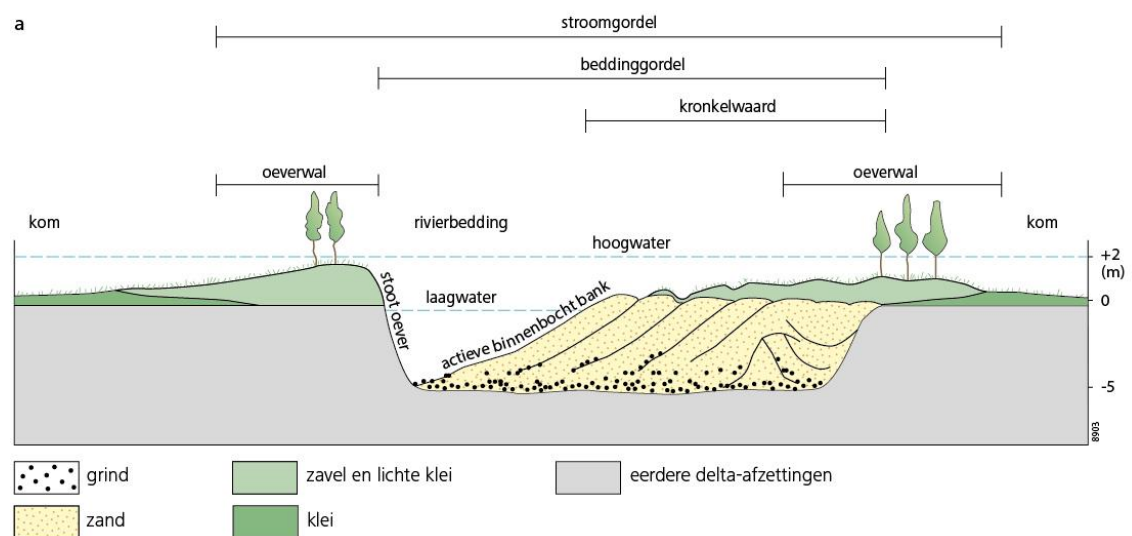
Figuur 4.1 Lithologische doorsnede over de proeflocatie evenwijdig aan de A27 volgens GeoTop (DINOLoket)

4.2 Informatie over de ondiepe ondergrond

Bij een voor aanvang van de pompproeven uitgevoerde studie naar de zettingsgevoeligheid van de spoorlijnen naar Arnhem en Den Bosch die de A27 kruisen [Deltares 2017B], is de ondiepe ondergrond in kaart gebracht op en rondom het driehoekige terrein tussen de A27 en de spoorlijnen. In die studie is met name gekeken naar de dikte van het bovenste ‘slappe’ Holocene pakket en de diepte, in NAP, waarop het zand begint.

De variatie in dikte van de deklaag hangt samen met de zzw-nno lopende restgeul van de Oude Rijn (zie figuur 4.3), ook wel aangeduid als Oudwulverbroek. Binnen de restgeul komen lokaal dikke deklaagen voor met daarin slap materiaal zoals organische klei en lokaal gyttja¹. Naar de randen van de restgeul toe neemt de dikte af. Op de oeverwallen naast de restgeul varieert de dikte van de deklaag ook, met name door het natuurlijke reliëf van oevers en zogenaamde kronkelwaarden, golvende zandoppervlaktes in de binnenbocht van rivieren. De hoogtevariatie in een kronkelwaard bedraagt 1 tot 2 m. Het reliëf in de kronkelwaard is meestal parallel aan de rivier (zie Figuur 4.2).

Door het onderzoeksgebied kruist de opgevulde restgeul van de Oudwulverbroek in Noord-Zuid-richting (zie figuur 4.3). Aan weerszijden van deze restgeul liggen oeverwallen, waarbij de oeverwal ten westen van de restgeul voornamelijk op komafzettingen zal liggen en de oeverwal ten oosten van de restgeul op het zandlichaam van de rivier zelf. Verder richting het westen liggen de komafzettingen direct aan het maaiveld. In verschillende onderzoeken van de Universiteit Utrecht [Stouthamer et al., 2015] is de Oudwulverbroek restgeul onderzocht. De restgeul wordt beschreven als 30 tot 130 m breed en 2 tot 7 m diep. De opvulling van de restgeul bestaat uit klei, gyttja en lokaal mogelijk ook veen. De oeverwalafzettingen bestaan vooral uit (zandige) klei en de komafzettingen uit klei met aan de basis regelmatig een basisveenlaag. Lokaal is veel verstoring door menselijk activiteiten opgetreden, met resterende zandige ophogingen, bijvoorbeeld voor oude depots bij aanleg van de A27, en vergravingen. Op de driehoek “Tussen de rails” zijn slibdepots voor het waterschap en bouwplaatsen voor spoorwerkzaamheden aanwezig geweest.



Figuur 4.2 Overzicht van landschapseenheden bij een rivier [Stouthamer et al., 2015]. Links oeverwal op komgrond, rechts oeverwal op kronkelwaard en in het midden de (rest)geul.

¹ Gyttja is een sediment dat bestaat uit fijne organische resten en is herkenbaar als een fijnkorrelige, groene tot geelbruine modder, ook wel aangeduid als bagger of bodemslik



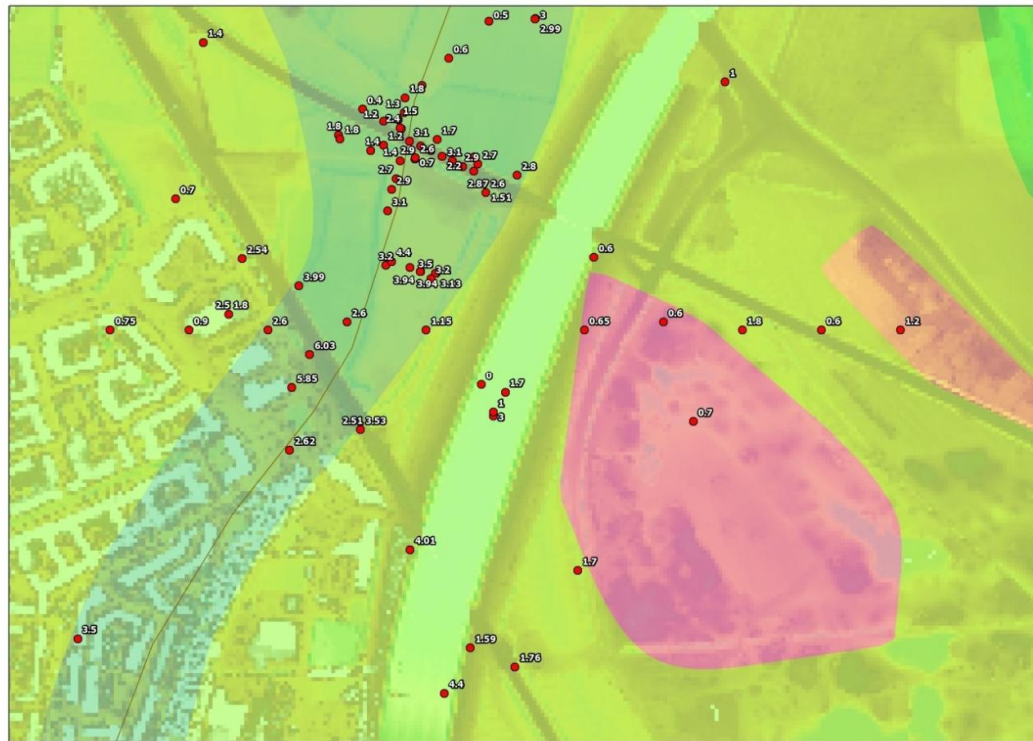
Figuur 4.3 Overzicht van herkenbare landschapseenheden inclusief de Wulverbroek restgeul volgens de geomorfologische kaart van Alterra en [Van den Bos 2014]

Uit de beschikbare data (sonderingen/boringen uit Dino/Bro, boringen van de Universiteit Utrecht, data van ProRail, data van het A27-project) is afgeleid hoe dik de deklaag is en op welke diepte het vaste zand begint. De figuren 4.4 en 4.5 geven de situatie in de driehoek "Tussen de rails".

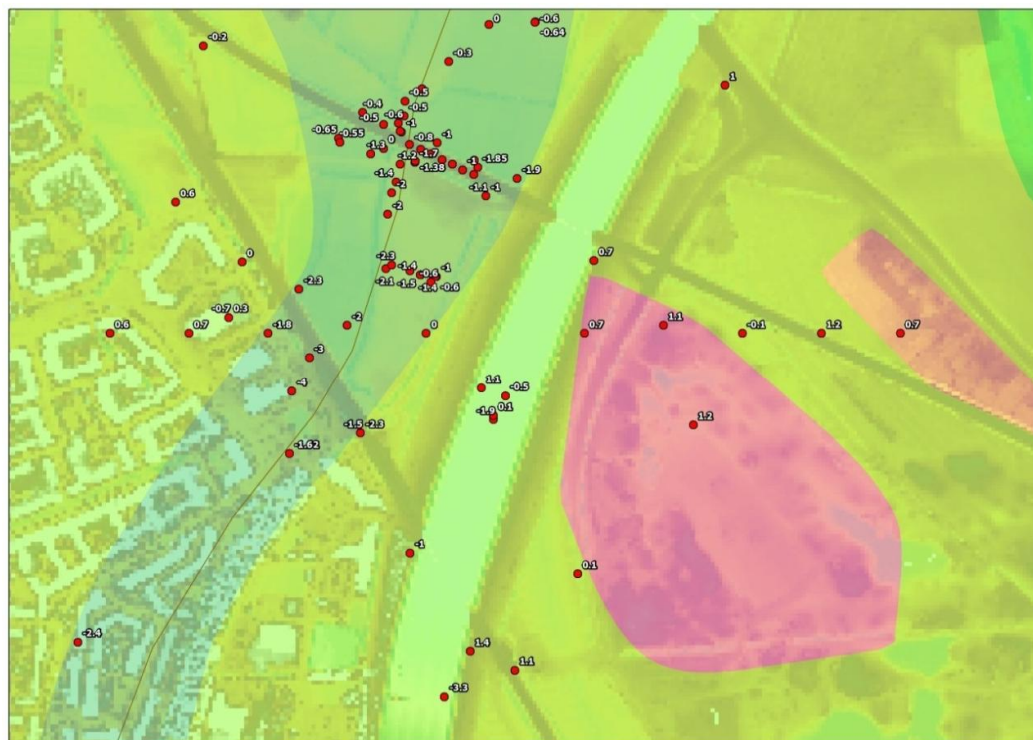
De getallen in Figuur 4.4 tonen dat de dikte van de deklaag in de driehoek sterk varieert in de restgeul, tussen 2,6 en 6 m. Richting de A27 neemt de dikte af naar 1 à 2 m. Richting het westen ligt de dikte eerst nog rond 2 à 3 m en neemt dan af tot minder dan 1 m. De dikte in het komgebied verder in westelijke richting neemt toe tot meer dan 4 m. Ten oosten van de restgeul is de deklaag meestal dunner dan 1 m.

In figuur 4.5 is af te lezen dat de diepte ten opzichte van NAP waarop het zand begint in de restgeul ligt rond -4 tot -1 m NAP, richting de A27 rond -2 tot 1 m NAP en net ten westen van de restgeul rond -1 tot 0.7 m NAP.

De aangegeven opvulling van de restgeul heeft in het gebied van de driehoek een breedte van circa 130 m.



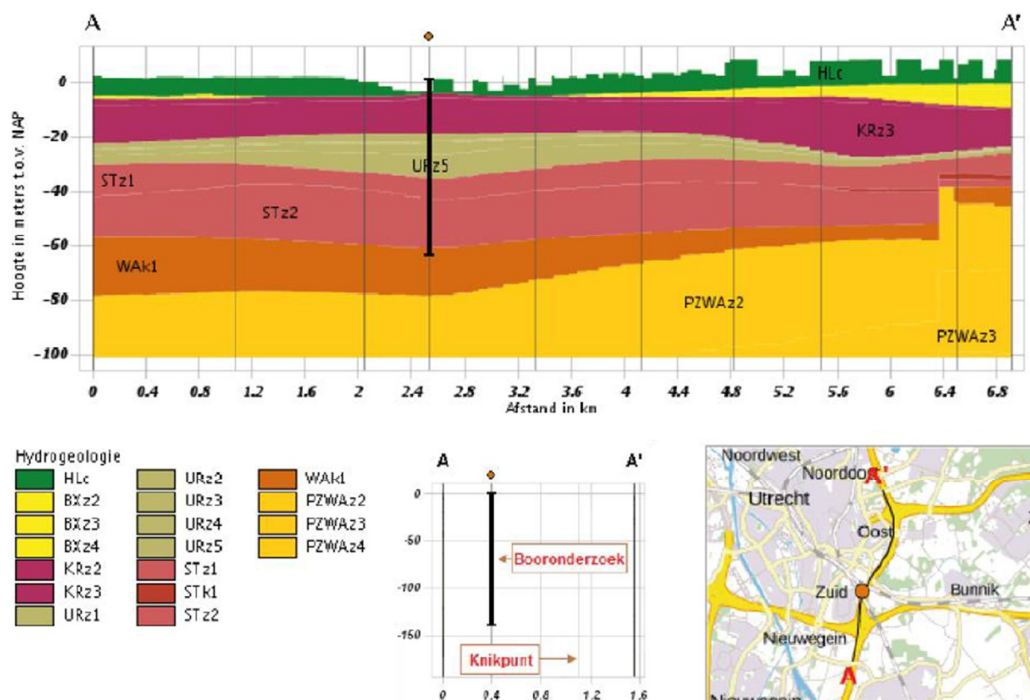
Figuur 4.4 Dikte deklaag per boring/sondering rond terrein "tussen de rails"



Figuur 4.5 Diepte (m NAP) waarop het zand begint rond terrein "tussen de rails"

4.3 Informatie over de diepe grondlagen

In het TNO-rapport [TNO 2017] betreffende het voorkomen van Waalre klei is de diepere bodemopbouw beschreven, zoals weergegeven in Figuur 4.6.



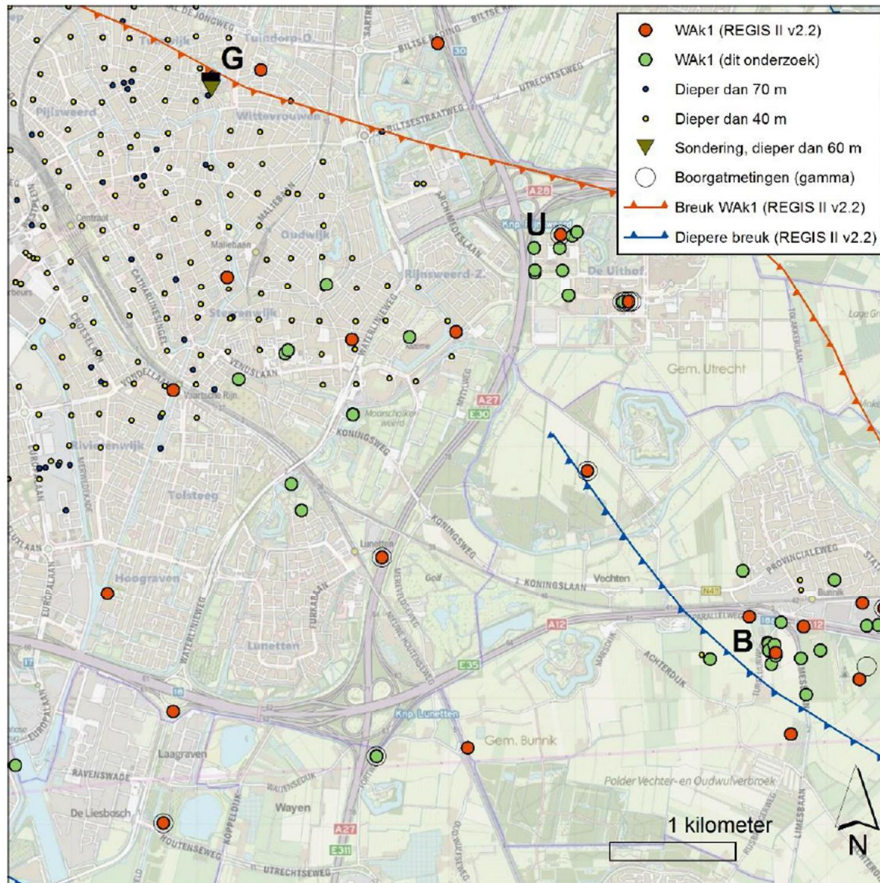
Figuur 4.6 Doorsnede uit REGIS II met formaties en lithologie evenwijdig aan de A27 (DINOLoket, TNO). De aangegeven boring in het profiel is in de jaren rond 1970 gemaakt voor de aanleg van de verdiepte ligging A27. De andere lijnen zijn knikpunten in het ondergrondprofiel

Onder een enkele meters dikke laag fijn eolisch zand (Formatie van Boxtel: BXz2 t/m BXz3) komen van circa NAP – 5 tot – 55 m grofkorrelige pleistocene rivierafzettingen voor, bestaande uit zandige soms grindige afzettingen (Formatie van Kreftenheije: KRz3, Formatie van Urk: URz1, Formatie van Sterksel: Stz1 en STz2). In de Formatie van Sterksel kunnen lokaal voorkomende dunne kleilagen aanwezig zijn.

Van circa NAP – 55 tot – 70 m zijn kleiige soms humeuze afzettingen aanwezig. Deze eerste kleiige eenheid van de Formatie van Waalre (Wak1) is gevormd als komafzettingen van een laaglandrivier uit het Rijn-Maassysteem. In het diepere deel komen zandige geulopvullingen voor.

In het noordelijk deel van het profiel kruist de A27 een geologische breukzone. De ligging van de breuken is aangegeven in figuur 4.7.

Dieper dan NAP – 70 m komen grofkorrelige pleistocene rivierafzettingen voor (Formaties van Waalre en Peize: PZWAz2 t/m PZWAz4).



Figuur 4.7 Vooraf beschikbare informatie van boringen, sonderingen en ligging van breuken Voor de overige getoonde informatie op de kaart wordt verwezen naar [TNO 2017]

4.4 Schematisatie en verwachte waarden van geohydrologische parameters

Volgens informatie uit vooronderzoek van Deltares (zie de gevoeligheidsanalyse in bijlage B van 1230669-000-BGS-0014 van dec 2016,) zijn de geohydrologische parameterwaarden:

- Doorlaatvermogen van het eerste watervoerend pakket: $kD1=1750-2500 \text{ m}^2/\text{d}$
- Hydraulische weerstand van de kleilagen aan de bovenzijde van de Waalre Formatie WAK1: $c=650-10000$ dagen.

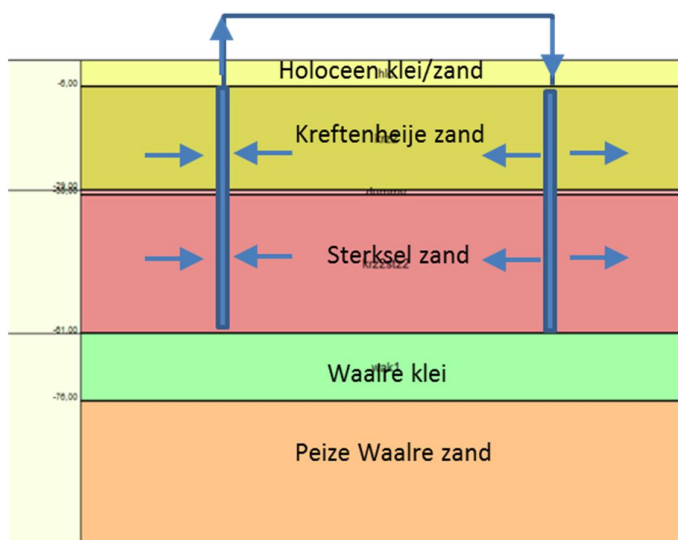
Voor de holocene toplaag bestaande uit kleilig zand, klei en veen van maximaal circa 3 m dikte is door Deltares een hydraulische weerstand geschat van $c = 300$ dagen.

Voorafgaand aan de aanleg van het verdiepte deel van de huidige snelweg A27 is rond 1975 grondonderzoek inclusief 1 diepe boring uitgevoerd. Op die diepe boring is door IWACO een pompproef uitgevoerd [IWACO 1975]. Het onderzoek is uitgewerkt volgens het principe van een volkomen pompput en dat van een onvolkomen pompput en leverde de volgende waarden op voor de geohydrologische parameters van het eerste watervoerende pakket:

- $kD \text{ (WVP1)} = 2.900 \text{ m}^2/\text{d}$
- $\text{Lambda} = 700 \text{ m}$.

Uitgaande van een weerstand van de deklaag van 300 dagen kan men dan een weerstand van de Waalre klei berekenen van 386 dagen. Dat zou vrij weinig zijn. De oude pompproef was echter kortdurend en er waren geen meetpunten onder de Waalre klei geplaatst. De betrouwbaarheid van de resultaten is dus gering.

De geohydrologische bodemschematisatie voor een doorsnede over de A27 Utrecht volgens het vooraf opgestelde bodemmodel is in figuur 4.8 aangegeven. Het watervoerend pakket WVP1 bestaat uit Holoceen zand en zand van de Kreftenheije en Urk Formatie tot circa NAP – 30 à – 35 m (benoemd als het bovenste deel van het watervoerende pakket WVP1-1) waaronder beneden dunne kleilagen zand voorkomt van de Sterksel Formatie (benoemd als het onderste deel van het watervoerende pakket WVP1-2).



Figuur 4.8 Geohydrologisch schema van de bodemopbouw en diepte van de pomp- en retourput

De door Deltares vooraf aan de proef verwachte parameterwaarden zijn in tabel 4.1 vermeld. De bergingsfactor is geschat aan de hand van een verwachte grondmechanische stijfheid van de grondlagen op basis van grondsoort en de diepte van voorkomen.

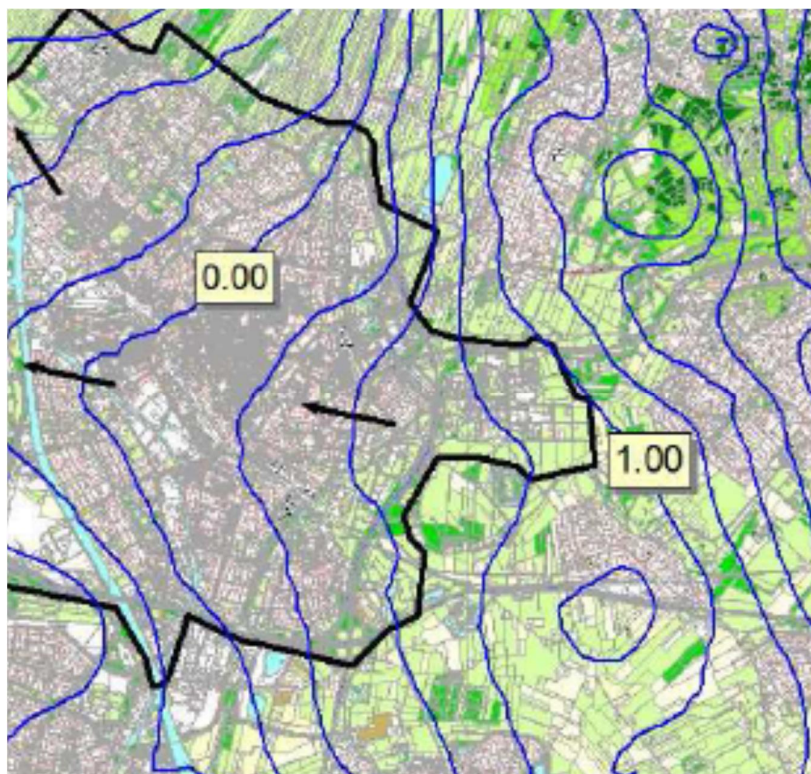
Tabel 4.1 Uit GeoTop en REGIS afgeleide geohydrologische eigenschappen bij proefveld A27 Utrecht

Geologische formaties en afzettingen	Parameter	Dikte	Hydraulische weerstand c	Doorlaatvermogen kD	Bergingsfactor S
		[m]	[dagen]	[m ² /d]	[-]
Holocene klei, lokaal veen	C1	1 à 5	300		$8 \cdot 10^{-3}$
Kreftenheije en Urk, grof zand met grind	kD1-1	30		1.000 à 1.500	$2 \cdot 10^{-3}$
Sterksel, leem- en kleilaagjes	d/kv	var	5		$1 \cdot 10^{-5}$
Sterksel, zand	kD1-2	30		750 à 1.000	$3 \cdot 10^{-4}$
Waalre, klei	C2	15	650 à 10.000		$7,5 \cdot 10^{-4}$
Peize/Waalre, zand	kD2	75		3.500 à 4.500	$4 \cdot 10^{-4}$

4.5 Natuurlijke grondwaterstanden en stroming

Door Gemeente Utrecht is een overzicht van de gemiddelde grondwaterstanden in het eerste watervoerende pakket beschikbaar gesteld. De regionale grondwaterstroming in het eerste watervoerende pakket is globaal oost-west gericht (zie Figuur 4.9).

In het oosten ligt de Utrechtse Heuvelrug, waar grondwateraanvulling vanuit neerslag plaatsvindt. Naar het westen toe wordt het maaiveld steeds lager en zijn van oorsprong drainerende gebieden aanwezig. Het relatief diep-ingesneden Amsterdam-Rijnkanaal heeft een sterk drainerend effect op de omgeving.



Figuur 4.9 Gemiddelde stijghoogten in het eerste watervoerende pakket (m+NAP) (Gemeente Utrecht, 2015).

4.6 Grondwaterkwaliteit en putverstopping

Tijdens de voorbereiding van de proeven is een analyse van de grondwaterkwaliteit verricht op basis van watermonsters die via sondeertechniek zijn verkregen. Op 3 locaties en 5 tot 6 diepten tussen 4 en 50 m beneden maaiveld zijn grondwatermonsters genomen. Het chemisch onderzoek is verricht door KWR [KWR 2018A]. De analyseresultaten zijn vermeld in het betreffende briefrapport [Deltares 2018D].

Het watertype van het grondwater in het eerste watervoerende pakket is anoxisch (ofwel zuurstofarm) grondwater van een calcium(magnesium)bicarbonaathoudend watertype, met een hoog ijzergehalte. De verwachting dat het grondwater in situ zuurstofloos (anoxisch) is, hangt samen met de aanwezigheid van ammonium en afwezigheid van nitraat in het grondwater. Omdat de variatie van de concentraties over de diepte gering is op de onderzoekslocatie, mag worden aangenomen dat hier geen verschil bestaat tussen ondiep en diep grondwater in het eerste watervoerende pakket.

Het optreden van putverstopping is afhankelijk van een groot aantal factoren. Naast de chemie van het grondwater, zijn onder andere de lithologie van het watervoerend pakket, de

aanlegwijze van de put en de duur van de onttrekking van belang. Op basis van specifieke kennis van putverstopping bij KWR is door hen een inschatting gegeven van de kans op putverstopping, met name van retourputten. Dit is gedaan aan de hand van vier verstoppingsindicatoren: troebelheid, de concentraties aan opgelost ijzer, zuurstof en kalk;

1. *Troebelheid van het grondwater (NTU)*

De gemeten troebelheid of turbiditeit van alle geanalyseerde grondwatermonsters was erg hoog (NTU=5 tot 80). De bepalingen zijn echter niet representatief voor het aanwezige grondwater omdat bij de monsternamen via de grondwatermonstersonde waarschijnlijk gronddeeltjes zijn onttrokken en bij de monsternamen vertroebeling is opgetreden door blootstelling aan zuurstof waardoor neerslag van ijzerhydroxiden en van kalk is ontstaan bij ontgassing van koolzuur (CO₂).

2. *IJzer- en zuurstofconcentratie van het grondwater*

De gemeten ijzerconcentraties variëren van laag (2 mg/L) tot zeer hoog (25 mg/L) maar gemiddeld zijn ze aan de hoge kant.

3. *Opgeloste kalk*

De calciumconcentratie is hoog en relatief constant over de diepte.

Vooraf aan de uitvoering van de pomp- en retourproeven zijn op basis van de grondwateranalyses de volgende verstoppingsrisico's geïdentificeerd:

1. *Deeltjesverstopping*

De kans op deeltjesverstopping is naar verwachting niet erg groot.

2. *Verstopping door ijzerhydroxideneerslag*

Op basis van de gemeten ijzerconcentraties is het risico op verstopping door ijzerhydroxideneerslag zeer hoog wanneer menging van onttrokken grondwater dat in situ zuurstofloos is, met aerob water plaatsvindt of door zuurstoftoetreding na onttrekking.

3. *Verstopping door kalkneerslag bij ontgassing*

Bij drukverlaging in het onttrekkingsstelsel kan koolzuur met andere aanwezige gassen ontwijken uit het opgepompte water. De verschuiving van het koolzuur-evenwicht kan tot kalkvorming leiden. De mate waarin ontgassing optreedt, hangt af van het verschil in druk tussen de totale gasdruk in het grondwater op diepte en de minimale druk in het onttrekkingsstelsel. De totale gasdruk in het opgepompte grondwater is tenminste 1,3 atm. Bij deze relatief lage totale gasdruk moet verstopping door ontgassing worden voorkomen door beheersing van de operationele druk in het bemalings- en leidingsstelsel.

Op basis van de analyse van de grondwatersamenstelling op de locatie zijn de risico's voor putverstopping van retourbemaling vooraf aan de proeven hoog ingeschat [KWR 2018A].

5 Gegevens van de meetpunten voor de proeven

5.1 Plaatsingsgegevens van de pompputten PP1 en PP2 en retourput RP3

De locatie en boorgatdata zijn aangegeven in bijlage A. Voor een overzicht van de ligging wordt verwezen naar figuur 3.1 en figuren 5.1 en 5.2.

Pompput PP1 heeft vanwege lokaal voorkomende kleilenzen een filter dat is opgebouwd uit 3 delen met tussenliggende blinde buis:

- PP1 bovenste filterdeel: 17,5 - 29,5 m-MV (14,71 - 26,71 m-NAP).
- PP1 middelste filterdeel: 32,25 - 37 m-MV (29,46 - 34,21 m-NAP).
- PP1 onderste filterdeel: 44 - 60 m-MV (41,21 - 57,21 m-NAP).

Totaal is dus 32,75 m filter geplaatst over een dieptebereik van 42,5 m.

Pompput PP2 heeft een filterstelling van 16 - 30 m-MV (12,74 - 26,74 m-NAP)
Retourput RP3 heeft een filterstelling van 15 - 60 m-MV (12,87 - 57,87 m-NAP).

Voor de inbouwstaten wordt verwezen naar Bijlage G [HvT 2018B].

Rond ieder filter is een omstorting aangebracht van filterzand ($\varnothing 1.4-2.0$ mm). Op diepte van doorboorde kleilagen en over de bovenste meters tot maaiveld is een afdichting gemaakt van kleikorrels (zweklei van het merk Dantoplug).

In de omstorting van elke put is een peilbuis aangebracht waarmee de afpompingsput kan worden bijgehouden [HvT 2018B].

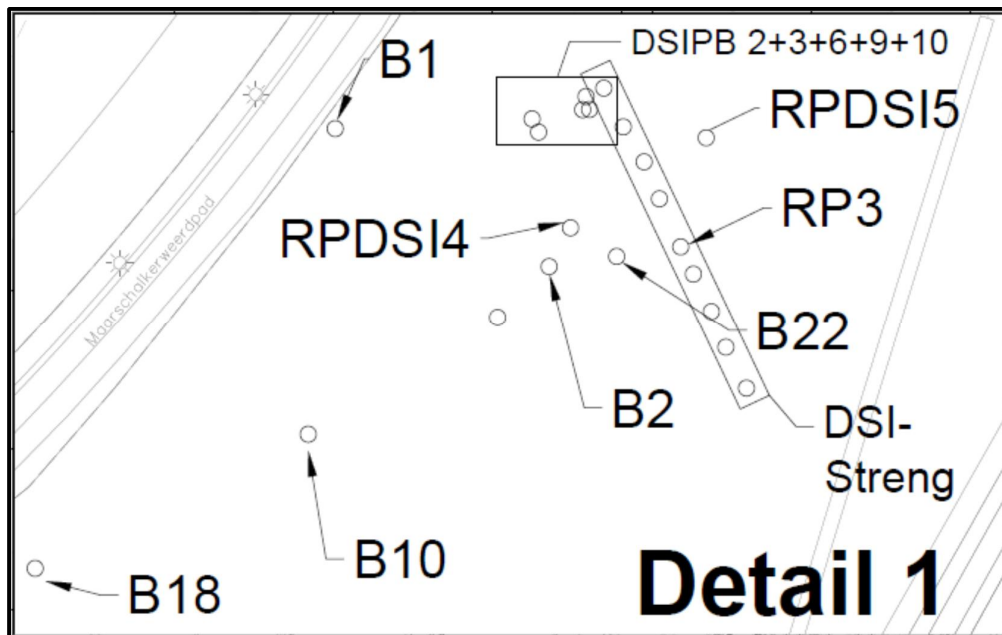
5.2 Plaatsingsgegevens van de DSI-retourfilters

Voor de 2 gerealiseerde DSI-retoursystemen zijn de volgende filters aangebracht:

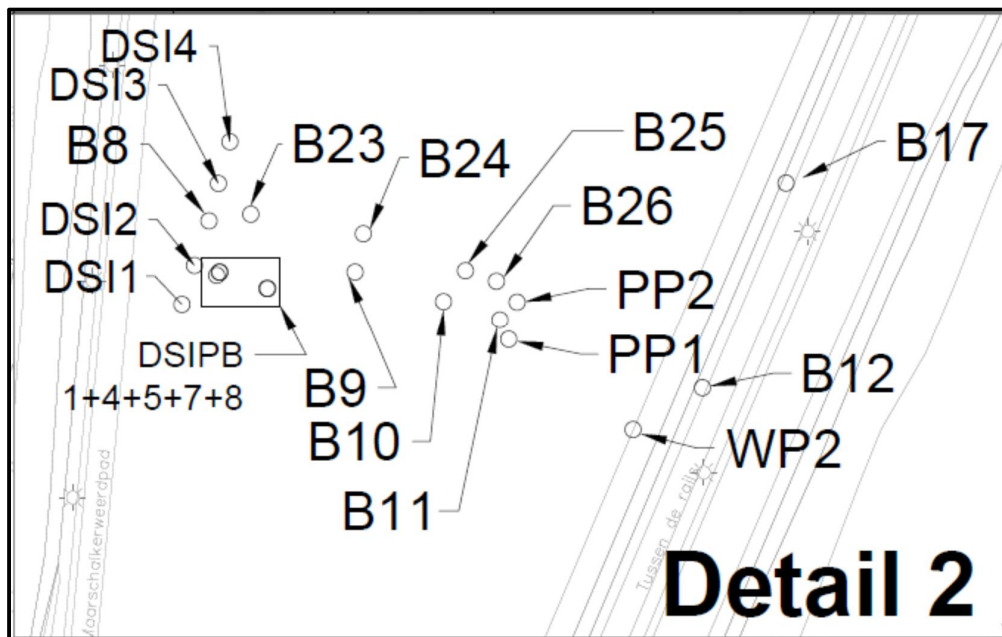
- In streng 1 op het retourveld totaal 8 injectiepunten.
- In streng 2 achter de zuivering totaal 4 injectiepunten.

De locaties en de boordata van de DSI-injectiepunten zijn aangegeven in Bijlage A en in figuren 5.1 en 5.2.

De volgende figuren zijn overgenomen details uit de overzichtstekening in bijlage G [HvT 2018B] waarop de locaties van de DSI-strengen en meetpunten zichtbaar zijn.



Figuur 5.1 Locatie van DSI-streng 1 en meetpunten DSI-PB2/3/6/9/10 op het retourveld [HvT 2018B]



Figuur 5.2 Locatie van DSI-streng 2 en meetpunten DSI-PB1/4/5/7/8 achter de zuivering [HvT 2018B]

5.3 Plaatsingsgegevens van de peilbuizen in de meetraaien

De peilbuizen zijn zoveel mogelijk geplaatst in raaien (zie figuur 3.1):

- Een raai in westelijke richting vanuit de pompputten (B11, B10, B9, B8, B16, haaks op de ligging van de A27).
- Een raai in noordelijke richting vanuit de pompputten (B12, B17, B7, B5, B4, parallel aan de ligging van de A27).
- Een raai in zuidwestelijke richting vanuit de retourput RP3 (B20, B2, B3, B19, B18, B6, globaal evenwijdig aan de verwachte regionale grondwaterstroming).

Peilbuizen B1 (bij de Uithoflijn), B4 (bij Amelisweerd), B6 (bij de boerderij), B21 (nabij de golfbaan), B13, B14 en B15 (in Lunetten) vormen de omgevingsmonitoring bij de pompproef. Met peilbuizen B6, B7, B21 en B14 is de verlaging nabij de spoorlijnen gemonitord.

B23, B24, B25 en B26 zijn op het proeenterrein geplaatst om de verandering van de freatische grondwaterstand tijdens de proeven na te gaan.

De boorlocaties en boordata van de uitgevoerde 26 boorpunten zijn weergegeven in tabel 1 in bijlage A. De toegepaste boormethode (pulsen of zuigboren) is daarin aangegeven. De volgende diepe boringen zijn als puls boring gemaakt: B04, B07, B10 en B19. Voor een toelichting op de boormethode wordt verwezen naar [HvT 2018B].

In de boringen zijn peilbuizen geplaatst, in totaal betreft het 57 peilfilters in 26 boorgaten. Het overzicht over de inbouwstaten is opgenomen in tabel 2 in bijlage A.

Rond elk peilbuisfilter is een omstorting aangebracht van filterzand ($\varnothing 1.4-2.0\text{mm}$). Op diepte van doorboorde kleilagen en over de bovenste meters tot maaiveld is een afdichting gemaakt van kleikorrels (zweklei van het merk Dantoplug).

De gegevens uit de inbouwstaten van de peilbuizen zijn in tabel A.2 verzameld. De peilbuizen zijn landmeetkundig ingemeten ten opzichte van RD. De hoogte van bovenkant buis en de maaiveldhoogte zijn ingemeten ten opzichte van NAP. In de volgende tabel 5.1 is aangegeven hoeveel filters in de diverse geologische lagen zijn afgesteld.

Globaal gezien is gekozen voor het plaatsen van filters in de laag tot 10 m diepte (Holoceen HOL en Formatie van Echteld CEC), filters in de laag tot 20 m diepte (Formatie van Kreftenheije KR), enkele filters in de laag tot 60 m (Formatie van Urk UR en van Sterksel ST) en 4 filters in de zandlaag onder de Waalre klei (WA).

Tabel 5.1 Aantal peilbuizen met globale plaatsingsdiepte d.m.v. aanduiding van geologische laag (HOL= Holoceen zandlaag, CEC=Formatie van Echteld, KR= Formatie van Kreftenheije, UR = Formatie van Urk, STO= Formatie van Sterksel, bovenste deel, WA= Formatie van Waalre)

Geologische laag	aantal	Diepte onderkant laag [m-NAP]
HOL	18	1 a 5
CEC	18	10
KR	14	20
UR	1	35
ST	2	60
WA	4	80
Totaal	57	

Voor het meten van de grondwaterstand zijn automatische drukopnemers ("divers") van het type GDT-S Prime van Eijkelkamp Soil & Water gebruikt. De ingebouwde barometer in de Prime modem zorgt voor het compenseren van de gegevens tot een waterstand. De gegevens van de divers zijn vermeld in bijlage A, tabel A.2.

5.4 Peilbuizen nabij de DSI-retourpunten

Om de ontwikkeling van de grondwaterstanden bij de 2 DSI-infiltratiestrengen (streng 1 op het retourveld en streng 2 achter de zuivering) te meten, zijn bij elke streng 5 extra peilbuizen (aangegeven met afkorting DSIPB) geplaatst ten opzichte van de reeds aanwezige peilbuizen (aangegeven met een B-nummer).

De plaatsing was volgens vooraf beschouwd ontwerp, waarbij:

- 1 enkele meters diep meetpunt op circa 2 m afstand van een DSI-injectiepunt,
- 2 stuks 18 en 20 m diepe meetpunten op circa 2 m afstand op diepte van het injectiepunt en
- 2 stuks 18 en 20 m diepe meetpunten op circa 10 m afstand van een enkel DSI-injectiepunt (idem op diepte van het injectiepunt).

De diepten zijn aangegeven in tabel 3 in bijlage A. De locaties zijn aangegeven in figuren 5.1 en 5.2.

5.5 Meetpunten van waterstand in sloten

Op 2 posities zijn waarnemingspunten (WP) geplaatst in de sloten om na te gaan of de slootpeilen tijdens de proeven veranderen, bijvoorbeeld door de lozingen vanuit de zuivering tijdens de pompproeven. De locaties zijn aangegeven in bijlage A, tabel 4. WP1 ligt in de Maarschalkerweerdwetering langs het fietspad en WP2 in de sloot waarop wordt geloosd (zie figuur 5.2).

5.6 Watermeters

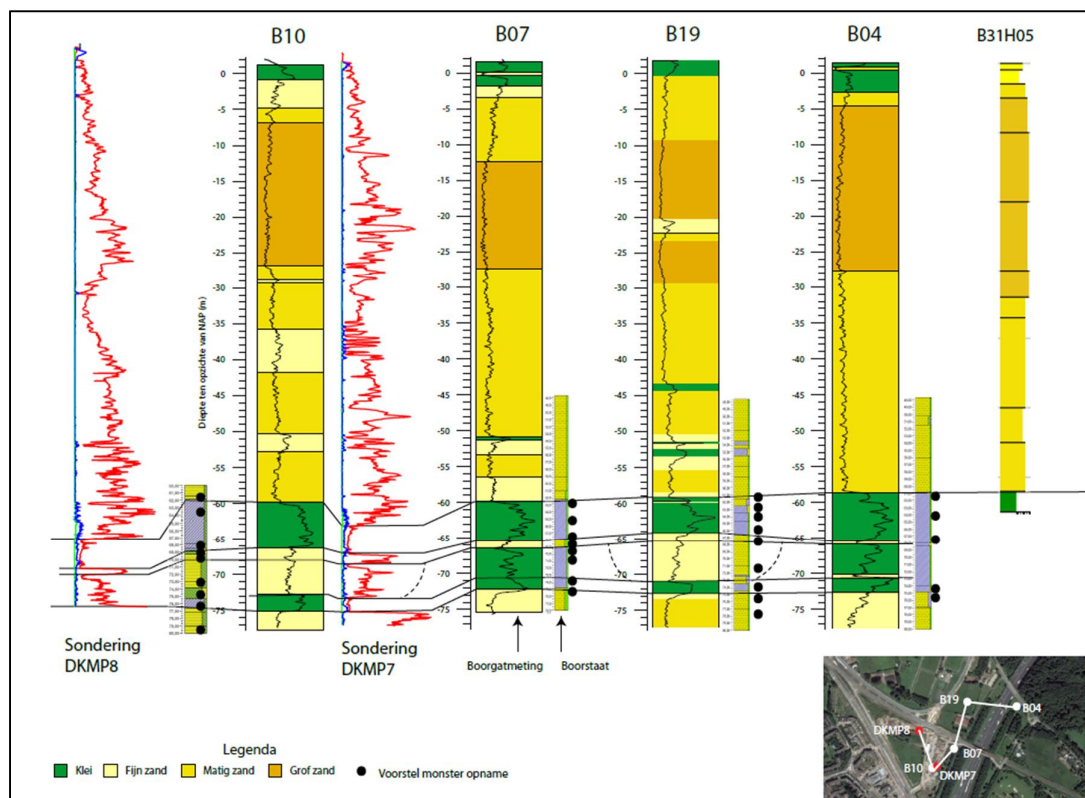
In de afvoerleidingen zijn geijkte elektromagnetische watermeters aangebracht, de eerste in de afvoerleiding direct achter de pompput, de tweede tussen waterzuivering en lozingspunt op het oppervlaktewater. Voor informatie over de watermeters wordt verwezen naar [HVT 2018B]. De gebruikte meters zijn automatisch registrerend. De data werden frequent overgebracht naar een server van Telecontrolnet die op ieder gewenst moment was te raadplegen.

6 Resultaten van de boringen, boorgatmetingen en laboratoriumproeven

6.1 Boorbeschrijvingen en daaruit afgeleide bodemopbouw

De boorbeschrijvingen inclusief de inbouwstaten met filteropstelling en kleiafdichtingen zijn weergegeven in [HvT 2018B] dat als bijlage G is bijgevoegd bij voorliggend rapport.

Een overzicht van de uitkomst van de boorcampagne die in de maand januari 2018 is uitgevoerd, is geschetst in de volgende figuur 6.1 waarin de boorstaten van de uitgevoerde boringen van de diepe peilbuizen zijn getoond inclusief een enkele uitgevoerde sondering en een boring uit DINOloket.



Figuur 6.1 Profiel van de bodemopbouw met uitgevoerde diepe boringen voor peilbuizen onder de Waalre klei

Uit de boorbeschrijvingen is de volgende beschrijving van de bodemopbouw op de onderzoekslocatie "Tussen de rails" afgeleid:

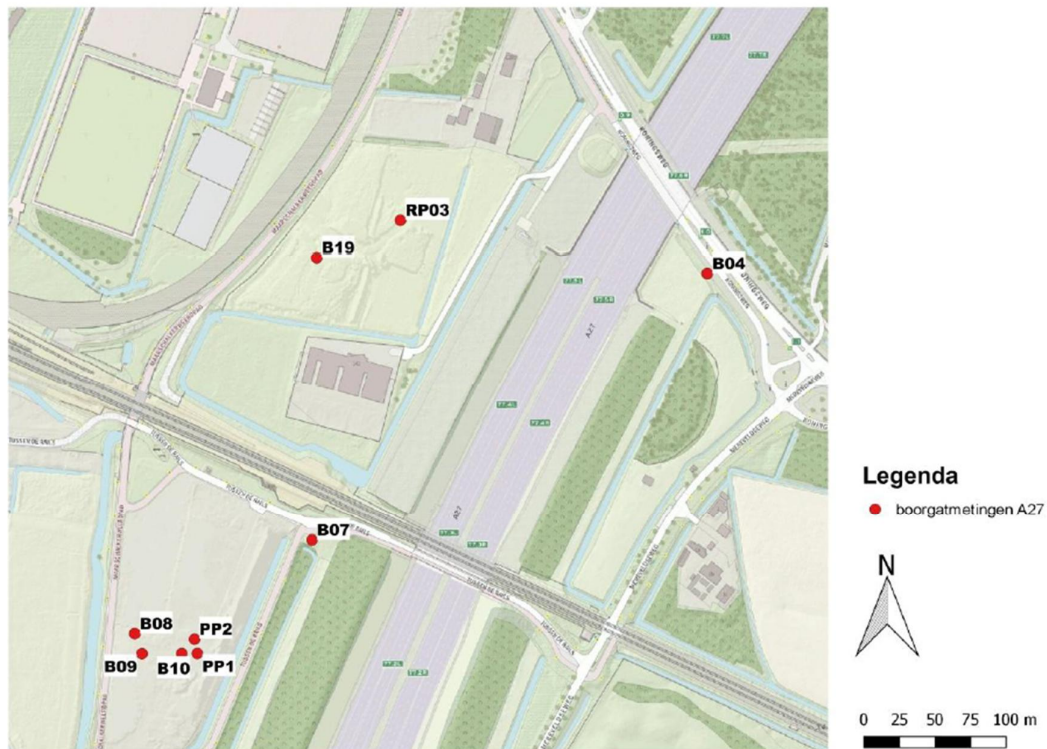
- Aan maaiveld ligt een kleiige afdekkende laag (Holoceen) van 1 tot enkele meters dikte.
- Daaronder wordt enkele meters fijn tot matig fijn zand gevonden (Holocene afzettingen van Echteld en pleistocene Formatie van Boxtel) tot NAP – 5 à – 10 m diepte.
- Vervolgens komt grof zand, soms grindhoudend, voor (afgezet door vlechtende rivieren in de Krefthenheije en Urk Formatie) tot NAP – 27 à – 30 m.
- Daaronder is fijn tot matig fijn zand aanwezig (Formatie van Sterksel, zelfde type afzettingen) tot NAP – 55 à – 60 m waarin op wisselende diepte ook dunne kleilagen voorkomen. De onderkant van deze lagen bij de overgang naar de Waalre Formatie bevat

over enkele meters dikte verkitten zanden (die bijzonder lastig te sonderen of te steken waren).

- De kleilaag van de Waalre Formatie ligt in het onderzoeksgebied tussen NAP – 55 en – 75 m (variërende diepte). De laag is globaal 15 m dik. De top van de diepere Waalre zanden wordt gevormd door een fijnkorrelige (lemige) laag van 2 tot 5 m dik. Daaronder wordt in alle boringen een kleilaag van circa 3 m dikte gevonden. Vervolgens een laag van 6 tot 8 m dik bestaande uit zeer fijn, lemig zand met kleiige bijmenging of laagjes. Daaronder is een laag klei en veen aangetroffen van 1 tot 3 m dik, naar het noorden toe met grotere dikte.
- Onder de Waalre klei bevindt zich eerst fijn zand en dieper matig tot grof zand (Formatie van Peize/Waalre).

6.2 Boorgatmetingen

Op de locaties van diepe zuigboringen en pulsboringen zijn boorgatmetingen verricht. De 9 locaties zijn in figuur 6.2 aangegeven [Deltares 2018B]. De boorgatmetingen zijn uitgevoerd in de zuigboorgaten voorafgaand aan de afwerking van de 3 putten (PP1, PP2, RP3), twee boringen (B08 en B09) en in de pulsboorgaten voor de plaatsing van de 4 diepe peilbuizen (B04, B07, B10 en B19).



Figuur 6.2 Overzicht van locaties waar boorgatmetingen zijn verricht [Deltares 2018B]

Tussen de Kreftenheije en Sterksel zanden komen plaatselijk kleiige lagen voor. Op basis van de uitkomsten van een vergelijking van de boorbeschrijvingen die in het veld zijn gemaakt en de boorgatmetingen zijn de diepten van de filters van de pompputten PP1 en PP2 bepaald binnen trajecten waar zand is beschreven. De stroming van het grondwater zal hier naar verwachting goed zijn. Om hydraulische kortsluiting te voorkomen zijn door HvT afdichtingen m.b.v. zwelklei (Dantoplug) geplaatst waar kleilagen voorkomen.

Het filter van retourput RP3 is in het watervoerend pakket geplaatst over een zo lang mogelijk traject door de voorkomende tussenkleilagen heen.

6.3 Flowmetingen in de putten

Na realisatie van de putten PP1, PP2 en RP3 zijn 'flowmetingen' (debietmetingen) verricht van de capaciteit van elke put. Voor gedetailleerde beschrijving van de boorgat- en flowmetingen wordt verwezen naar [Deltares 2018B].

Uit de flowmetingen komt naar voren dat het bovenste deel van het watervoerende pakket over het algemeen doorlatender is dan het onderste deel. Volgens de boorgatmetingen komt tussen het bovenste en het onderste deel van het watervoerende pakket een pakket kleilagen voor rond een diepte van 40 m-MV. Maar deze kleilagen zijn volgens een vergelijking van de boorbeschrijvingen van de boorbeschrijvingen van de diepe peilbuizen in de raaien niet aaneengesloten omdat deze op de diverse locaties op verschillende diepten voorkomen.

De volgende kenmerken van de putten zijn afgeleid uit de uitgevoerde metingen:

PP1 (zie figuur 6.3):

- De totale filterlengte van PP1 bedraagt 45 m. De put staat over de volle dikte van het eerste watervoerende pakket. De put is opgebouwd uit drie filterdelen; van 17,5 – 29,5 m –MV, 32,5 – 37 m –MV en van 44 – 60 m –MV (met MV op 2,79 m + NAP). Hieronder is nog 1 m zandvang geplaatst.
- De flowmeting is verricht bij een onttrekkingsdebiet van 50 m³ per uur en 250 m³ per uur.
- Circa 40% van de flow komt uit het bovenste 12 m lange filterdeel van het watervoerende pakket (3,3% per meter) en 20% uit het 4,5 m lange filterdeel daaronder (4,4% per meter), 40% uit het 16 m lange filtertraject van het onderste filter (2,5% per meter).

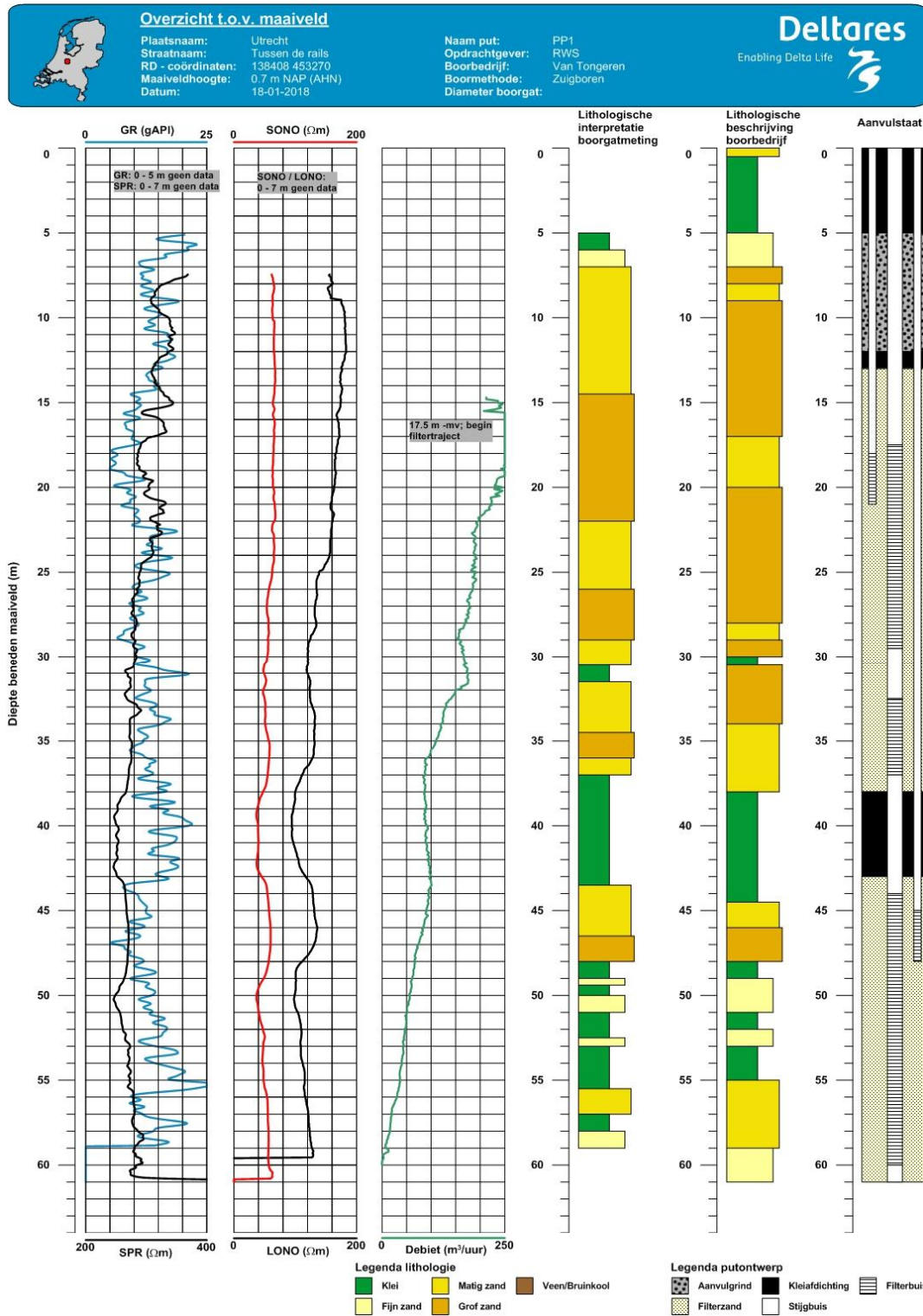
PP2 (zie figuur 6.4):

- De totale filterlengte van PP2 bedraagt 14 m. De put staat over de halve dikte van het eerste watervoerende pakket. De put is opgebouwd uit 1 filterdeel; van 15,5 – 29,5 m –MV (met MV op 2,76 m + NAP). Hieronder is nog 1 m zandvang geplaatst.
- De flowmeting is verricht bij een onttrekkingsdebiet van 50 en 150 m³ per uur.
- Circa 80% van de flow komt uit het 7 m lange bovenste deel van het filter (11,4% per meter en 20% uit de onderzijde 7,5 m van het filter (2,6% per meter).

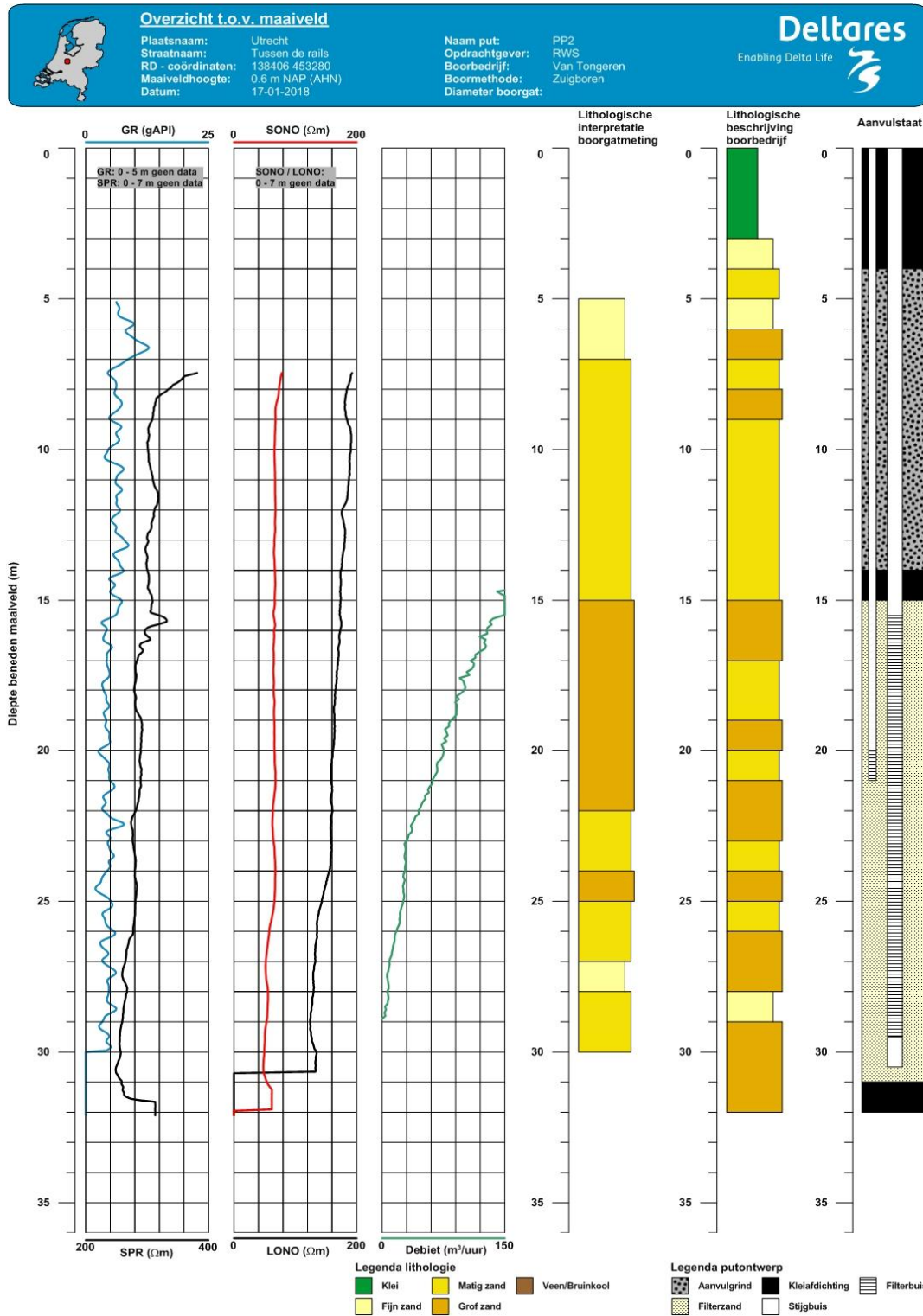
RP3 (zie figuur 6.5):

- De totale filterlengte van RP3 bedraagt 45 m. De put staat over de volle dikte van het eerste watervoerende pakket. De put is opgebouwd uit een doorlopend filter van 15,5 – 60,5 m –MV (met MV op 2,63 m + NAP). Er is geen zandvang geplaatst.
- De flowmeting is verricht bij een onttrekkingsdebiet van 80 m³ per uur.
- Circa 30% van de flow komt uit het 10 m lange bovenste deel (3% per meter), 45% uit het 14 m lange middelste deel (3,2% per meter) en 25% van de flow uit het 21 m lange onderste filterdeel (1,2% per meter).

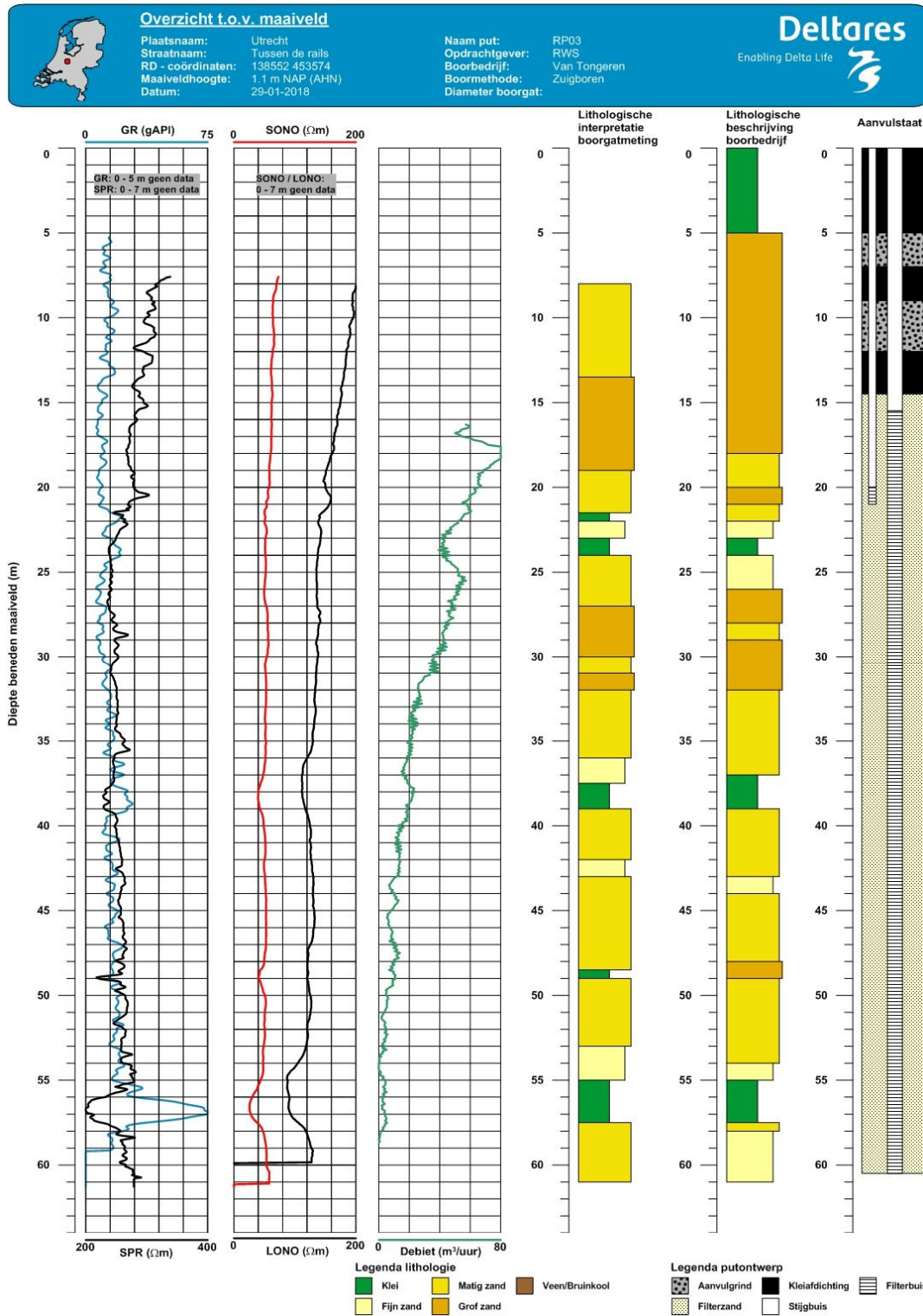
Uit de flowmetingen volgt dat de zandlagen van de Formaties van Kreftenheije en Urk een factor 2,5 à 3,5 doorlatender zijn dan de zandlagen van de Sterksel Formatie. Uit de metingen in PP2 volgt dat de doorlatendheid voornamelijk wordt bepaald door voorkomende grindhoudende groffe zandlagen.



Figuur 6.3 Boorgatmetingen in PP1, inclusief de Flowmetingen van maart (door Q-Flow bij een onttrekking tijdens de meting van 250 m³ per uur) [Deltares 2018B]



Figuur 6.4 Uitwerking van de boorgatmeting in PP2, inclusief de flowmetingen van maart (door Q-Flow bij een onttrekking tijdens de meting van 150 m³ per uur) [Deltares 2018B]



Figuur 6.5 Uitwerking van de boorgatmeting in RP3, inclusief de flowmetingen in maart (door Deltares bij een onttrekking van 80 m³ per uur) [Deltares 2018B]

6.4 Putcapaciteit

Uit de verlaging en het debiet tijdens de flowmetingen in de pompputten is de putcapaciteit berekend. Hiermee kan de opbrengst van de verschillende putten tijdens de proeven worden nagegaan. Dit kan een maat zijn voor de optredende putverstopping. De verlaging is gemeten in de peilbuis die in de omstorting van elke put staat afgesteld.

Locatie	Datum proefneming	Verlaging grondwater [m] ^{*)}	Pompdebiet [m ³ /uur]	Putcapaciteit [m ³ /u/m]
PP1	11-02-2018 09:00	4,60	255	55,4
PP2	08-03-2018 08:00	3,95	150	38,0
RP3	06-04-2018 08:00	1,23	67 à 50 ^{**)}	40,7 à 54,5
RP3	30-04-2018 02:00	1,89	67 à 50 ^{**)}	26,5 à 35,5 ^{***)}

Figuur 6.6 Putcapaciteit van de 3 pompputten

*) verlaging gemeten in de peilbuis in de omstorting

***) debiet waarschijnlijk kleiner dan de watermeterregistratie aangaf door drukverlies in de lange retourleiding die als afvoer naar de zuivering werd gebruikt.

***) capaciteit na regeneratie van putverstopping

De putcapaciteit van retourput RP3 is in de eerste periode van de retourproeven teruggelopen. De aangegeven putcapaciteit op 30 april is lager ondanks de tussentijds uitgevoerde regeneratie van de put na de opgetreden verstopping.

6.5 Doorlatendheidsproeven op de steekmonsters uit de pulsboringen

De resultaten van de laboratoriumproeven van doorlatendheid en korrelverdeling van de verschillende steekmonsters die uit de pulsboringen zijn genomen, zijn gerapporteerd in [Deltares 2018C].

7 Verloop van de proeven, grondwaterstanden en debieten

7.1 Logboek van de pompproeven

Het logboek van de uitgevoerde pompproeven is opgenomen in het eerste deel van bijlage D. Een korte samenvatting met het verloop van de proeven inclusief debietregistratie is weergegeven in Tabel 7.1.

De proeven zijn volgens het vooraf geplande schema uitgevoerd [Deltares 2017A]. De tabel geeft de standen van de watermeters aan bij de pompput en na de zuivering. De laatste meter is niet erg zuiver vanwege het aan en uitslaan van de pomp die de lozing verzorgde uit de bufferbak. Uit de flow bij de pompput is het totaal verpompte volume bepaald. Tevens is geëvalueerd wat het gerealiseerde gemiddelde debiet is geweest tijdens de uitgevoerde proeven, namelijk 255 m³/u tijdens de proef op de volkomen pompput PP1 en 150 m³/u tijdens de pomp/stopproeven op de onvolkomen pompput PP2. Aan het eind van de proevenserie op PP2 is nog kortdurend opgeschaald naar 250 m³/u.

Het onttrokken water is geloosd via een zuivering op oppervlaktewater op circa 100 meter afstand van de onttrekking. De watermeter achter de zuivering geeft een verschil van 14% met de watermeter na de pompput. De lozing wordt gevoed via een aan-/uitschakelende pomp wat leidt tot een meefout. Het gerealiseerd debiet is vastgesteld op basis van de watermeter achter de pompput.

Tabel 7.1 Samenvatting van tijdstippen en debieten van uitgevoerde pompproeven

Pompproeven						
Datum [dd-mm]	Tijd [hh:mm]	Watermeter bij pompput [m ³]	Watermeter na zuivering [m ³]	Totaal verpompt [m ³]	Logboek van verrichte activiteiten	Gerealiseerd debiet [m ³ /u]
Pompproeven PP1						
10-Feb	08:45	1.860.297	558.609		start 12 dagen PP1	
22-Feb	08:45	1.933.826	632.329	73.529	eind 12 dagen PP1	255,3
Pomp- en stopproeven PP2						
08-Mar	09:00	1.933.826	632.329		begin halve dag PP2	
08-Mar	21:00	1.935.651	634.406	1.825	eind halve dag PP2	152,0
12-Mar	08:00	1.935.651	634.406		begin hele dag PP2	
13-Mar	08:00	1.939.253	638.497	3.602	eind hele dag PP2	150,0
14-Mar	08:00	1.939.253	638.497		begin 3 dagen PP2	
17-Mar	08:00	1.950.057	650.877	10.804	eind 3 dagen PP2	150,1
21-Mar	08:00	1.950.057	650.877		begin 6 dagen PP2	
27-Mar	08:00	1.971.159	675.133	21.102	eind 6 dagen PP2	146,5
29-Mar	10:00	1.971.159			begin opschalen PP2	147
29-Mar	11:00				2e opschaling PP2	204
29-Mar	12:00				3e opschaling PP2	252
29-Mar	16:00	1.972.502		38.676	einde proeven op PP2	

7.2 Logboek van de retourproeven

Het logboek dat door Deltares tijdens de uitgevoerde retourproeven is bijgehouden, is in het tweede deel van bijlage D opgenomen.

7.2.1 Retourproeven op traditionele retourput RP3

De retourput RP3 heeft een filter over de volledige dikte van het watervoerende pakket waarin water via een valpijp wordt ingevoerd. Het water is aangevoerd via een lozingsleiding vanaf pompput PP2.

Na uitvoering van een pompproef en een flowmeting op RP3, is de retourproef in bedrijf geweest van 10 april 2018 tot en met 25 mei 2018. In deze periode is het debiet van de proef eerst constant gehouden op 50 m³/u en vervolgens enkele keren opgeschaald. Bij het opschalen van het infiltratiedebiet in RP3 boven 50 m³/u bleek de stijghoogte in de put meer dan evenredig toe te nemen.

Om de situatie te beoordelen is overleg met KWR gevoerd om mogelijke putverstopping te beoordelen. Daarbij is een verbeterde opstartprocedure van retourproeven met spuien van de leiding aan de aannemer voorgesteld. Op 30 april is een frequentieregelaar bij de elektrische voeding van de onderwaterpomp geplaatst om de opvoerhoogte te beperken en een ontgassingsvat bij de retourput geplaatst. Op 16 mei is het ontgassingsvat aangepast om de ontluchting te verbeteren.

Een korte samenvatting met het verloop van de proeven inclusief debietregistratie is weergegeven in Tabel 7.2. De debietregistratie met drukopbouw in de retourput is tevens weergegeven in de figuren in paragraaf 7.4.

Tabel 7.2 Samenvatting van tijdstippen en debieten van uitgevoerde retourproeven op traditionele retourput RP3

Retourproeven				
dag [dd-mm]	tijd [hh:mm]	Logboek van de verrichte activiteiten	Gerealiseerd debiet [m ³ /u]	Stijghoogte in omstorting [mNAP]
proeven op retourput RP3				
05-Apr	09:20	start pompproef op RP3		
06-Apr	09:10	eind pompproef op RP3	50 à 67 ²	-0,7
09-Apr	08:00	start RP3 flowmeting		
09-Apr	10:30	eind RP3 flowmeting	51 ³	?
10-Apr	13:00	start retourproef PP2>RP3 met snel verstoppende retourput		+1,2
13-Apr	14:30	eind PP2>RP3 retour	51 tot 45	+2,3
16-Apr	13:00	start PP2>RP3 retour		
16-Apr	15:30	eind PP2>RP3 retour	51,6	+2
18-Apr	05:00	start PP2>RP3 retour	60 tot 42	+2
23-Apr	11:30	stop wegens lekkage van de leiding		
23-Apr	11:45	herstart PP2, door lucht in leiding te veel drukopbouw	108	+2,3

² De debietregistratie heft plaatsgevonden via de watermeter achter de zuivering. Deze watermeter vertoont een afwijking omdat de lozing geschiedt via een niet-continue, pompgestuurde afvoer uit de zuivering.

³ idem

Retourproeven				
dag [dd-mm]	tijd [hh:mm]	Logboek van de verrichte activiteiten	Gerealiseerd debiet [m ³ /u]	Stijghoogte in omstorting [mNAP]
23-Apr	12:00	monstername PP1 t.b.v. wateranalyse	108	+2,3
26-Apr	10:00	einde PP2	108	
26-Apr	10:00	start schoonpompen	150	-1,25
29-Apr	00:00	einde schoonpompen		
30-Apr	00:10	start capaciteitstest RP3	50 à 67	-1,35
30-Apr	11:35	eind capaciteitstest RP3		
30-Apr	12:00	Plaatsen frequentieregelaar en ontgassingsvat		
30-Apr	14:40	start PP2>RP3 retour	50	+1,35
04-May	14:40	opschalen PP2>RP3 retour	100	+2,35 à 3,4
05-May	09:00	terugschalen PP2>RP3 retour	50	+2,25
07-May	13:22	schoonpompen RP3	108	-1
09-May	12:00	Einde schoonpompen RP3	28	
16-May		Aanpassen ontgassingsvat		
16-May	11:20	Start retour, met verlopend debiet	65 à 54	
18 mei	15:00	Opschalen	69	
22 mei	15:00	Opschalen	81	
23 mei	09:00	Opschalen	93	

7.2.2 Retourproeven op DSI® retoursystemen

De DSI® retourproef is uitgevoerd door het onttrekken en retourneren van grondwater in het DSI-retoursysteem. De DSI® retourproef is uitgevoerd op 2 locaties. Er zijn strengen aangelegd waarin de retourfilters op ca. 6 à 7 meter van elkaar staan.

Streng 2 lag achter de zuivering op circa 55 m afstand van de pompput PP2 en is uitgevoerd met 4 DSI-filters. Streng 2 is belast met 50 m³/u in een periode van 28 mei tot 04 juni 2018. Streng 1 lag op het retourveld op circa 340 m afstand van de pompput en is uitgevoerd met 8 DSI-filters.

Streng 1 is belast met 50 m³/u in de periode van 04 juni tot 12 juni 2018 waarna is opgeschaald naar 80 m³/u. Bij een hoger debiet ontstond langloopsheid bij een ondiep geplaatst filter. In de periode van 21 juni tot 29 juni 2018 is verder gegaan met retourneren op 7 filters met 80 m³/u waarna in stappen is opgeschaald naar 180 m³/u. Bij belasten met 150 m³/u op 7 filters barstte nogmaals 1 filter op. Een korte samenvatting van het verloop van de proeven inclusief debietregistratie is weergegeven in tabel 7.3.

Tabel 7.3 Samenvatting van tijdstippen en debieten van uitgevoerde retourproeven op DSI-retoursystemen

Retourproeven				
Datum [dd-mm]	tijd [hh:mm]	Logboek van verrichte activiteiten	Gerealiseerd debiet [m ³ /u]	Druk in de leiding [bar]
start proeven op retourput RP3				
28-May	14:15	DSI retour op streng 2 met 4 filters nabij zuivering	50	0,1
04-June	09:00	DSI retour op streng 1 met 8 filters in retourveld met opschalen naar hogere debieten	50 tot 80	0,1
21-June		DSI-retour op streng 1 met 7 filters	80	0,1 > 0,2 > 0,4
29-June		DSI-retour op streng 1 met 6 filters	150 tot 180	> 1
29-June	10:00	Einde proeven		

7.3 Registratie van debieten

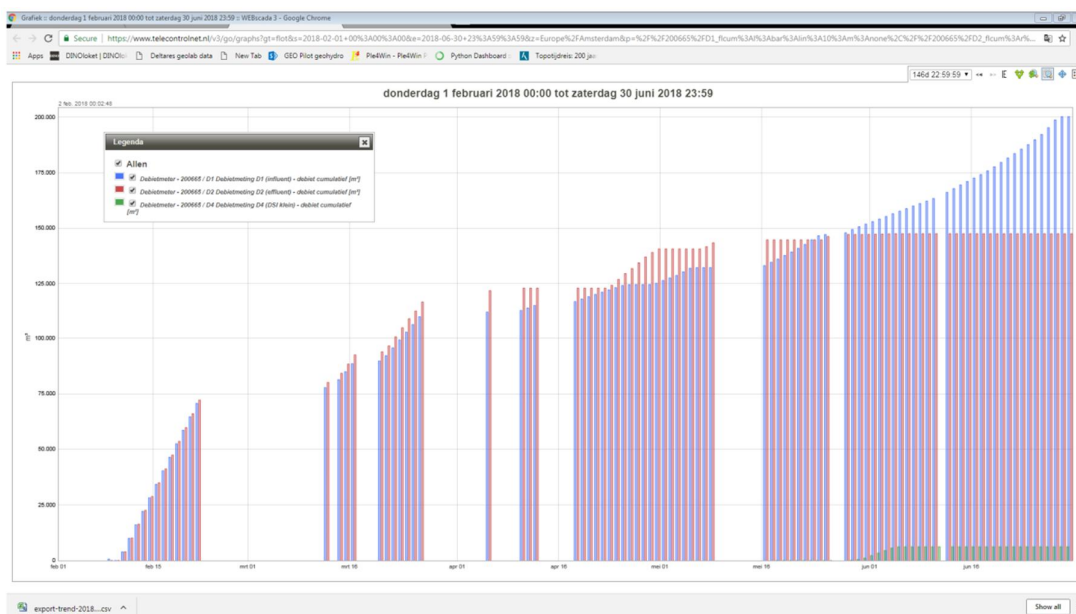
Met de geïnstalleerde watermeters zijn continu de hoeveelheden water geregistreerd die werden verpompt. In grafiek 7.1 zijn de verpompte hoeveelheden weergegeven.

In blauw is het totaal opgepompte volume getoond. In rood is het totaal via de zuivering op oppervlaktewater geloosde aandeel aangegeven.

De lozingen vonden voor het grootste deel plaats tijdens de pompproeven gedurende de eerste twee maanden van 10 februari tot 29 maart. Daarna was in principe sprake van integrale retourbemaling. Alleen bij schoonpompen van retourputten en spuien van de retourleiding voor opstart van een proef vond lozing plaats via de zuivering op het oppervlaktewater.

Volgens de metingen van de watermeter bij de pompputten werd tijdens de pompproeffasen $73.529 + 42.804 = 116.524 \text{ m}^3$ geloosd. Volgens de meting bij de watermeter achter de zuivering was het totale volume 6,5 % groter. Bij de zuiveringsstap is het water echter belucht en werd de bufferbak intermitterend leeg gepompt waardoor de watermeter na de zuivering meer aangeeft dan werkelijk is opgepompt.

Tijdens de proevenserie met retourbemaling is de retourput op enkele momenten schoon gepompt. Volgens debietregistratie is uiteindelijk 147.537 m^3 geloosd. Het schoonpompen betrof volgens registratie een hoeveelheid van 31.013 m^3 . Naar onze indruk is die geregistreerde hoeveelheid niet correct omdat er niet zo lang is gepompt. Het is waarschijnlijk dat de registratie onzuiver was door herhaaldelijk aan/uit springen van de effluentpomp bij de zuivering. De pomp heeft in totaal namelijk slechts enkele dagen met een debiet van circa $80 \text{ m}^3/\text{uur}$ gewerkt.



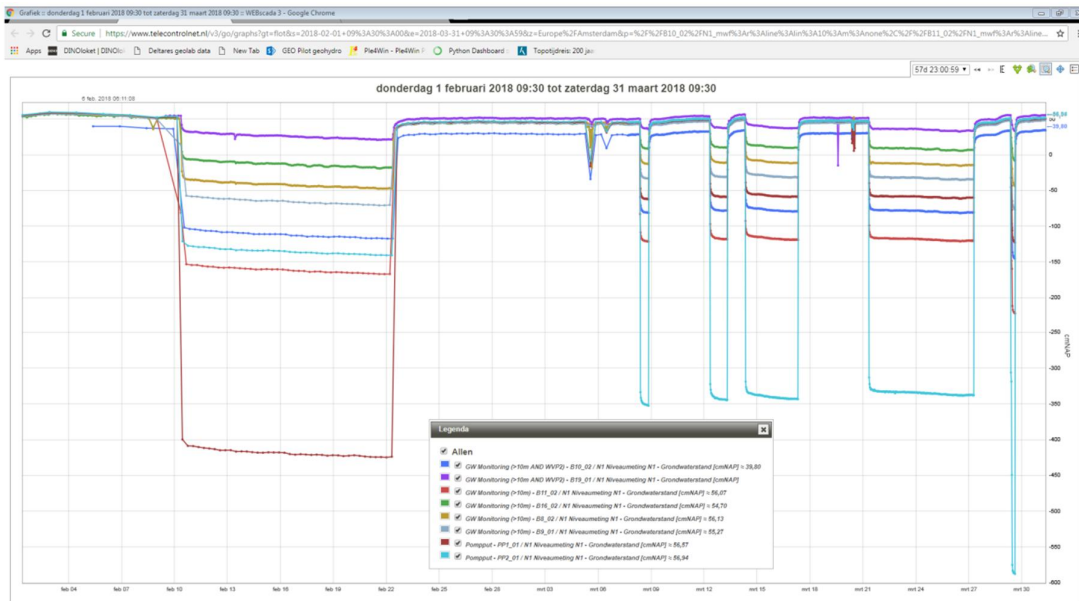
Figuur 7.1 Overzicht van cumulatief debiet dat opgepompt is (blauw) en dat via de zuivering is geloosd (rood). Het verschil is het aandeel dat is geretourneerd in de bodem.

7.4 Registratie en opslag van grondwaterstanden en elektromagnetische debietmeters

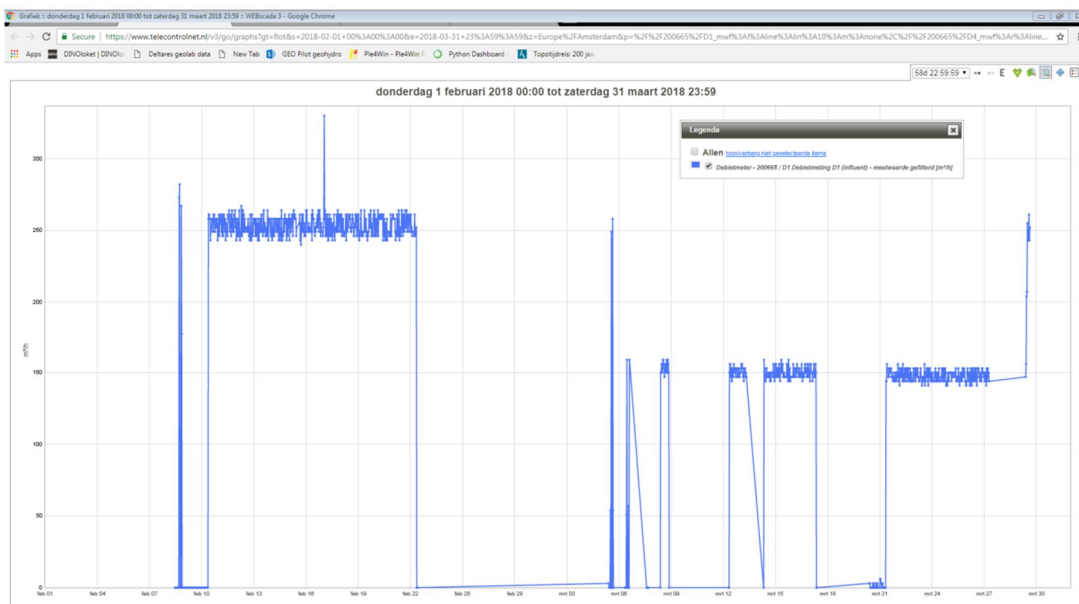
Bij de plaatsing van de peilbuizen is in alle meetpunten automatische registratieapparatuur aangebracht. Deze apparatuur bestond uit een drukopnemer of “diver” (Van Essen Instruments) en een modem voor telemetrische communicatie (Eijkelkamp eSense). Elke diver is aangebracht op een geregistreerde inhangdiepte ten opzichte van bovenkant peilbuis. In elk modem vindt luchtdrukmeting plaats ter compensatie van luchtdrukverschillen in de waterstandsmetingen. De gecompenseerde metingen zijn door het modem met ingestelde frequentie (standaard 1 minuut en tijdelijk voor enkele meetpunten in de tweede serie pompstopproeven op 5 seconden) doorgestuurd naar een server (Telecontrolnet). Eijkelkamp heeft een internet platform ingericht (Eijkelkamp Carefree) waar de data near-real-time kunnen worden opgevraagd en meetreeksen van meerdere meetpunten tegelijk in tijd-stijghoogtegrafieken kunnen worden gevisualiseerd. Ook de informatie van de elektromagnetische debietmeters is verstuurd naar en bewaard in Telecontrolnet en de data konden via Eijkelkamp Carefree worden uitgelezen.

In figuur 7.2 zijn verlagingen aangegeven die in enkele geselecteerde meetpunten in een raai vanuit de pompputten in westelijke richting optreden. In figuur 7.3 is een weergave gegeven van het verpompte debiet in pompputten PP1 (pompproef fase 1) en PP2 (pompproef fase 2) in februari en maart 2018.

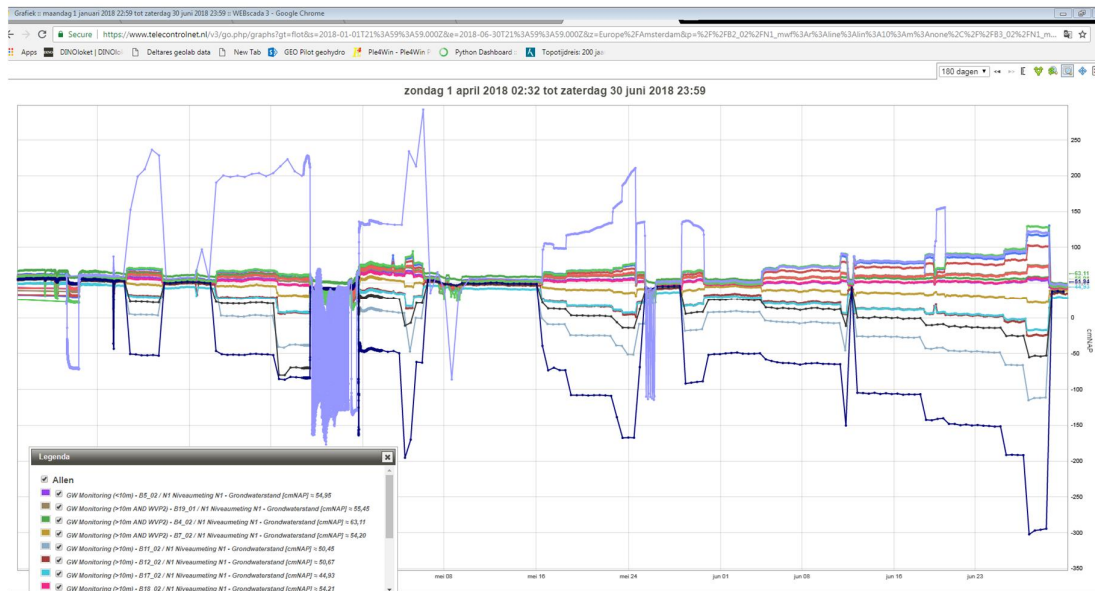
Hetzelfde is gedaan voor de peilbuizen rond de retourput die in april tot mei heeft gefunctioneerd (figuur 7.4) en voor de DSI-retoursystemen die in juni werkten. De verpompte debieten zijn weergegeven in figuur 7.5.



Figuur 7.2 Verlaging in enkele peilbuizen in de westelijke meetraai. Februari: pompproef fase 1 op PP1, Maart: pomp-stopproeven fase 2 met proeven van verschillende duur op PP2



Figuur 7.3 Verpompte debieten tijdens de pompproeven. Februari: pompproef fase 1 op PP1 met 255 m³/uur, Maart: pomp-stopproeven fase 2 met proeven van verschillende duur op PP2 met 150 m³/uur. (schuine lijnen zijn perioden zonder data omdat de pomp uitstond)



Figuur 7.4 Stijghoogteverandering in enkele peilbuizen in de meetraai tussen retourveld en PP2. Uitvoering in April-mei: retourproef fase op RP3, Juni: retourproef fase op DSI. In de lila stijghoogtelijn van RP3 zijn perioden van intermitterend schoonpompen te herkennen.



Figuur 7.5 Verpompte debieten tijdens de retourproeven. Groene lijn: watermeter voor schoonpompen. April: retourproef fase op RP3 met 50 m³/uur, Mei: retourproef fase op RP3 met pogingen om op te schalen naar 100 m³/uur, Juni: retourproef fase op DSI met opschaling naar 150 m³/u. (Schuine lijnen zijn perioden zonder data omdat de pomp uitstond)

7.5 Gegevens over het weer tijdens de proeven

De weersomstandigheden hebben effect op de metingen, bijvoorbeeld door de dagelijkse variatie in neerslag, verdamping en luchtdruk. Voor het laatste wordt automatisch gecompenseerd in de automatisch registrerende meetapparatuur. Met trends die volgen uit neerslag en verdamping is bij de interpretatie van de metingen rekening gehouden. Bijvoorbeeld door te kijken naar het verloop van de grondwaterstanden bij referentiepeilbuizen die niet worden beïnvloed door de pompproeven (Zie volgende paragraaf 7.6 betreffende de Referentiepeilbuizen).

Met betrekking tot de weersomstandigheden tijdens de proeven zijn de volgende gegevens ontleend aan de dataset van KNMI:

TG = Etmaalgemiddelde temperatuur (graden Celsius).

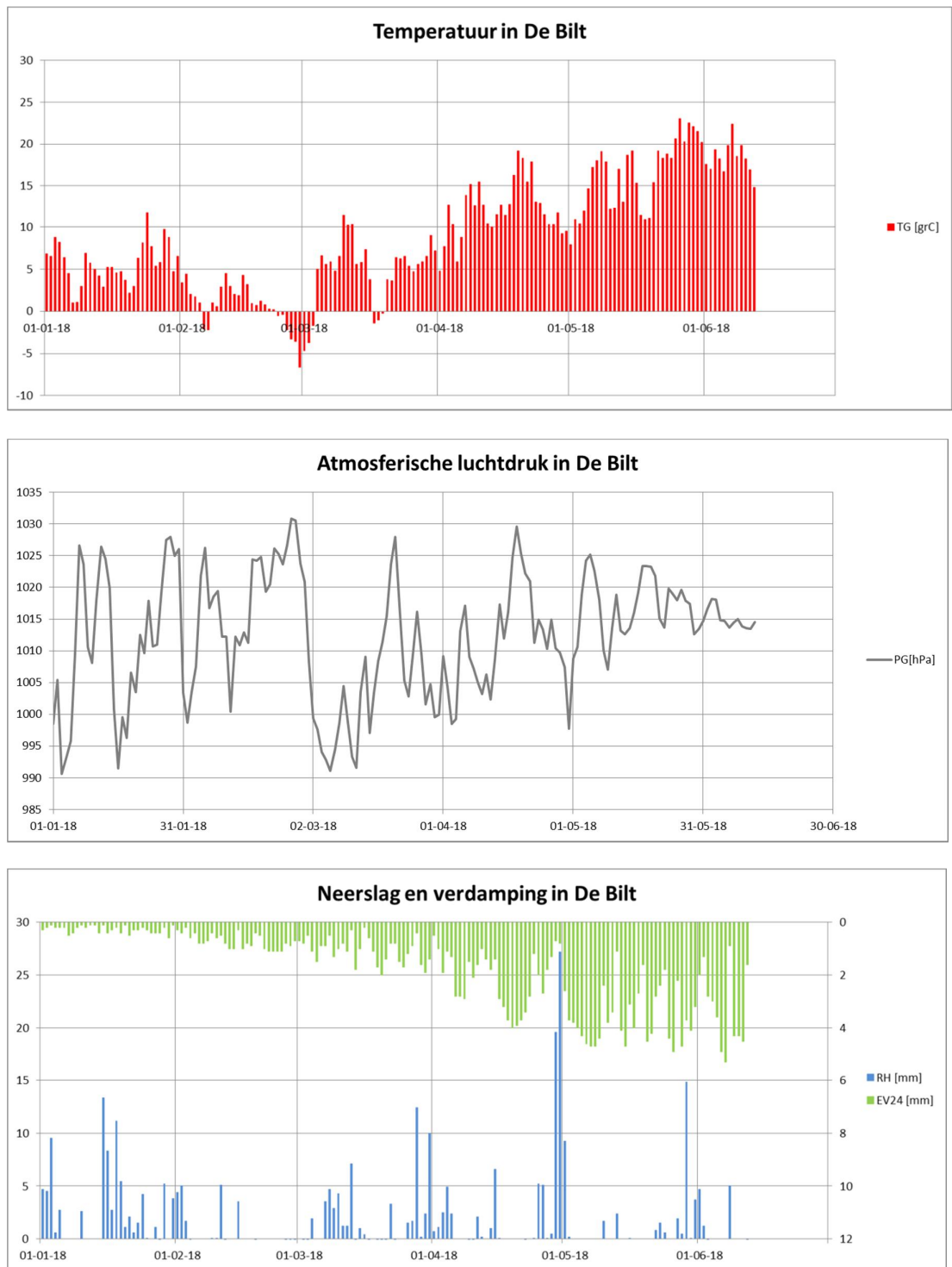
PG = Etmaalgemiddelde luchtdruk herleid tot zeeniveau (in hPa) berekend uit 24-uurwaarden.

RH = Etmaalsom van de neerslag (mm).

EV24 = Referentiegewasverdamping (Makkink) (mm).

Vermelde gegevens zijn ook opgeslagen in de database van Eijkelkamp waarin de monitoring wordt geregistreerd.

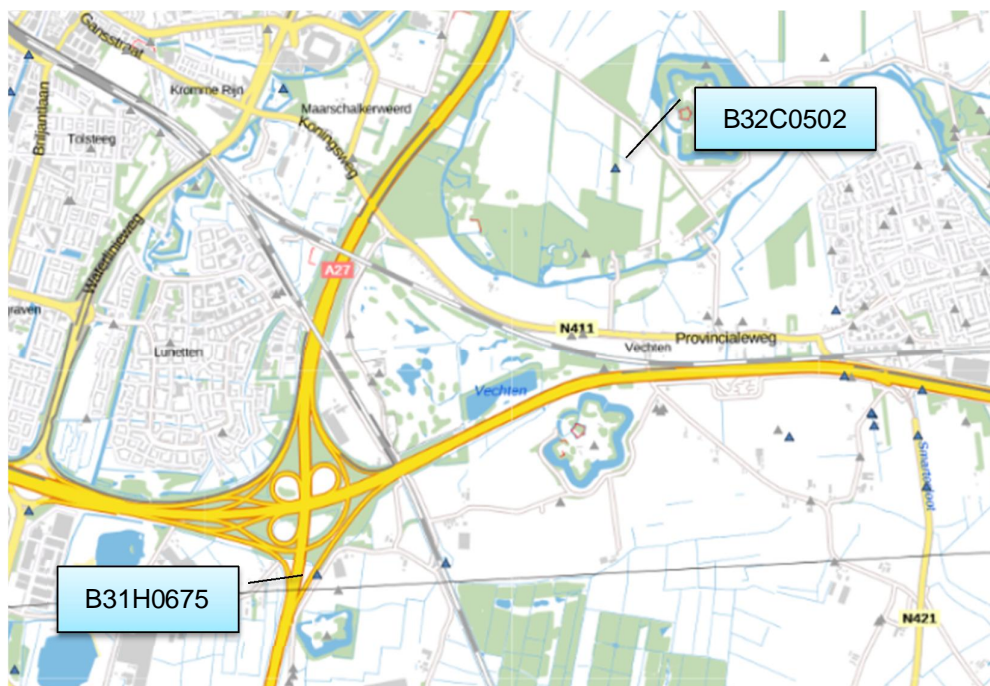
Uit de data van KNMI is af te leiden dat het tijdens de eerste proeffase in februari zeer droog en koud was, met een hoge luchtdruk en veel zon. De voorafgaande maand januari was vrij nat en zacht. In maart was de neerslag iets onder normaal. Eind april werd gekenmerkt door onweersbuien. Mei was extreem warm en zonnig maar met wat onweersbuien in de laatste week. De hoeveelheid neerslag in het voorjaar was normaal. Vanaf begin juni ontwikkelde zich een extreem droge periode.



Figuur 7.6 Weergegevens van KNMI, station de Bilt

7.6 Referentiepeilbuizen

Ter vergelijking van de effecten van de pompproef met niet door de proeven beïnvloede meetpunten in de omgeving (referentiepeilbuizen) zijn 2 meetpunten van een externe partij (Waternet) geselecteerd uit het meetnet van DINOloket (zie Figuur 7.7). Dit zijn de meetpunten 31H0675 in de zuidoosthoek van knooppunt Lunetten en 32C0502 ten noordoosten van de Oude Rijn aan de Beeldenlaan in Bunnik. De gegevens van de meetpunten zijn gepresenteerd in tabel 7.4.

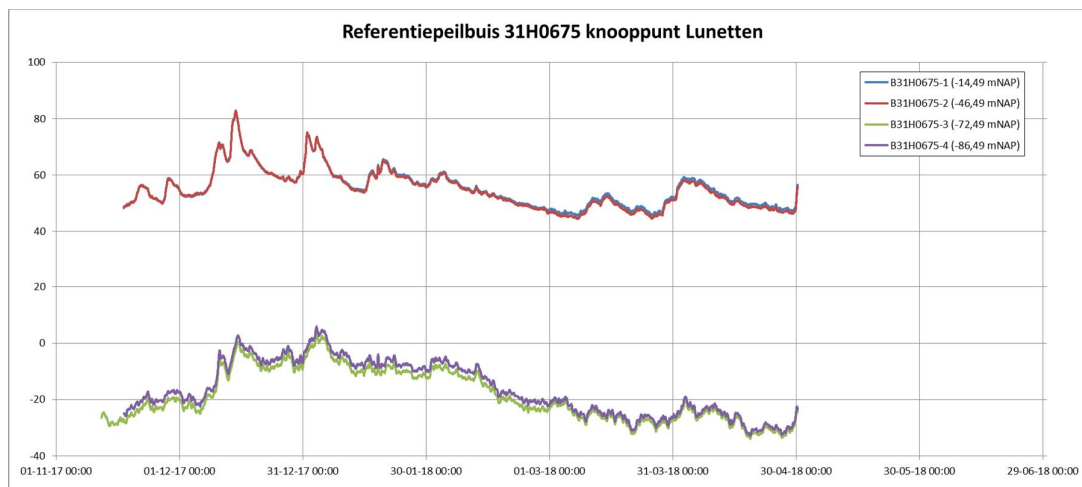


Figuur 7.7 Locaties van referentiemeetpunten

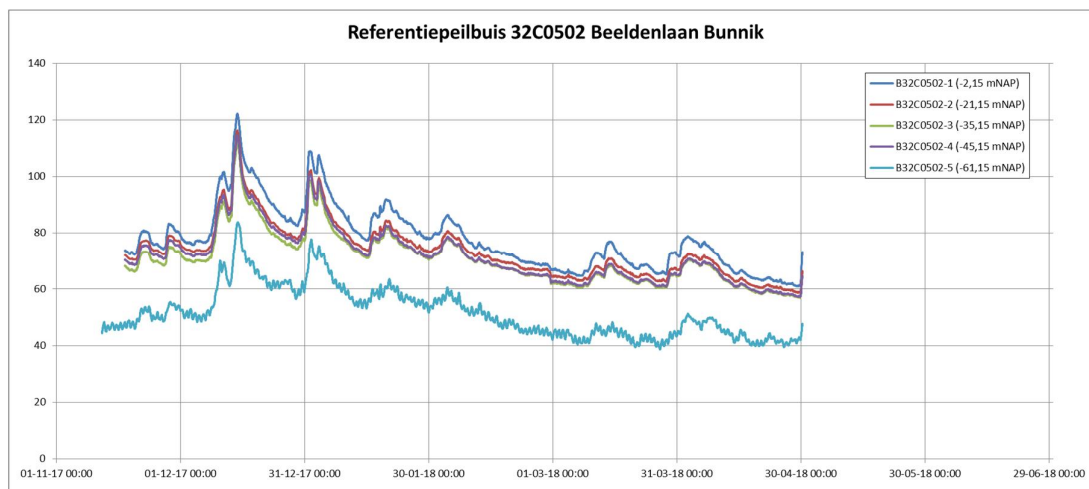
Tabel 7.4 Data van referentiemeetpunten

NITG-nr.	Filter-nr.	x [mRD]	y [mRD]	z [mNAP]	Top filter [mNAP]	Basis filter [mNAP]
B31H0675	1	138442	451547	2,10	-13,49	-14,49
B31H0675	2	138442	451547	2,12	-45,49	-46,49
B31H0675	3	138442	451547	2,12	-71,49	-72,49
B31H0675	4	138442	451547	2,15	-85,49	-86,49
B32C0502	1	140123	453893	3,97	-1,15	-2,15
B32C0502	2	140123	453893	3,95	-20,15	-21,15
B32C0502	3	140123	453893	3,93	-34,15	-35,15
B32C0502	4	140123	453893	3,93	-44,15	-45,15
B32C0502	5	140123	453893	3,90	-60,15	-61,15
B32C0502	6	140123	453893	3,88	-91,15	-92,15

De beschikbare data van grondwaterstandsmetingen tot en met 30 april zijn aangeleverd door Waternet.



Figuur 7.8 Verloop van de grondwaterstanden in referentiepeilbuis 31H0675 bij knooppunt Lunetten



Figuur 7.9 Verloop van de grondwaterstanden in referentiepeilbuis 32C0502 aan de Beeldenlaan te Bunnik

Tijdens de eerste proef van 10 tot 22 februari is volgens de referentiepeilbuizen sprake van een daling van de grondwaterstand in het eerste watervoerende pakket van circa 5 cm. De referentiemeetpunten liggen op circa 2 km afstand van de locatie van de pompputten. Ter controle is nagegaan dat de verwachte verlaging van de stijghoogte ten gevolge van de eerste pompproef met maximaal debiet van $255 \text{ m}^3/\text{u}$ ter plekke van de referentiemeetpunten volgens berekening 1 à 2 cm is.

Op basis van de metingen en de meteorologische situatie tijdens de pompproeven is geconcludeerd dat de waargenomen verlaging in de referentiemeetpunten in februari 2018 vooral het gevolg is geweest van het droge weer.

7.7 Effect zuivering op de kwaliteit van geloosd water

Het verpompte grondwater dat door de waterzuivering is geleid is bemonsterd en geanalyseerd [HVT 2018A]. De analyseresultaten zijn samengevat in Tabel 7.5. Op basis van de gemeten ijzergehalten is het zuiveringsrendement berekend. Tijdens de eerste proef bedroeg dit circa 50%, tijdens de tweede serie proeven circa 90%.

Bij langere werking gaat de zuivering beter functioneren.

Door de zuivering is tijdens de eerste 2 fasen pompproeven circa 924 kg ijzer verwijderd uit 110.862 m³ opgepompt water. In de geloosde hoeveelheid water tijdens de pompproeven bevond zich in totaal nog 519 kg ijzer in oplossing.

De zuivering bestond uit 2 straten met elk een beluchtingscontainer, een zandfilter en een bufferbak. De straten werden afzonderlijk teruggespoeld bij toenemende verstopping.

Tabel 7.5 Waterkwaliteit geloosd effluent en zuiveringsrendement ontijzering

Datum monstername	N-Kjeldahl (effluent) [mg/l]	CZV (effluent) [mg/l]	Fe (influent) [mg/l]	Fe (effluent) [mg/l]	Rendement verwijdering Fe [%]
10 feb 2018	<1	7	14	8,1	42%
12 feb 2018	<1	8	12	4,4	63%
14 feb 2018	1	7	12	6,6	45%
16 feb 2018	<1	6	14	6,9	51%
21 feb 2018	1	5	11	6,2	44%
9 mrt 2018	<1	<5	13	0,2	98%
12 mrt 2018	<1	<5	13	0,22	98%
14 mrt 2018	<1	9	14	0,19	99%
23 mrt 2018	1,1	5	16	1,1	93%
27 mrt 2018	1,3	6	14	0,37	97%
29 mrt 2018	<1	10	13	5,2	60%
6 april 2018	1,1	15	0,1	<0,02	
26 juni 2018	1,1	17	0,25	-	

8 Interpretatie van de pompproeven

8.1 Interpretatiemethode

De bepaling van de eigenschappen van de ondergrond is verricht door kalibratie van een geohydrologisch model aan de metingen. De kalibraties zijn uitgevoerd met behulp van het rekenprogramma [MLU⁴]. De methode maakt gebruik van een kleinste kwadraten berekening van de verschillen tussen meetwaarden en berekende waarden. Daarbij wordt de benodigde aanpassing van geohydrologische parameters van een gelaagd bodemsysteem bepaald om een goede fit te krijgen. Tevens wordt met het “condition number” aangegeven in hoeverre parameterbepalingen gecorreleerd zijn.

8.2 Pompproef volkomen pompput PP1 Fase 1

8.2.1 Debietregistratie

Tijdens de eerste pompproef die plaatsvond van 10 februari 08:45 tot 22 februari 08:45 is circa 255 m³/uur uit de diepste (volkomen) pompput PP1 gepompt.

8.2.2 Patroon van grondwaterverlagingen tijdens pompproef PP1

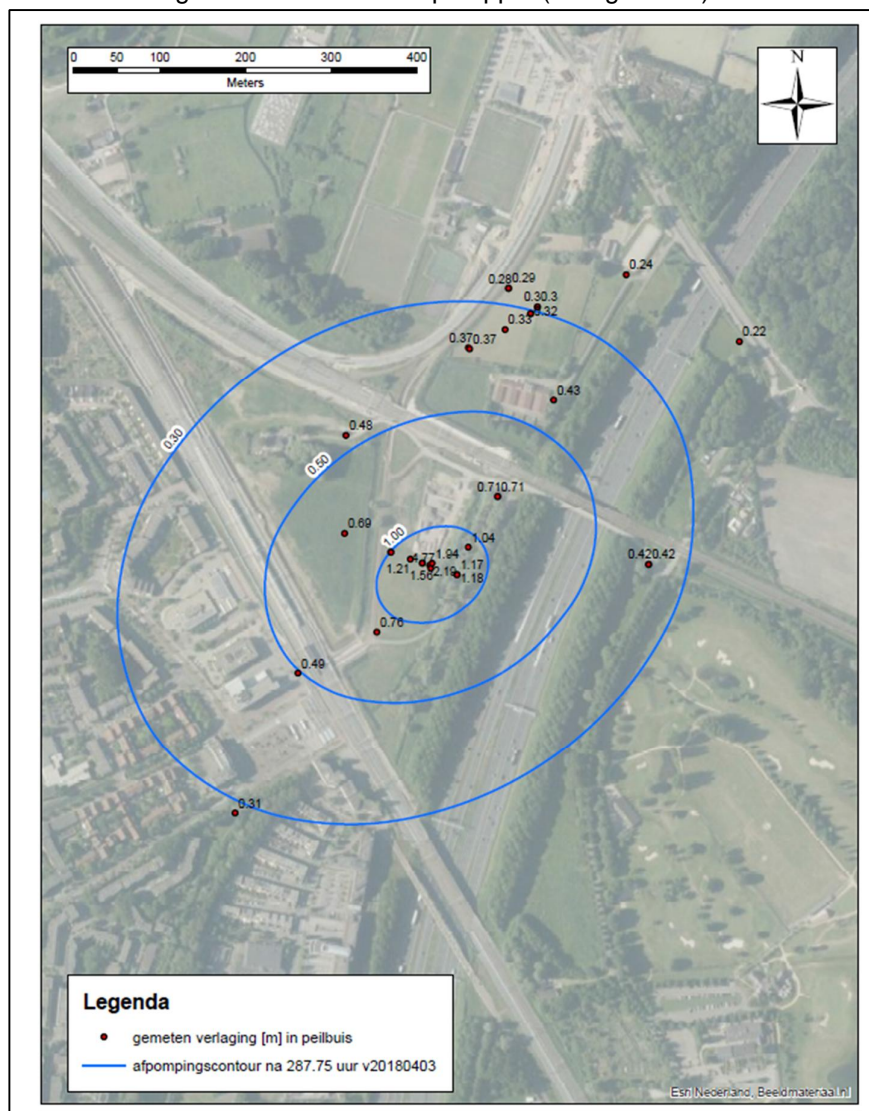
In de meetopzet zijn met peilbuizen diverse meetraaien ingericht. Er is een noordelijke meetraai die evenwijdig ligt aan de folieconstructie in de A27 en een westelijke meetraai haaks op de A27. In figuur 8.1 is het meetresultaat getoond uit het registratiesysteem van de westelijke meetraai van peilbuizen die op een diepte van circa 17 m-NAP staan. Na schoonpompen en proefdraaien op 8 februari volgt op 10 februari de start van de proef.



Figuur 8.1 Grondwaterverlaging in februari in de peilbuizen rond pompput PP1 bij eerste pompproef

⁴ MLU (ontwikkeld door C.J. Hemker) is een Windows programma voor “aquifer test analysis” (pompproeven) en verlagingberekeningen bij putstroming in gelaagde watervoerende pakketten met (semi)afgesloten en freatische condities [MLU]

De verlaging van het waterniveau in de pompput PP2 is volgens handmeting op de eerste proefdag circa 4,5 m. Die waarde komt overeen met de stand die in de peilbuis in de omstorting van het putfilter is gemeten met een diver. De verlagingen ten opzichte van de stand bij aanvang (zonder correctie voor het droge weer) in de omgeving van de pompput nemen af met grotere afstand tot de pompput (zie figuur 8.2).

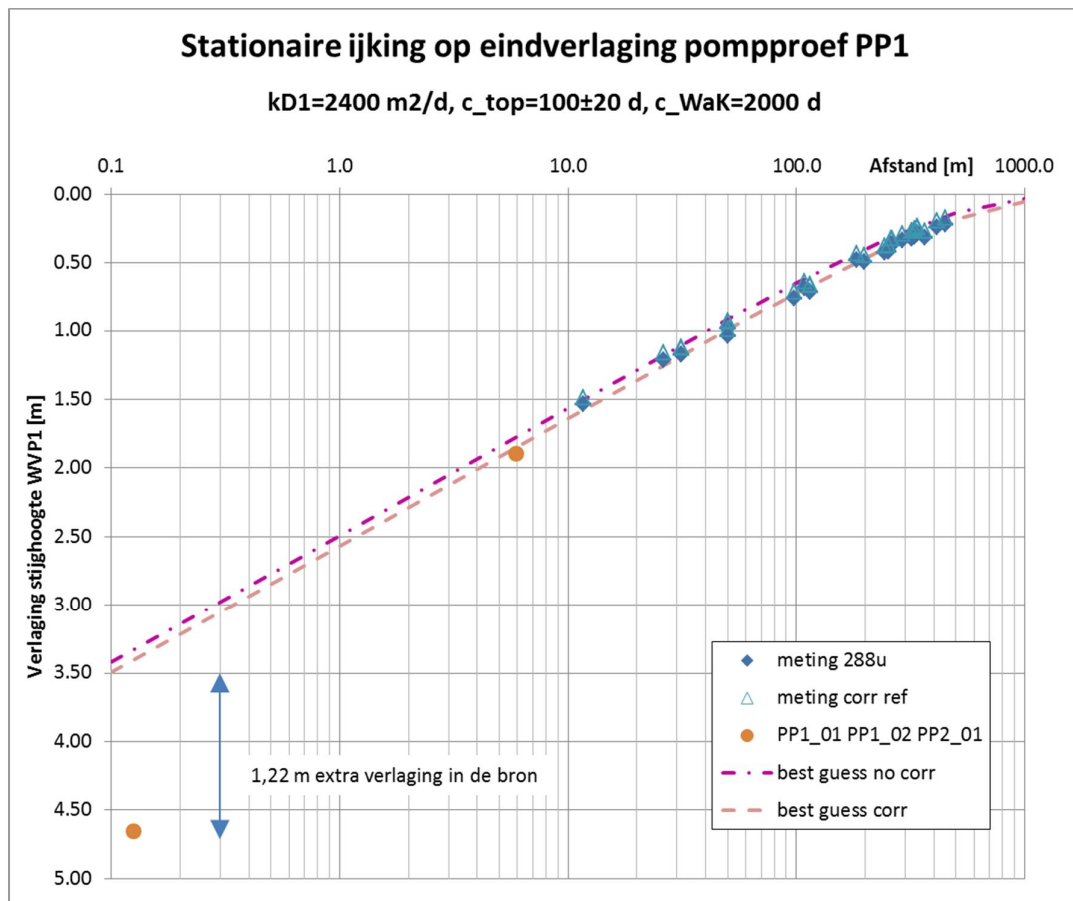


Figuur 8.2 Verlaging patroon rond de pompput op 12 dagen na aanvang eerste pompproef. Bij meetpunten waar meerdere waarden staan zijn meerder peilbuisfilters geplaatst.

Gedurende de pompproef zijn de verlagingen bij alle peilbuizen langzaam toegenomen met circa 12 cm in 12 dagen. Deels is die daling veroorzaakt door het vrij droge weer waardoor de grondwaterstand in de hele regio circa 5 cm zakte. Het andere deel is een vertraagd effect dat samenhangt met de geohydrologische eigenschappen van de grondlagen, met name de berging in de watervoerende grondlagen.

8.2.3 Stationaire uitwerking pompproef PP1

Aan het eind van de uitgevoerde pompproef op volkomen pompput PP1 zijn de gemeten verlagingen beschouwd die aan het eind van pompphase 1 optraden. Daarbij is om te beginnen nog geen onderscheid gemaakt naar meetraaien maar zijn alle meetpunten bijeen genomen die op een diepte tussen NAP – 5 en -20 m staan. Uit de serie meetpunten zijn 2 peilbuismetingen weggelaten omdat deze meetfouten vertoonden (B10-1) of in een niet goed doorlatende laag stonden (B11-1). De verlaging in pompput PP1 die in de figuur 8.3 is getoond, valt beneden het berekende lineaire verband dat geldt voor verlagingen van de grondwaterstand op kleine afstanden van de put. Het verschil hangt samen met extra afpompings in de put door stromingsverliezen (weerstand over het filter, onvolkomenheid, wandruwheid, turbulente stroming naar de pomp). Het theoretische lineaire verband tussen verlaging op een zekere afstand en debiet is berekend volgens de vergelijking van DeGlee voor stationaire putstroming in een enkele watervoerende laag met voeding vanuit een semipermeabele afdekkende laag. Deze benadering geldt als de voeding van onderaf gering is, dat wil zeggen de hydraulische weerstand van de onderliggende laag zeer groot is. De voeding vindt dan alleen plaats vanuit de afdekkende kleiige toplaag. Bij een doorlaatvermogen van $2400 \text{ m}^2/\text{d}$ en een weerstand van de toplaag van 100 dagen met een bandbreedte van ± 20 dagen (zoals in de grafiek is aangegeven) is een goed kloppende fit gevonden met een zeer klein kwadratisch verschil tussen metingen en berekeningen voor verwachtingswaarden van parameters van $0,024 \text{ m}^2$ voor de gebruikte 28 meetpunten.



Figuur 8.3 Ijking volgens de vergelijking van DeGlee voor stationaire putstroming in 1 watervoerende laag onder een semipermeabele toplaag.

8.2.4 Niet-stationaire uitwerking PP1 meetraai Noord

De meetraai die zich vanuit pompput PP1 in noordelijke richting uitstrekt (zie figuur 3.1), bevat de volgende peilbuisfilters per onderscheiden geohydrologische laag:

Tabel 8.1 Gegevens van peilbuizen en meetfilters in de noordelijke meetraai (geologie: HOL= Holocene zandlaag, CEC=Formatie van Echteld, KR= Formatie van Kreftenheije, UR = Formatie van Urk, STO= Formatie van Sterksel, bovenste deel, WA= Formatie van Waalre)

peilbuis en filter	X_RD [m]	Y_RD [m]	OKbuis [cmNAP]	Geologie	WVP	afstand tot PP1
B11_1	138405,32	453268,99	-813	CEC	WVP1-1	3,2
B12_2	138437,1	453258,4	-853	CEC	WVP1-1	31,5
B17_2	138450,2	453290,5	-817	CEC	WVP1-1	50,1
B7_1	138484,4	453349,4	-599	CEC	WVP1-1	114,1
B5_1	138549,7	453461,6	-281	HOL	WVP1-1	242,4
B20_1	138634,3	453608,9	-389	HOL	WVP1-1	411,6
B20_2	138634,4	453608,9	-890	CEC	WVP1-1	411,8
B11_2	138405,3	453269,2	-1715	KR	WVP1-2	3,4
PP2_1	138407,9	453271,6	-1850	KR	WVP1-2	5,8
B12_3	138437,2	453258,5	-1858	KR	WVP1-2	31,6
B7_2	138484,5	453349,3	-1849	KR	WVP1-2	114,2
B19_1	138492,9	453545	-1791	KR	WVP1-2	292,1
B7_3	138484,7	453349,5	-7512	WA	WVP2	114,4
B19_2	138493,1	453545,1	-7820	WA	WVP2	292,2

Peilbuizen in of boven de deklaag zijn niet meegenomen omdat deze geen verlagingseffecten tijdens de pompproeven te zien gaven.

In de hierna volgende beschrijving is aangegeven hoe de kalibratie is verricht. Deze is als voorbeeld voor meetraai noord in pompproef PP1 uitgeschreven. De uitwerkingen van de andere meetraaien en pompproeven zijn niet in detail in dit rapport opgenomen. Daarvoor wordt verwezen naar bijlage F. De verzamelstaten van betreffende MLU-files zijn bijgehouden in Excel-files.

In het MLU-model zijn 4 danwel 5 lagen meegenomen. Het aantal aangehouden modellagen is afhankelijk van de aanpak waarbij de fictieve freatische laag al of niet wordt meegenomen in de modellering. De lagen zijn in het schema als volgt genummerd:

- De laag 0 is de fictieve freatische laag aan maaiveld die de voeding vanuit open water en de gescheurde kleiige toplaag moet representeren die voorkomt tussen NAP + 2 m en NAP (in enkele berekeningen geïntroduceerd als WVP0).
- Laag 1 is de zandige laag van de Holocene Formatie en Formatie van Echteld van NAP tot circa NAP – 10 m (WVP1-1)
- Laag 2 is de grofzandige laag van de Formaties van Kreftenheije en Urk die voorkomt tot circa NAP – 32 m (WVP1-2)
- Laag 3 is de zandige laag van de Formatie van Sterksel tot circa NAP - 62 m (WVP1-3). In de noordelijke meetraai staan in deze laag geen diepe peilbuizen.
- Laag 4 is de zandige laag van de Waalre Formatie die reikt tot circa NAP -150 m (WVP2).

Tussen de watervoerende lagen worden in het rekenschema waterremmende lagen aangebracht.

Er is een "first guess" van de waarden van de verschillende geohydrologische parameters opgesteld. De daarin aangehouden kD is aan de hoge kant genomen in relatie tot de waarde voor het doorlaatvermogen die in vorige paragraaf is afgeleid. De aangehouden schatting is voornamelijk gebaseerd op de uitkomsten van de oude pompproef Mereveld.

Tabel 8.2 First guess van de parameterwaarden voor de kalibratie van de pompproeven

Startwaarden				
Parameter	C [d]	S' [-]	kD [m ² /d]	S [-]
WVP0	0	0	1	0,1
WVP1-1	130	0,001	1500	0,0001
WVP1-2	0,1	0,0001	800	0,0001
WVP1-3	0,1	0,0001	700	0,0001
WVP2	1000	0,0001	3500	0,0001

Aan de hand van de "first guess" is een gevoeligheidsanalyse per parameter uitgevoerd. Daaruit volgt welke parameters de meest gevoelige zijn in de ijking (welke variatie levert grote verandering van de berekende verlaging op; zie bijlage F). Om de analyse beter inzichtelijk te maken zijn uit de antwoorden van het programma MLU de ijkingsresultaten afzonderlijk per onderscheiden watervoerend pakket gepresenteerd. Daarvoor is een aanvullende bewerking geprogrammeerd.

Uit deze oriënterende analyse volgt de gevoeligheid van relatieve aanpassing per parameterwaarde ten opzichte van first guess om de berekende stijghoogteverlopen van de meetpunten te laten passen op de metingen van de grondwaterstanden. Waar de gevoeligheid groot is, is een grote aanpassing nodig om een redelijk bijdrage aan een fit te krijgen.

Tabel 8.3 Resultaat van de gevoeligheidsanalyse vooraf aan de kalibratie van de pompproeven voor raai Noord.

Sensitivity	0			
Parameter	C [d]	S' [-]	T [m ² /d]	S [-]
WVP0			0%	52%
WVP1-1	19%	0%	2%	0%
WVP1-2	0%	0%	4%	0%
WVP1-3	1200%	0%	6%	0%
WVP2	720%	0%	0%	0%

Met name de weerstanden van de tussenkleilaag boven de Sterksel Formatie en van de Waalre klei zouden veel kunnen veranderen. Variatie van de bergingcoëfficiënten heeft weinig effect op de uitkomst van de kalibratie, op de berging van de toplaag na. De aanvulling vanuit de toplaag heeft derhalve juist een belangrijke betekenis in de lokale geohydrologie.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat een grote aanpassing van de weerstand c_2 van de kleilaag van de Formatie van Waalre moet worden ingevoerd. De optredende verlagingen daaronder zijn echter vrijwel nihil zodat de ijking niet betrouwbaar is te verrichten. De mogelijke range van antwoorden is zo groot dat met de beperkte meetdata de bepaling niet nauwkeurig is.

De uitgangswaarde voor het doorlaatvermogen van de watervoerende laag van de Formatie van Peize-Waalre is zeer groot. Verlagen onder de Waalre klei door putonttrekkingen in WVP1 zijn daardoor klein. Ook van deze parameter is ijking niet goed mogelijk. De waarde voor kD_2 is als constante in de analyse aangehouden en overgenomen uit REGIS.

Ook de mogelijke afwijking in de hydraulische weerstand van de klei van de Sterksel Formatie c1-3 is groot. Dit houdt verband met het feit dat er geen metingen zijn in laag WVP1-3. De geschatte waarde van de weerstand is echter zeer klein zodat ook verwacht mag worden dat een benodigde aanpassing in relatieve zin groot kan zijn maar toch niet veel effect heeft op de kalibratie. De waarde van C1-3 moet uit een andere raai worden afgeleid (raai West).

Opvallend is dat de berging en de weerstand van de toplaag veel aangepast moeten worden om een goede kalibratie te bereiken.

Vervolgens is de kalibratie uitgevoerd door de parameters systematisch en stapsgewijs in wisselende combinaties te laten variëren. Dit kalibratieproces wordt automatisch door MLU uitgevoerd op de in iedere kalibratieslag geselecteerde parameters. Omdat het doorlaatvermogen volgens de gevoeligheidsanalyse kennelijk al goed was geschat, is begonnen met de parameters die het grootste effect kunnen sorteren: C1-1 en C2 en vervolgens zijn steeds sets van andere parameters gevarieerd. Het programma MLU berekent de optredende afwijking als kleinste kwadraten waarde KKW van de verschillen tussen metingen en berekeningen op basis van de aangepaste parameterwaarden. Tabel 8.4 geeft de resultaten van dit proces voor raai Noord.

Tabel 8.4 Aanpassing van parameterwaarden bij kalibratie van de pompproeven meetraai Noord.

Stap	1					
Parameter	C1-1	C2				
Waarde	118	5288				
Spreading [%]	14	249				
KKW [m2]	3,61					
Condition nr	499					

Stap	2					
Parameter	T1-1	T1-2	T1-3			
Waarde	1145	948	830			
Spreading [%]	11	5	5			
KKW [m2]	3,415					
Condition nr	55					

Stap	3					
Parameter	S0	C1-1				
Waarde	0,075	110				
Spreading [%]	26	12				
KKW [m2]	3,4					
Condition nr	5,9					

Stap	4					
Parameter	S0	S1-1	S1-2			
Waarde	0,072	5E-6	1,5E-3			
Spreading [%]	18	>>	174			
KKW [m2]	1,9					
Condition nr	>>					

Stap	5					
Parameter	T1-1	T1-2	T1-3	C1-1		
Waarde	1053	895	783	92		
Spreading [%]	8	4	4	13		
KKW [m2]	1,58					
Condition nr	157					

Stap	6					
Parameter	S0	S1-1'				
Waarde	0,124	3E-4				
Spreading [%]	17	194				
KKW [m2]	1.47					
Condition nr	124					

Stap	7					
Parameter	T1-1	T1-2	T1-3	C1-1	S0	
Waarde	1040	883	773	94	0,15	
Spreading [%]	1	1	1	11	23	
KKW [m2]	1,45					
Condition nr	902					

Voor deze laatste slag geldt een waarde voor de kleinste kwadraten som $KKW = 1,45 \text{ m}^2$. Omdat 14 meetpunten (peilbuizen in verschillende lagen) met 15 meettijdstippen zijn gebruikt met in totaal 210 datapunten, zijn de uiteindelijke verschillen tussen metingen en berekeningen derhalve bijzonder gering (gemiddeld 8 cm per datapunt). Uit de ijking van de set parameters in MLU resulteert dan vervolgens een overzicht als in de volgende tabel 8.5 die in het programma wordt getoond.

Tabel 8.5 *Uitkomst van eerste kalibratieslag voor pompproef PP1 raai Noord met MLU, $KKW=1,45 \text{ m}^2$
 $kD(WVP1)= 2690 \text{ m}^2/\text{d}$, $c(HOL)= 95 \text{ d}$, $c(WaK)= 5000 \text{ d}$, $S(WVP1)= 1,5 \cdot 10^{-3}$*

	Aquifer	Base [m]	Thickness [m]	Kh [m/d]	Code	T [m ² /d]	#	Code	S [-]	#
WVP0 HOL	1	2	0,1	10	T1	1		S1	0,15	
WRL1 HOL-K		0	2	0,021053	c2	95	2	S'2	0,0003	
WVP1-1 CEC	2	-7,5	7,5	138,6667	T2	1040		S2	5E-06	
WRL1-1 nvt		-10	2,5	25	c3	0,1		S'3	0,0001	
WVP1-2 KR/UR	3	-32,5	22,5	39,11111	T3	880		S3	0,0015	1
WRL1-3 ST-K		-37,5	5	50	c4	0,1		S'4	0,0001	
WVP1-3 ST	4	-62,5	25	30,8	T4	770		S4	0,0001	
WRL2 WA-K		-75	12,5	0,0025	c5	5000		S'5	0,0001	
WVP2 PZ/WA	5	-150	75	46,66667	T5	3500		S5	0,0001	

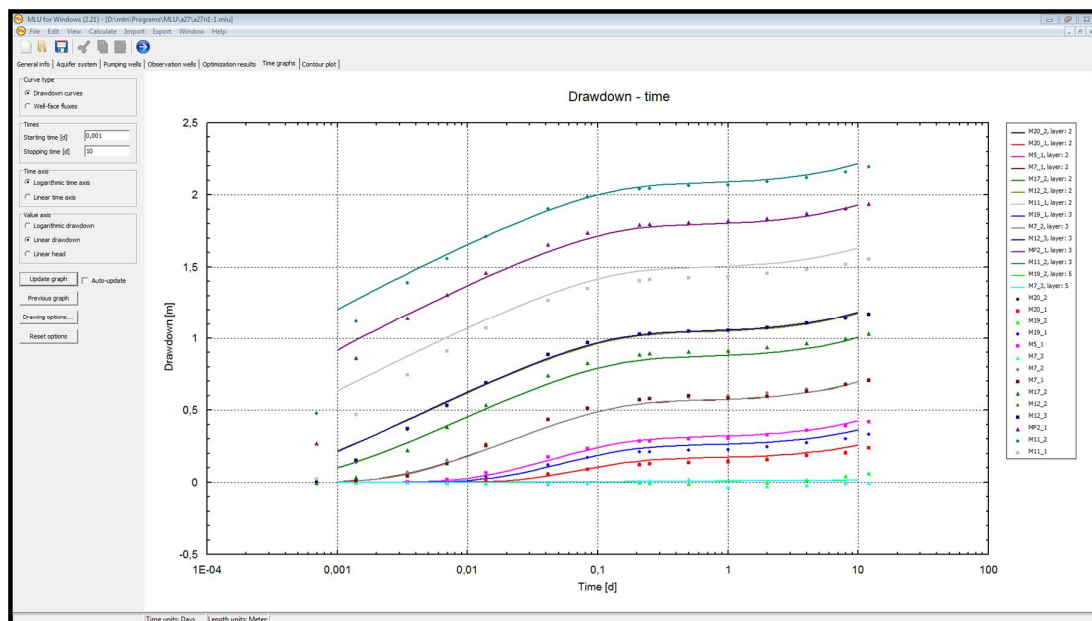
Vervolgens is nagegaan of met aanpassing van de weerstand van de Waalre klei naar een lagere waarde van 1000 dagen en ijking voor de bergingsparameters nog een passende fit kon worden verkregen. Wat de berging betreft waren meerdere kalibratieslagen nodig om de berekende verlaginglijnen passender te krijgen. Daarbij werden vooral de berging coëfficiënten van de kleilagen belangrijk naar beneden gebracht.

Tabel 8.6 *Uitkomst van laatste kalibratieslag voor pompproef PP1 raai Noord met MLU, $KKW = 1,17 \text{ m}^2$,
 $Cond.nr=3292$, $kD(WVP1)= 2487 \text{ m}^2/\text{d}$, $c(HOL)= 69 \text{ d}$, $c(WaK)= 1000 \text{ d}$, $S(WVP1)= 2,5 \cdot 10^{-3}$*

	Aquifer	Base [m]	Thickness [m]	Kv [m/d]	Code	c [d]	#	Code	S' [-]	#
WVP0 HOL	1	1.9	0.1	10	T1	1		S1	0.173563	
WRL1 HOL-K		0	1.9	0.027528	c2	69.02134		S'2	0.00001	
WVP1-1 CEC	2	-7.5	7.5	120	T2	900		S2	0.00001	
WRL1-1 nvt		-10	2.5	25	c3	0.1		S'3	1E-06	
WVP1-2 KR/UR	3	-32.5	22.5	40.81791	T3	918.4031		S3	0.002541	
WRL1-3 ST-K		-37.5	5	3.792017	c4	1.318559	1	S'4	1E-06	
WVP1-3 ST	4	-62.5	25	26.76589	T4	669.1473	2	S4	0.000019	
WRL2 WA-K		-75	12.5	0.0125	c5	1000		S'5	1E-06	
WVP2 PZ/WA	5	-150	75	46.66667	T5	3500		S5	0.0001	

De weerstand van de kleiige Holocene deklaag is bij deze kalibratie vastgesteld op 70 dagen en het totale doorlaatvermogen op $2490 \text{ m}^2/\text{d}$ bij een bergingscoëfficiënt van $2,5 \cdot 10^{-3}$. De weerstand van de tussenkleilaag c1-3 tussen Urk en Sterksel Formatie (of c4 volgens de notatie in MLU) komt uit op 1,3 dagen. Een dergelijke kleine weerstand kan er op duiden dat de kleilaag uit discontinue lenzen bestaat. Uit de verschillen tussen vorige en laatste kalibratie met een weerstand van de Waalre klei van 1000 dagen blijkt dat de oplossing vrij ongevoelig voor een verdere toename van de weerstand van de Waalre klei is. Bij de kalibratie in de laatste slag hoort een fit met $KKW = 1,17 \text{ m}^2$ (gemiddeld 7,5 cm afwijking per

datapunt). De fit van de verlaginglijnen op de metingen is zeer goed. Dit geldt zeker als men bedenkt dat B11-1 (genoteerd in MLU als meting M11-1) wel is meegenomen terwijl de nauwkeurigheid van die meting waarschijnlijk wordt gehinderd door plaatsing in een niet erg doorlatende laag. Daar zit dus het grootste deel van de afwijking in de kalibratie in. Dit blijkt ook uit de volgende figuur 8.4 die door MLU wordt geproduceerd met logarithmische tijdschaal op de horizontale as. De verlagingen worden door MLU als positieve waarden getoond op lineaire schaal op de verticale as. Meetpunt M11-1 toont de grootste afwijking en voor andere punten is de fit redelijk exact. De fit op zeer kleine tijdschaal is moeilijk exact passend te krijgen. Het laatste deel van de grafieken toont een toenemende verlaging op grotere tijdschaal. Naar ons inzicht wordt dit veroorzaakt door geringe weerstand aan de top en uitputting danwel zeer langzame levering vanuit de grondwaterberging bovenin het lagenpakket.



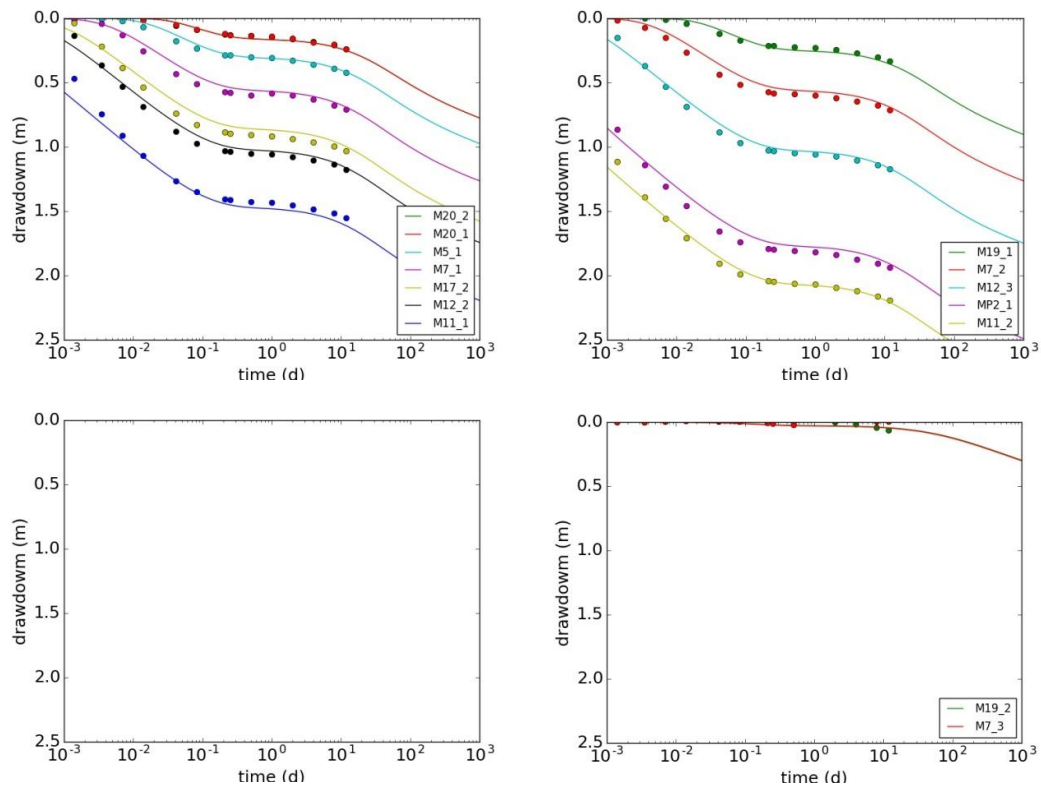
Figuur 8.4 Tijdsafhankelijke verlagingen (toename omhoog geprojecteerd) tijdens pompproef PP1 in de beschouwde meetpunten met de berekende verlagingen volgens de parameterwaarden in tabel 8.6.

Met de ontwikkelde tool zijn de resultaten van MLU per watervoerende laag uitgesplitst, zie figuur 8.5. De fitresultaten kunnen daarmee visueel beter worden beoordeeld. De metingen in de lagen van Echteld (deelfiguur linksboven) en van Kreftenheije/Urk (deelfiguur rechtsboven) worden goed gefit. Metingen M20-1 en M20-2 vallen op elkaar zodat er maar 1 serie zichtbaar is.

Verder is voor de afronding van de ijking van het model voor de Noord-raai met betrekking tot de eigenschappen van de zandlaag van de Sterksel Formatie lastig dat er in deze raai geen meetpunten aanwezig zijn in die laag. Daaruit volgt dat met deze meetraai het doorlaatvermogen van die zandlaag dus niet geijkt kon worden. Daarvoor zijn de diepe meetpunten in de West-raai nodig (zie volgende paragraaf). Dit wordt ook aangegeven door het hoge "condition number" van 3292, dat aangeeft dat de oplossing in sterke mate onbepaald is voor de laatste parameterset in deze ijking.

Metingen in de diepe Peize Waalre zandlagen (deelfiguur rechtsonder) liggen dicht tegen de nul. Uit de kalibratie ka worden geëxtrapoleerd dat de verlagingen op zeer lange termijn (100 dagen en meer) zich wel zullen doorzetten. Alleen met zeer langdurige proeven hadden

metingen kunnen zijn verkregen om de eigenschappen van Waalre klei en de zandlagen daaronder te bepalen. Dat was echter uit het oogpunt van vergunning en omgevingsbeïnvloeding niet mogelijk.



Figuur 8.5 Verlagen (toename omlaag getekend) in raai Noord tijdens pompproef PP1 in de beschouwde meetpunten met berekende verlagingen volgens de gekalibreerde parameterwaarden per grondlaag in het gekalibreerde MLU-model. Linksboven = WVP1-1 Echteld Formatie, rechtsboven = WVP1-2 Krefteheije/Urk Formatie, linksonder = WVP1-3 Sterksel Formatie (leeg, geen meetpunten), rechtsonder = WVP2 Peize Waalre Formatie.

8.2.5 Uitwerking PP1 meetraai West

Voor de kalibratie van de westelijke meetraai is dezelfde aanpak gevolgd als hiervoor, uitgaande van dezelfde “first guess” voor het geohydrologisch schema, een gevoeligheidsanalyse per parameter (zie bijlage F) en vervolgens een kalibratie voor combinaties van parameters en tenslotte handmatige aanpassingen ter bepaling van de laatste bergingsparameters.

De beschikbare meetpunten in raai West zijn aangegeven in tabel 8.7.

Tabel 8.7 Gegevens van peilbuizen en meetfilters in de westelijke meetraai (geologie: HOL= Holocene zandlaag, CEC=Formatie van Echteld, KR= Formatie van Kreftenheije, UR = Formatie van Urk, STO= Formatie van Sterksel, bovenste deel, WA= Formatie van Waalre)

peilbuis en filter	X_RD [m]	Y_RD [m]	OKbuis [cmNAP]	geologie	WVP	afstand tot PP1
B11_01	138405,31	453268,99	-813	CEC	WVP1-1	3,3
B10_01	138396,50	453271,87	-324	CEC	WVP1-1	11,7
B12_02	138437,00	453258,31	-853	CEC	WVP1-1	31,4
B08_01	138359,80	453284,58	-469	HOL	WVP1-1	50,3
B16_02	138305,70	453306,39	-849	CEC	WVP1-1	108,7
B06_01	138307,49	453420,57	-111	HOL	WVP1-1	183,7
B06_02	138307,42	453420,56	-807	CEC	WVP1-1	183,7
B02_01	138530,75	453571,41	-758	CEC	WVP1-1	329,8
B11_02	138405,28	453269,21	-1715	KR	WVP1-2	3,6
PP2_01	138407,86	453271,63	-1850	KR	WVP1-2	5,9
B10_02	138396,43	453271,77	-1742	KR	WVP1-2	11,7
B09_01	138382,66	453276,51	-2133	KR	WVP1-2	26,1
B12_03	138437,00	453258,31	-1858	KR	WVP1-2	31,4
B08_02	138359,91	453284,52	-1746	KR	WVP1-2	50,2
B10_03	138396,52	453271,66	-4970	STO	WVP1-3	11,6
B08_03	138359,74	453284,51	-5397	STO	WVP1-3	50,4
B10_04	138396,61	453271,90	-7723	WA	WVP2	11,6

De gekalibreerde parametrisatie volgens tabel 8.8 heeft een kleinste kwadraten som van 1,08 m² opgeleverd voor 17 meetpunten met 15 tijdstippen (gemiddeld 6,5 cm afwijking per datapunt) waaruit is geconcludeerd dat dit een goede fit is.

Aangezien er 2 peilbuizen in de Sterksel afzettingen staan in raai West, is de ijking voor die laag hier betrouwbaarder. Een kalibratie die alleen gericht is op die laag leidt tot een kD1-3 van 1000 m²/d en c1-3 van 1 dag met een tamelijk laag condition number C=187 en een KKW=2,25 m².

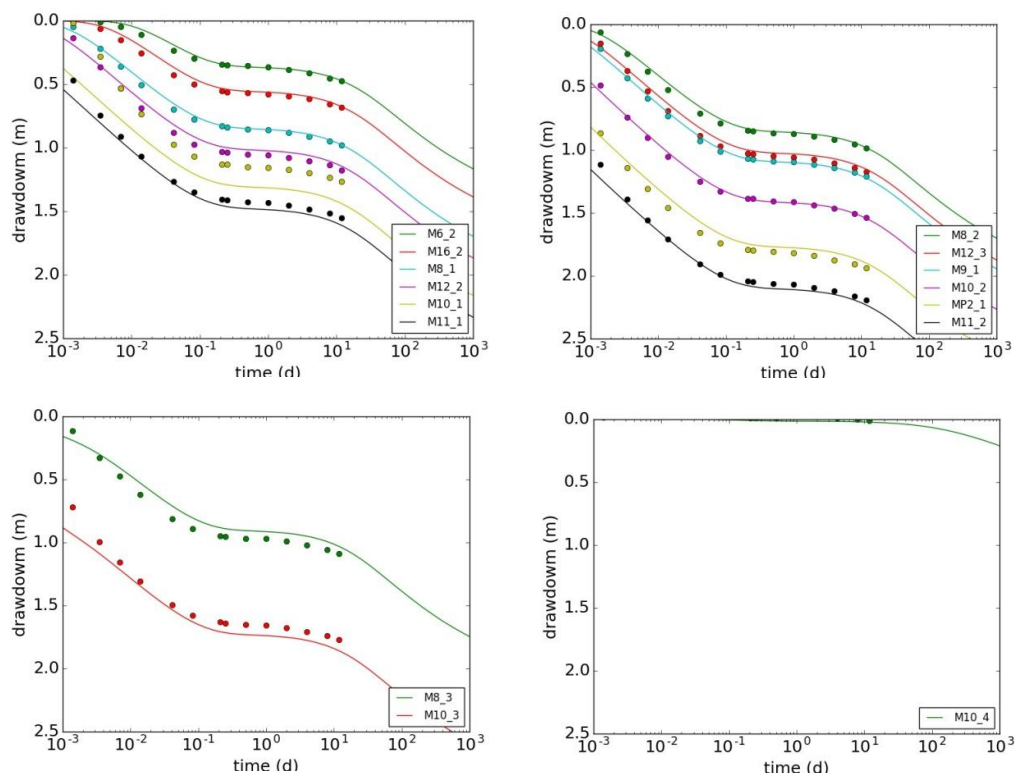
De invoer van een holocene watervoerende laag met een vrij hoge bergingscoëfficiënt van die holocene laag is nodig om een goede fit van de metingen in de eerste watervoerende laag op lange duur te bewerkstelligen. Een ijking loopt eigenlijk naar een berging S0=0,3 en een c1 = 55 d toe. Een dergelijk hoge berging is fysisch niet aannemelijk (niet al het grondwater in de freatische laag kan vrij komen) en daarom is de waarde vast gezet op een aannemelijk waarde van 0,15. Omdat er geen metingen beschikbaar zijn van de holocene laag (de metingen in freatische peilbuizen variëren eigenlijk niet) is de grootte van de bergingscoëfficiënt niet te kalibreren.

Ook de exacte waarde van de weerstand van de Waalre klei is uit de MLU-analyse niet nauwkeurig af te leiden (zeer hoog Condition number) omdat de peilbuismetingen nauwelijks variatie tonen. Er is aangehouden dat de weerstand van de Waalre klei groot is omdat de stationaire analyse daarop duidt. Een waarde van meer dan 2000 dagen is waarschijnlijk.

Tabel 8.8 Uitkomst van kalibratie voor pompproef PP1 van raai West PP1 met MLU, $KKW = 2,25 \text{ m}^2$, $kD(WVP1) = 2400 \text{ m}^2/\text{d}$, $c(\text{HOL}) = 55 \text{ d}$, $c(\text{WaK}) = 5000 \text{ d}$, $S(WVP1) = 3 \cdot 10^{-3}$

Aquifer	Base [m]	Thickness [m]	Kh [m/d]	Code	T [m ² /d]	#	Code	S [-]	#	Name
1	1.9	0.1	10	T1	1		S1	0.15		WVPO HOL
	0	1.9	0.034545	c2	55		S'2	1E-06		WRL1 HOL-K
2	-7.5	7.5	120	T2	900		S2	0.0001		WVP1-1 CEC
	-10	2.5	25	c3	0.1		S'3	1E-06		WRL1-1
3	-32.5	22.5	22.22222	T3	500		S3	0.002		WVP1-2 KR/UR
	-37.5	5	5	c4	1		S'4	2E-06		WRL1-3 ST-K
4	-62.5	25	40	T4	1000		S4	0.001		WVP1-3 ST
	-75	12.5	0.0025	c5	5000		S'5	1E-06		WRL2 WA-K
5	-150	75	46.66667	T5	3500		S5	0.0001		WVP2 PZ/WA

De verlagingen per laag voor deze kalibratie is getoond in de volgende figuren. Meetpunt M10-1 (peilbuis B10-1) wijkt systematisch af; waarschijnlijk door een offset in de inhangdiepte van de diver. Verder is er sprake van een goede fit.



Figuur 8.6 Verlagingen in raai West tijdens pompproef PP1 in de beschouwde meetpunten en de berekende verlagingen volgens de gekalibreerde parameterwaarden per grondlaag in het MLU-model. Linksonder = WVP1-1 Echteld Formatie, rechtsonder = WVP1-2 Kreftenheije/Urk Formatie, linksboven = WVP1-3 Sterksel Formatie (leeg, geen meetpunten), rechtsboven = WVP2 Peize Waalre Formatie.

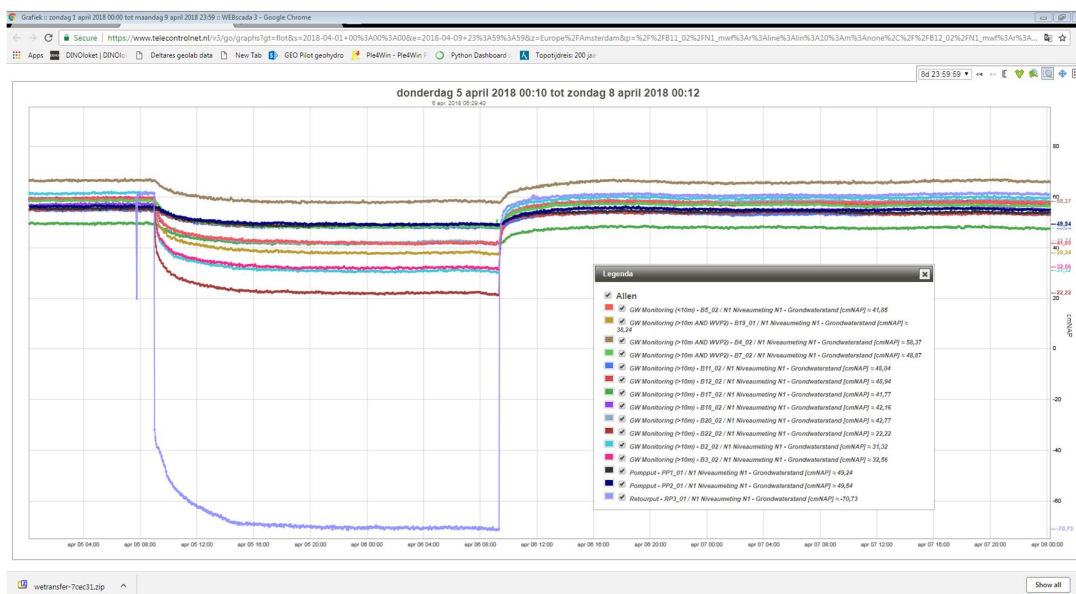
8.3 Interpretatie pompfase volkomen pompput RP3

8.3.1 Debietregistratie

Voorafgaand aan de retourproeven op de retourput is op 5 april 09:00 tot 6 april 09:00 de 60 meter diepe (volkomen) put RP3 aan een pompproef onderworpen om de capaciteit van die put te bepalen. De afvoer en lozing van het onttrokken grondwater vond plaats via de retourleiding die op de zuivering werd aangesloten. De debietmeting werd verricht met de watermeter die achter de zuivering stond. De lozing vanaf de zuivering vond plaats met een pomp die herhaaldelijk aan en afsloeg. De debietmeting was daarom niet zuiver.

In eerste instantie werd uit de watermeter afgeleid dat het debiet $125 \text{ m}^3/\text{u}$ zou zijn geweest. De verlaging van de waterstand in pompput RP3 bedroeg volgens de peilbuis in de omstorting van RP3 circa 1,32 m. Via vergelijking van verlagingen tijdens de proef op RP3 met verlagingen gedurende voorgaande proeven op putten PP1 en PP2 is nagegaan of het debiet ook anders kan zijn geweest. Daaruit volgde dat tijdens de pompproef naar schatting $50 \text{ m}^3/\text{uur}$ uit retourput RP3 moet zijn gepompt.

Uitgaande van een debiet van $125 \text{ m}^3/\text{uur}$ is de capaciteit van de retourput ongeveer $94 \text{ m}^3/\text{u}$ per meter stijghoogteverandering. Uitgaande van een debiet van $50 \text{ m}^3/\text{uur}$ is de capaciteit van de retourput ongeveer $38 \text{ m}^3/\text{u}$ per meter stijghoogteverandering. De bepaalde putcapaciteit is vanwege onzekerheid over het exacte debiet echter onbetrouwbaar.



Figuur 8.7 Stijghoogteverandering (meetwaarde cmNAP) in de meetraai in het retourveld met peilbuizen op diverse afstanden tijdens de pompproef op RP3

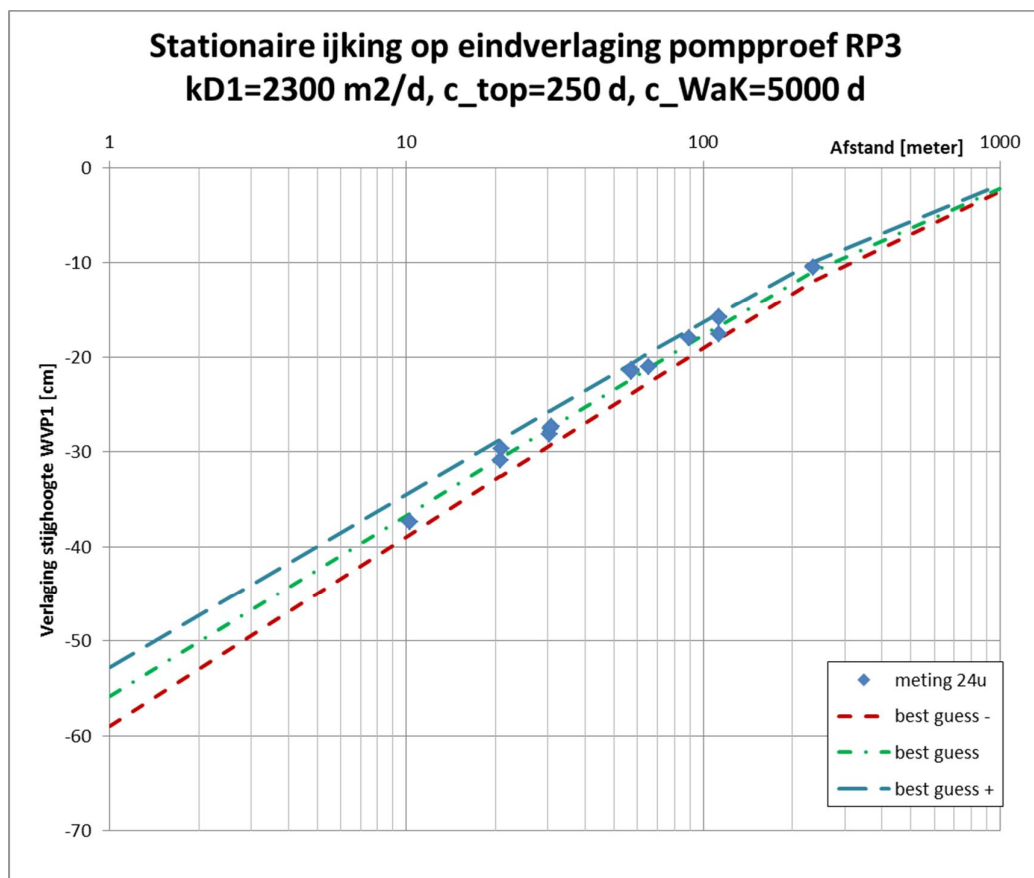
8.3.2 Uitwerking pompfase RP3 uit de meetraai

De interpretatie van de metingen nabij RP3 is verricht voor de pompfase uitgaande van een debiet van $50 \text{ m}^3/\text{u}$.

Na opvolging van dezelfde procedure als eerder vermeld, resulteerde een goede fit. De kalibratie is eerst verricht op de eindverlaging na 1 dag onttrekken. Waarschijnlijk is de verlaging op afstand nog niet geheel stationair. Daaruit volgt een indruk van de correct werkende peilbuizen die een logisch verband lijken op te leveren. Beschikbare meetpunten om in de analyse te gebruiken zijn: B2-1/B2-2, B22-2, B3-1/B3-2/B3-3, B1-1/B1-2, B19-1, B20-2, B5-2 B18-2/B18-3, B7-2. Peilbuis B19-2, B4-3 en B7-3 geven data van de situatie

onder de Waalrelei. De ondiepe peilbuis B22-1 geeft een iets afwijkende stand van B22-2 en is niet in de analyse betrokken. De gemeten verlagingen na 1 dag zijn uitgezet tegen de afstand op logaritmische schaal.

Het theoretische lineaire verband tussen verlaging op een zekere afstand en debiet is berekend volgens de vergelijking van DeGlee voor stationaire putstroming in een enkele watervoerende laag met voeding vanuit een semipermeabele afdekkende laag. Deze benadering geldt als de voeding van onderaf gering is, dat wil zeggen de hydraulische weerstand van de onderliggende laag zeer groot is. De voeding vindt dan alleen plaats vanuit de afdekkende kleiige toplaag. Bij een doorlaatvermogen van $2300 \text{ m}^2/\text{d}$ en een weerstand van de toplaag van 250 dagen is een zeer goed kloppende fit gevonden met een zeer klein kwadratisch verschil tussen metingen en berekeningen van $0,07 \text{ m}^2$ voor de gebruikte 14 meetpunten (2 cm gemiddelde afwijking per punt). De in de grafiek weergegeven bandbreedte van de stationaire ijking is $kD = 2300 \pm 100 \text{ m}^2/\text{d}$ en $c = 250 \pm 50 \text{ d}$.

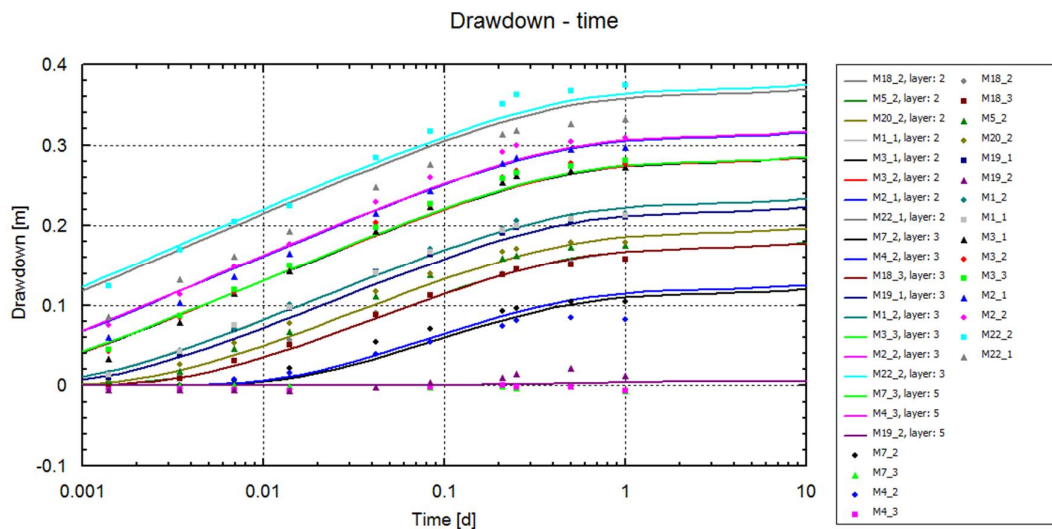


Figuur 8.8 Interpretatie van de korte pompproef op RP3 volgens de vergelijking van DeGlee voor stationaire putstroming in 1 watervoerende laag onder een semipermeabele toplaag.

Het bepaalde gesommeerde doorlaatvermogen van $2300 \text{ m}^2/\text{d}$ is daarom opnieuw verdeeld volgens de uitkomst van de flowmeting. De tijdsafhankelijke kalibratie voor kleine tijdstappen is goed passend te krijgen. De weerstand van Holoceen en de bergingsfactoren zijn daarbij gekalibreerd op respectievelijk 270 dagen en $2 \cdot 10^{-3}$. Het condition number is hierbij klein (5,9) en de som van kleinste kwadraten is $0,066 \text{ m}^2$ voor 19 geselecteerde meetpunten met 10 waarnemingen uit de beschikbare tijdreeks (gemiddeld 2 cm afwijking per datapunt). Uit de analyse met MLU volgde de set parameterwaarden die in tabel 8.9 is vermeld.

Tabel 8.9 Uitkomst van kalibratie met MLU voor pompproef RP3 bij een duur van 1 dag, $KKW = 0,066 \text{ m}^2$, $kD(\text{WVP1}) = 2300 \text{ m}^2/\text{d}$, $c(\text{HOL}) = 270 \text{ d}$, $c(\text{WaK}) = 5000 \text{ d}$, $S(\text{WVP1}) = 2 \cdot 10^{-3}$

Aquifer	Base [m]	Thickness [m]	Kv [m/d]	Code	c [d]	#	Code	S' [-]	#	Name
1	1.9	0.1	10	T1	1		S1	0.15		WVP0 HOL
	0	1.9	0.007037	c2	270		S'2	0.00001		WRL1 HOL-K
2	-9.5	9.5	21.05263	T2	200		S2	0.00006		WVP1-1 CEC
	-10	0.5	5	c3	0.1		S'3	1E-06		WRL1-2
3	-32.5	22.5	67.77778	T3	1525		S3	0.002		WVP1-2 KR/UR
	-37.5	5	2.5	c4	2		S'4	1E-06		WRL1-3 ST-K
4	-62.5	25	23	T4	575		S4	0.0002		WVP1-3 ST
	-75	12.5	0.0025	c5	5000		S'5	2E-06		WRL2 WA-K
5	-150	75	46.66667	T5	3500		S5	0.0001		WVP2 PZ/WA



Figuur 8.9 Verlagen in een meetraai vanaf RP3 in de beschouwde meetpunten en de berekende verlagen volgens de gekalibreerde parameterwaarden per grondlaag in het MLU-model.

Het doorlaatvermogen van het eerste watervoerende pakket (WVP1-2 voor de Afzettingen van de Kreftenheije/Urk Formatie op deze locatie) is met $1525 \text{ m}^2/\text{d}$ tamelijk groot (doorlatendheid 68 m/d over een dikte van $22,5 \text{ m}$). De grootte houdt waarschijnlijk verband met het voorkomen van meerdere meters grind op deze locatie zoals blijkt uit de boorbeschrijving van RP3 (zie bijlage G).

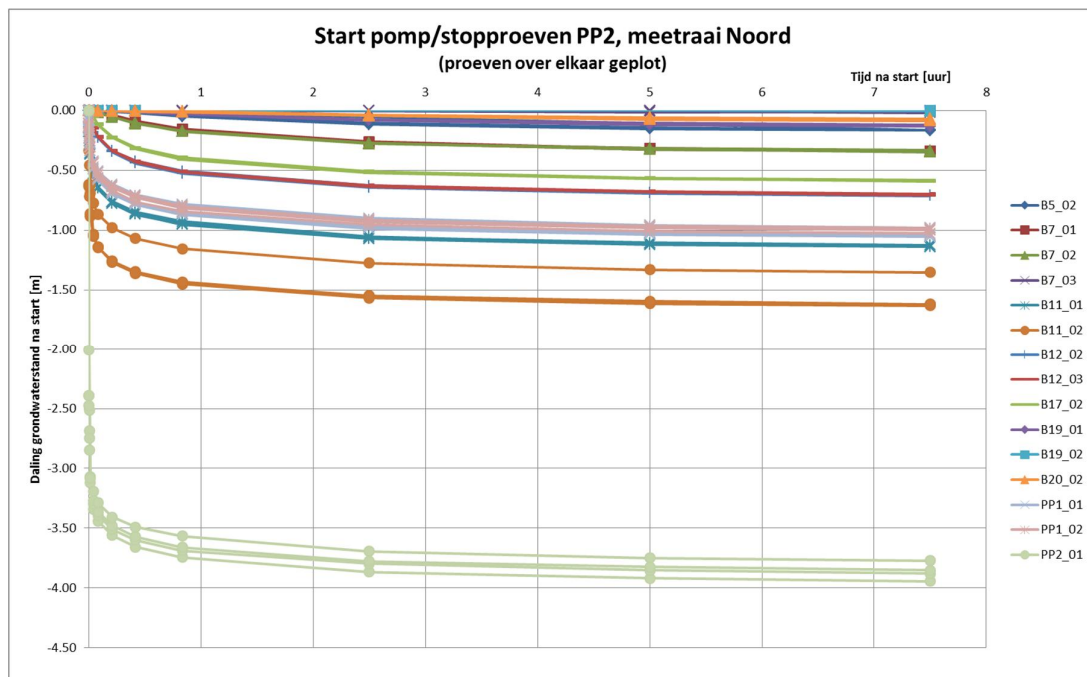
9 Interpretatie van de pomp/stopproeven

9.1 Waarnemingen van de stopfasen van onvolkomen pompput PP2

In maart 2018 is de tweede serie pomptesten uitgevoerd met pomp/stopproeven om de reactiesnelheid van het grondwatersysteem te bepalen en het gedrag van een onvolkomen put te onderzoeken aangezien in de praktijk met een dergelijke bronbemaling wordt gewerkt. PP2 is een pompput met een diepte van circa 30 m die in de bovenste helft van het watervoerende pakket is geplaatst (als onvolkomen put). De proeven zijn uitgevoerd met uren van achtereenvolgens 0,5 dag, 1 dag, 3 dagen en 6 dagen en even lange stopfasen tussentijds om na te gaan of de duur van de bemaling effect heeft op de berging (vanwege de vraag of het pakket bij lange duur bemalen een freatisch gedrag gaat vertonen of niet).

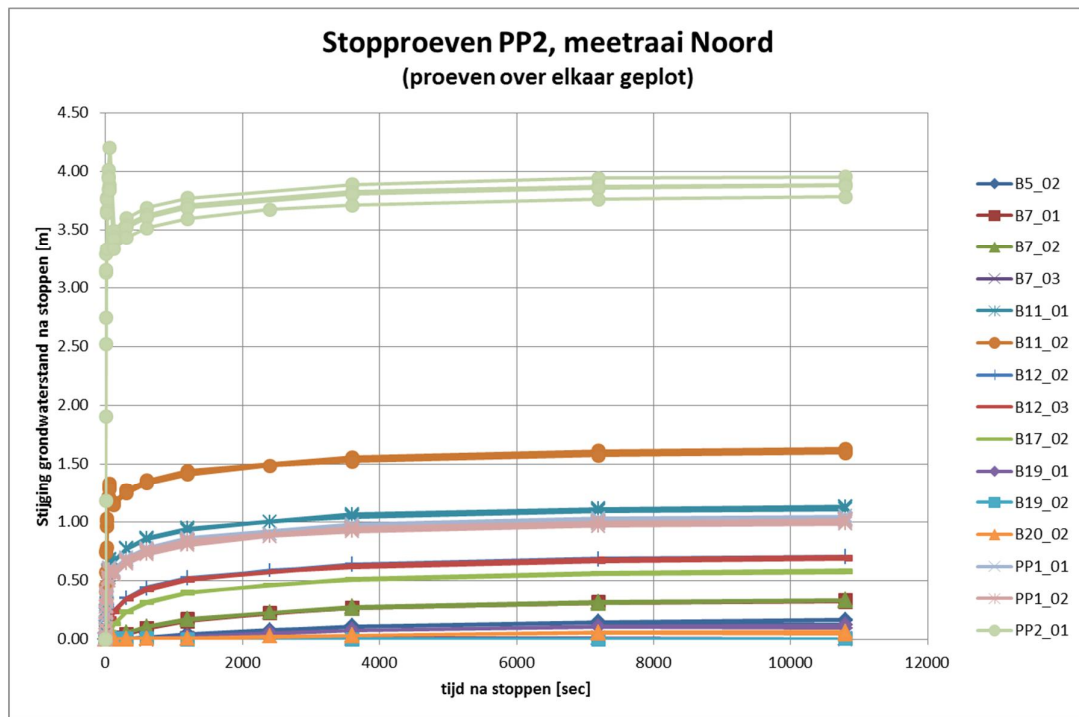
Eerst is nagegaan of de diverse stopproeven verschillen vertonen in de snelheid waarmee bij start de grondwaterstanden omlaag gaan en na afloop de grondwaterstanden omhoog komen. De verlaging in de meetpunten bij aanzetten van de pomp is getoond in figuur 9.1.

De snelheden waarmee de verlagingen zich ontwikkelen bij aanschakelen van de pomp en bij afschakelen, zijn bij de verschillende pompduren nagenoeg gelijk. De verlagingen worden bijzonder snel gerealiseerd. Dit betekent dat de bergingscoëfficiënten van de bodemlagen in het geohydrologische systeem klein zijn (gedrag van spanningswater).

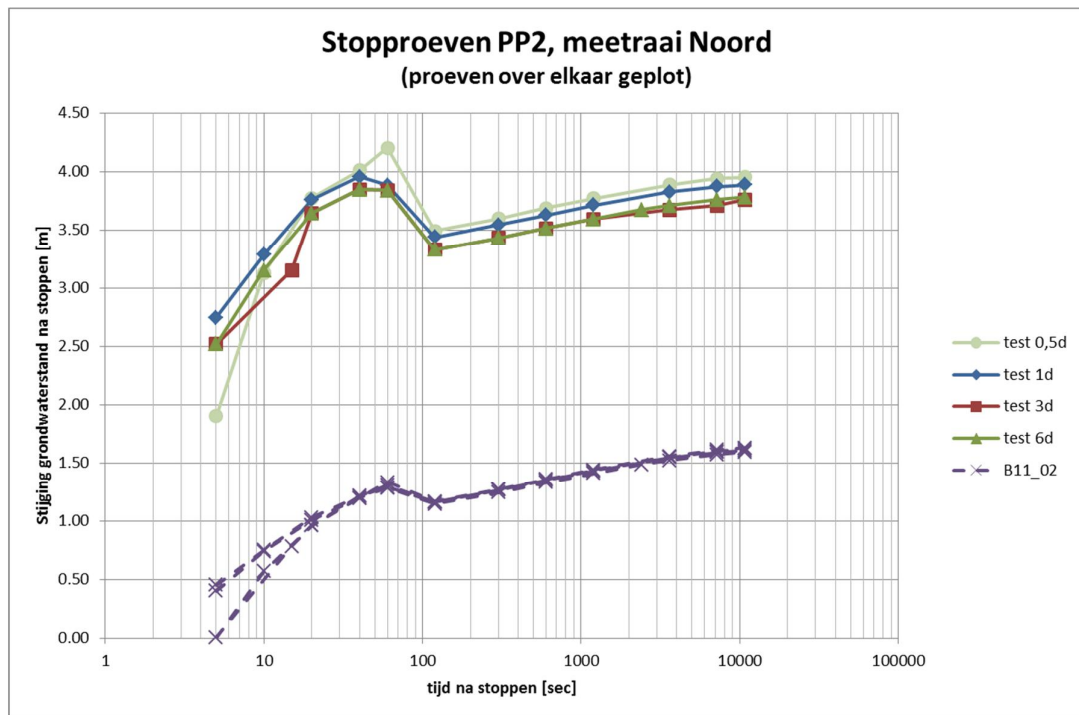


Figuur 9.1 Ontwikkeling van de grondwaterverlaging volgens de metingen in de eerste uren van 4 pomptesten

In figuur 9.2 is het effect getoond bij het uitschakelen van de pomp in de 4 testen. Het valt op dat iedere keer bij uitzetten van de pomp een soort waterslageffect optreedt. Dit is te zien aan de piek voor korte duur na staken van de onttrekking. Om het verschijnsel beter zichtbaar te maken is de figuur voor de waarnemingen in de peilbuis in de omstorting van pompput PP2 zichtbaar gemaakt met een tijd-as in seconden, zowel lineair als op logaritmische schaal uitgezet (figuur 9.3). De terugkomst van de grondwaterstand treedt in circa 40 seconden op. Het verschijnsel doet zich voor bij meer peilbuizen (bijvoorbeeld B11) dan alleen de pompput zodat het waarschijnlijk een grondwaterfenomeen is en niet het leeglopen van de leiding.



Figuur 9.2 Ontwikkeling van de grondwaterstijgingen na iedere stop van 4 korte pomptesten



Figuur 9.3 Ontwikkeling van de grondwaterstijgingen in de peilbuis bij PP2 en peilbuis B11-02 na iedere stop van 4 korte pomptesten (logaritmische tijdschaal)

9.2 Interpretatie van de pompfase van onvolkomen pompput PP2

9.2.1 Debietregistratie

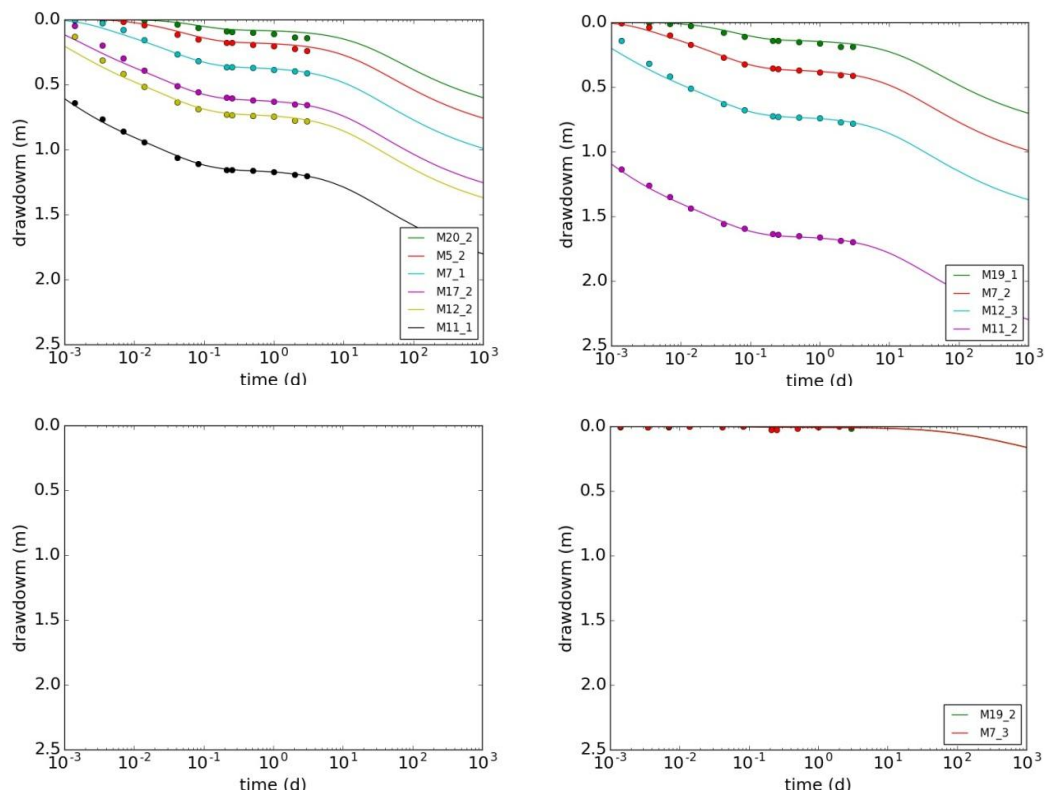
Tijdens de serie pompproeven die duurde van 8 maart 09:00 tot 27 maart 09:00 is in 4 testen van verschillende duur 150 m³/uur uit de ondiepe (onvolkomen) pompput PP2 gepompt. De interpretatie is verricht voor de pompproef en de stopproef met elk een duur van 3 dagen.

9.2.2 Uitwerking pompfase PP2 meetraai Noord

Na opvolging van dezelfde procedure als eerder vermeld resulteerde de volgende set parameterwaarden. De som van kleinste kwadraten is 0,5236 m² en dus is de fit zeer goed.

Tabel 9.1 Uitkomst van kalibratie met MLU voor raai Noord in de pompfase van PP2 bij een duur van 3 dagen

Aquifer	Base [m]	Thickness [m]	Kh [m/d]	Code	T [m ² /d]	#	Code	S [-]	#	Name
1	1.9	0.1	10	T1	1		S1	0.17		WVPO HOL
	0	1.9	0.038	c2	50		S'2	2E-06		WRL1 HOL-K
2	-7.5	7.5	100	T2	750		S2	2E-06		WVP1-1 CEC
	-10	2.5	25	c3	0.1		S'3	0.0001		WRL1-2
3	-32.5	22.5	44.44444	T3	1000		S3	0.001		WVP1-2 KR/UR
	-37.5	5	0.5	c4	10		S'4	0.0001		WRL1-3 ST-K
4	-62.5	25	6	T4	150		S4	0.001		WVP1-3 ST
	-75	12.5	0.00625	c5	2000		S'5	0.00001		WRL WA-K
5	-150	75	46.66667	T5	3500		S5	0.0001		WVP2 PZ/WA



Figuur 9.4 Verlagen in raai Noord tijdens pompproef PP2 met metingen en berekende verlagen volgens het gekalibreerde MLU-model voor raai Noord. Linksonder laag WVP1-1 CEC, rechtsboven laag WVP1-2 KR/UR, linksonder laag WVP1-3 ST (geen meetpunten), rechtsonder laag WVP2 PZ/WA.

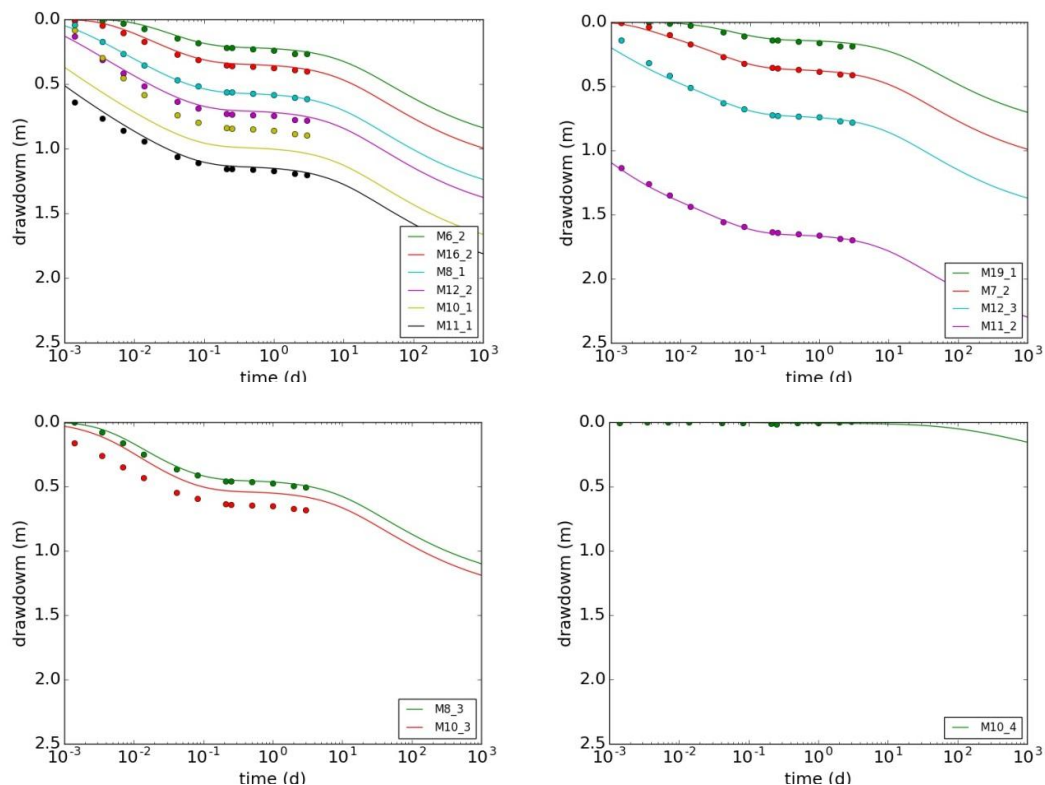
De resultaten van de berekende verlagingen in watervoerende lagen in Echteld en Kreftenheije/Urk en Waalre Formatie stemmen goed overeen met de meetwaarden. De kalibratie voor het doorlaatvermogen van de watervoerende laag van de Sterksel Formatie geeft afwijkende waarden ten opzichte van voorgaande analyses. Ook de weerstand van de Waalreklei is lastig te optimaliseren omdat de waarde bij ijking fors oploopt. Beide kwesties hebben te maken met gebrek aan meetdata in de Sterksel Formatie.

9.2.3 Uitwerking pompfase PP2 meetraai West

Hier wordt een som van kleinste kwadraten bereikt van $1,03 \text{ m}^2$ (ofwel een gemiddelde afwijking per meting van 6,8 cm).

Tabel 9.2 *Uitkomst van kalibratie met MLU voor raai West in de pompfase van PP2 bij een duur van 3 dagen*

Aquifer	Base [m]	Thickness [m]	Kh [m/d]	Code	T [m ² /d]	#	Code	S [-]	#	Name
1	4.9	0.1	10	T1	1		S1	0.2		WVPO HOL
	-0.1	5	0.125	c2	40		S'2	0.00001		WRL1 HOL-K
2	-7.6	7.5	100	T2	750		S2	0.0001		WVP1-1 CEC
	-10.1	2.5	25	c3	0.1		S'3	0.0001		WRL1-2
3	-32.6	22.5	44.44444	T3	1000		S3	0.002		WVP1-2 KR/UR
	-37.6	5	0.25	c4	20		S'4	0.00002		WRL1-3 ST-K
4	-62.6	25	5	T4	125		S4	0.0002		WVP1-3 ST
	-75.1	12.5	0.00625	c5	2000		S'5	0.0001		WRL WA-K
5	-150.1	75	46.66667	T5	3500		S5	0.0001		WVP2 PZ/WA



Figuur 9.5 *Verlagingen in raai West tijdens pompproef PP2 met metingen en berekende verlagingen volgens het gekalibreerde MLU-model. Linksonder laag WVP1-1 CEC, rechtsboven laag WVP1-2 KR/UR, linksonder laag WVP1-3 ST, rechtsonder laag WVP2 PZ/WA. Metingen M10-1 en M10-3 wijken systematisch af door offset in de diver.*

Ondanks het feit dat er meetwaarden zijn uit peilbuizen in de watervoerende laag WVP1-3 van de Sterksel Formatie komt de ijking met MLU bij de analyse van de pomppfase voor de onvolkomen pompput niet tot realistische parameterwaarden voor het doorlaatvermogen in die laag. Het gesommeerde doorlaatvermogen van de watervoerende zandlagen in WVP1 is $1875 \text{ m}^2/\text{d}$ terwijl uit de ijking van de proeven met de volkomen pompput een doorlaatvermogen voor WVP1 werd gevonden van circa $2400 \text{ m}^2/\text{d}$.

Als het geohydrologisch parameterschema uit de volkomen proef van PP1 in raai West wordt toegepast (zie tabel 8.8) op de pompproef PP2 dan resulteert een ijking met $KD1-3 = 890 \text{ m}^2/\text{d}$ en $c1-3 = 0,25 \text{ d}$ waarbij een KKW van $2,4 \text{ m}^2$ (gemiddelde afwijking 10 cm per meting) en een condition number van 10,5 wordt gevonden. Het schema van PP1 raai West is derhalve net zo goed passend op de resultaten van pompproef PP2. Waarschijnlijk worden de afwijkingen in belangrijke mate bepaald door de offset in peilbuizen B10-1 en B10-3.

9.2.4 Uitwerking stopfase PP2 meetraai Noord

Visualisaties van de resultaten van de stopfases zijn niet goed te maken omdat het programma MLU data niet kan uitzetten in relatie tot het moment van stopzetten maar dit altijd doet vanaf het in de berekening aan te houden startmoment van de onttrekking. Wel kunnen de tabellen met kalibratieresultaten worden getoond. Na kalibratie is de som van kleinste kwadraten $0,25 \text{ m}^2$. Er zijn 14 meetpunten gebruikt met 13 meettijdstippen (ongeveer logaritmisch verdeeld). De kleinste kwadraten afwijking is gemiddeld $1,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ per meting (per meettijdstip is dat een gemiddelde afwijking van 3,7 cm).

Bij beschouwing van de ijking voor de stopfase moet ten opzichte van de kalibratie van de pomppfase toch meer doorlaatvermogen in de watervoerende laag van de Sterksel Formatie worden aangehouden. De weerstand van de kleilaag daarboven zou echter juist weer wat naar beneden gebracht moeten worden. De weerstand van de Holocene kleiige deklaag is iets omhoog gegaan. De ijking van de bergingscoëfficiënten blijkt niet veel beter te kunnen. De waarden van de coëfficiënten zijn behoorlijk klein (totaal $6 \cdot 10^{-4}$ voor het gehele eerste watervoerende pakket en totaal $4,5 \cdot 10^{-4}$ voor alle waterremmende lagen samen) om goed te kunnen passen bij het snel opkomen van de stijghoogte.

Tabel 9.3 Kalibratieresultaat MLU voor raai Noord in de stopfase van PP2 na onttrekking van 150 m³/u gedurende 3 dagen (file a27n2-6finalv2.mlu)

Aquifer	Base [m]	Thickness [m]	Kh [m/d]	Code	T [m ² /d]	#	Code	S [-]	#	Name
1	1.9	0.1	10	T1	1		S1	0.2		WVPO HOL
	0	1.9	0.014615	c2	130		S'2	0.00015		WRL1 HOL-K
2	-7.5	7.5	100	T2	750		S2	0.0001		WVP1-1 CEC
	-10	2.5	25	c3	0.1		S'3	0.0001		WRL1-2
3	-32.5	22.5	44.44444	T3	1000		S3	0.00025		WVP1-2KR/UR
	-37.5	5	10	c4	0.5		S'4	0.0001		WRL1-3 ST-K
4	-62.5	25	26	T4	650		S4	0.00025		WVP1-3 ST
	-75	12.5	0.00625	c5	2000		S'5	0.0001		WRL WA-K
5	-150	75	46.66667	T5	3500		S5	0.0001		WVP2 PZ/WA

9.2.5 Uitwerking stopfase PP2 meetraai West

Het kalibratieresultaat is opgenomen in tabel 9.4.

Net als bij raai Noord zijn in de kalibratie voor raai West de volgende aanpassingen nodig geweest ten opzichte van de uitwerking voor de pompfase:

- Doorlaatvermogen in de watervoerende laag van de Sterksel Formatie groter ($650 \text{ m}^2/\text{d}$).
- Weerstand van de Sterksel kleilaag geringer (0,5 d).
- Weerstand van de Holocene kleiige deklaag iets omhoog (130 d).
- Bergingscoëfficiënten behoorlijk klein (totaal $8 \cdot 10^{-4}$ voor het gehele eerste watervoerende pakket en totaal $2,3 \cdot 10^{-4}$ voor alle waterremmende lagen samen).

Bij de uitwerking van meetraai West is de kleinste kwadraten som $0,35496 \text{ m}^2$. Er zijn 16 meetpunten gebruikt met 13 meettijdstippen zodat kan worden afgeleid dat het gemiddelde verschil tussen gemeten en berekende stand per meettijdstip niet meer is dan 4 cm.

Tabel 9.4 Kalibratieresultaat MLU voor raai West in de stopfase van PP2 na onttrekking van 150 m³/u gedurende 3 dagen (file a27w2-6final.mlu)

Aquifer	Base [m]	Thickness [m]	Kh [m/d]	Code	T [m ² /d]	#	Code	S [-]	#	Name
1	1.9	0.1	10	T1	1		S1	0.2		WVPO HOL
	0	1.9	0.014615	c2	130		S'2	0.00001		WRL1 HOL-K
2	-7.5	7.5	100	T2	750		S2	0.0001		WVP1-1CEC
	-10	2.5	25	c3	0.1		S'3	0.0001		WRL1-2
3	-32.5	22.5	44.44444	T3	1000		S3	0.000514		WVP1-2 KR/UR
	-37.5	5	10	c4	0.5		S'4	0.00002		WRL1-3 ST-K
4	-62.5	25	26	T4	650		S4	0.0002		WVP1-3 ST
	-75	12.5	0.00625	c5	2000		S'5	0.0001		WRL WA-K
5	-150	75	46.66667	T5	3500		S5	0.0001		WVP2 PZ/WA

9.3 Samenvatting van de geohydrologische eigenschappen van de bodemlagen

In tabel 9.5 zijn de parameterwaarden bijeengebracht die volgen uit de kalibratie op de metingen tijdens de pompproeven op de verschillende pompputten in diverse testfasen.

Er blijkt enige spreiding in de bepaalde parameterwaarden te blijven. Deels komt die spreiding voort uit de geologische situatie (lokale heterogeniteit en richtingafhankelijkheid) en deels uit de gevolgde bepalingsmethode (proeven op volkomen of onvolkomen pompputten; proeven met verschillende duren). De waarden die in de tabel groen zijn gemarkeerd, worden als betrouwbaar gezien. De geel gemarkeerde waarden zijn minder betrouwbaar, omdat bijvoorbeeld waarden afgeleid zijn voor lagen waar weinig tot geen metingen beschikbaar waren of omdat de analyse van onvolkomen pompput PP2 niet tot een passend antwoord leidde. De waarde voor het doorlaatvermogen en de berging van het tweede watervoerende pakket (dat gevormd wordt door de zandlagen in de Formatie van Peize Waalre) is constant gehouden omdat ijking voor die parameter met pompproeven in het eerste watervoerende pakket niet mogelijk is (oranje gemarkeerde cellen).

Tabel 9.5 Samenvatting van MLU kalibratieresultaten voor de uitgevoerde pomp- en stopproeven in het gebied Tussen de Rails te Utrecht

Parameterwaarden na kalibratie met MLU van pomp- en stopproeven								
Geohydrologische laag	parameter	pompfase volkomen put		pompfase onvolkomen put		stopfase onvolkomen put		pompfase volkomen put
		PP1W	PP1N	PP2W	PP2N	SP2W	SP2N	RP3
Doorlaatvermogen watervoerende sublagen [m2/d]								
Holoceen	kD0	1	1	1	1	1	1	1
Echteld	kD1-1	900	1040	750	750	750	750	200
Kreftenheije/Urk	kD1-2	500	880	1000	1000	1000	1000	1525
Sterksel	kD1-3	1000	770	125	150	650	650	575
Peize/Waalre	kD2	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500
Bergingscoëfficiënt watervoerende sublagen [-]								
Holoceen	S0	0.15	0.15	0.2	0.17	0.2	0.2	0.15
Echteld	S1-1	1.0E-4	5.0E-6	1.0E-4	2.0E-6	1.0E-4	1.0E-4	6.0E-5
Kreftenheije/Urk	S1-2	2.0E-3	1.5E-3	2.0E-3	1.0E-3	5.0E-4	2.5E-4	2.0E-3
Sterksel	S1-3	1.0E-3	1.0E-4	2.0E-4	1.0E-3	2.0E-4	2.5E-4	2.0E-4
Peize/Waalre	S2	1.0E-4	1.0E-4	1.0E-4	1.0E-4	1.0E-4	1.0E-4	1.0E-4
Weerstand waterremmende lagen [d]								
Holocene klei	c1	55	95	40	50	130	130	270
Kreftenheije klei	c1-2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Sterksel klei	c1-3	1	0.1	20	10.0	0.5	0.5	2
Waalre klei	c2 (Wa)	5000	5000	2000	2000	2000	2000	5000
Samenvattend								
Weerstand Holoceen	c1 [d]	55	95	40	50	130	130	270
Doorlaatvermogen WVP1 = 1+2+3	kD1 [m2/d]	2400	2690	1875	1900	2400	2400	2300
Berging WVP1 = 1+2+3	S1	3.1E-3	1.7E-3	2.3E-3	2.0E-3	8.0E-4	6.0E-4	2.3E-3

Samenvattend wordt het geohydrologisch schema weergegeven voor de verschillende sublagen zoals onderscheiden in het gebied tussen de Rails met een range van mogelijk parameterwaarden zoals in de volgende tabel 9.6. Met betrekking tot het doorlaatvermogen van de sublagen wordt de range zeer sterk bepaald door het voorkomen van grindige lagen. Bij het retourveld rond RP3 zijn de grindige lagen juist wat meer in de Kreftenheije Formatie aanwezig dan ter plekke van het proefveld van PP1 en PP2.

Tabel 9.6 Uitkomst van kalibratie voor de verschillende pomp- en stopproeven voor minimale en maximale waarden in het lokale geohydrologisch schema in het gebied Tussen de Rails te Utrecht

Geohydrologische interpretatie pompproeven A27		Parameterwaarden na kalibratie voor diverse pomp- en stopproeven	
Geohydrologische laag	parameter	min	max
Doorlaatvermogen watervoerende sublagen [m²/d]			
Holoceen	kD0	1	1
Echteld	kD1-1	200	1040 *)
Kreftenheije/Urk	kD1-2	500	1525 *)
Sterksel	kD1-3	575	1000 *)
Peize/Waalre	kD2	3500	3500
Bergingscoëfficiënt watervoerende sublagen [-]			
Holoceen	S0	0.15	0.2
Echteld	S1-1	2.0E-6	1.0E-4
Kreftenheije/Urk	S1-2	2.5E-4	2.0E-3
Sterksel	S1-3	2.0E-4	1.0E-3
Peize/Waalre	S2	1.0E-4	1.0E-4
Weerstand waterremmende lagen [d]			
Holocene klei	c1	40 à 130	270
Kreftenheije klei	c1-2	0.1	0.1
Sterksel klei	c1-3	0.5 à 1	2
Waalre klei	c2 (Wa)	2000	5000
Samenvattend			
Holocene klei	c1 [d]	40 à 130	270
WVP1 = 1+2+3	kD1 [m ² /d]	2300	2690
WVP1 = 1+2+3	S1 [-]	6E-4	3.1E-3
Waalre klei	c2 [d]	2000	5000

*) de maximale waarden per sublaag mogen niet worden gesommeerd tot een totaal maximum voor het gehele watervoerende pakket

Uit de uitwerking van de verschillende pompproeven blijkt enige variatie in de parameterwaarden. Er kan onderscheid worden gemaakt in het bovenste en onderste deel van het eerste watervoerende pakket. De meest waarschijnlijke combinaties van waarden voor de minimale en maximale geohydrologische parameters zijn in de onderstaande tabel 9.7 vermeld.

Tabel 9.7 *Uitkomst van kalibratie voor de verschillende pomp- en stopproeven in het lokale geohydrologisch schema in het gebied Tussen de Rails te Utrecht, met onderscheid naar boven en onderzijde van eerste watervoerende pakket*

Formatie	Geohydrologische parameter	Eenheid	PP1/PP2	RP3
Holocene kleiige toplaag	C (WRL1)	[d]	40 à 130	270
Zanden van Echteld, Kreftenheije, Urk	kD (WVP1-1/2)	[m ² /d]	1415 à 1920	1725
	S (WVP1-1/2)	[-]	3.5E-4 à 2E-3	2.0E-3
Klei bovenkant Sterksel	C (WRL1-3)	[d]	0.5 à 1	2
Zanden van Sterksel	kD (WVP1-3)	[m ² /d]	650 à 1000	575
	S (WVP1-3)	[-]	2E-5	2E-4

Tenslotte zijn in tabel 9.8 de parameterwaarden aangegeven voor het regionaal onderscheiden eerste watervoerende pakket dat voorkomt tussen circa NAP en NAP-60 m en wordt gevormd door de stapeling van zandlagen uit de Formaties van Echteld, Kreftenheije, Urk en Sterksel.

Tabel 9.8 *Uitkomst van kalibratie voor de verschillende pomp- en stopproeven voor minimale en maximale waarden en schatting van verwachtingswaarden in het regionale geohydrologisch schema in het gebied Tussen de Rails te Utrecht. De eigenschap hydraulische weerstand c van de Waalre klei die volgt uit de proeven kent een grote mate van onzekerheid. De eigenschappen van het tweede watervoerend pakket zijn niet gemeten en de aangegeven waarden volgen uit regionale modellen.*

Geohydrologische interpretatie pompproeven A27 met MLU		Parameterwaarden na kalibratie voor diverse pomp- en stopproeven		
laagschema		min	verwacht	max
toplaag	C1 [d]	40	100	270
WVP1	kD1 [m ² /d]	2300	2400	2700
	S1 [-]	6E-4	1.5E-3	3E-3
Scheidende laag Waalre klei	C2 [d]	1000	2000	5000
	WVP2	kD2 [m ² /d]	3500	4000
	S2 [-]	1E-4	1E-4	1E-4

In bijlage B van het verkennend rapport [Deltares 2016B] werd een laagindeling met verwachte parameterwaarden en marges aangegeven. Het doorlaatvermogen van het eerste watervoerende pakket werd daarbij geschat op 1750 m²/d met een maximum van 2500 m²/d. Uit de uitgevoerde pompproeven blijkt dat het werkelijk doorlaatvermogen aan de bovengrens van de schatting ligt.

De weerstand van de Waalre klei werd destijds geschat op 650 tot 10.000 dagen. Uit de pompproeven volgt dat de waarschijnlijk voorkomende weerstand van de Waalre klei binnen de eerder aangehouden marge valt.

Uit de proeven is duidelijk geworden dat de geohydrologische toestand van het watervoerend pakket op de locatie spanningswater betreft met een geringe bergingscoëfficiënt.

10 Evaluatie van de retourproeven

10.1 Verloop van de retourproeven op RP3

De uitvoering van retourproeven op de traditionele retourput RP3 duurde door verstoppingsproblemen langer dan de voorgenomen planning om de proef in 1 maand tijd uit te voeren. Voor een volledige samenvatting wordt verwezen naar het logboek in bijlage D. Het verloop van debieten en waterstanden in de peilbuis in de omstorting van RP3 is aangegeven in figuren 10.1 en 10.2.

Na de oplevering en uitvoering van de pompproef op RP3 is de retourproef gestart op 10 april. Op 13 april werd de retourproef stilgezet omdat de stijghoogte in de omstorting van de retourput ver boven maaiveldniveau opliep met mogelijk risico van opbarsten van de afdichting rond de retourput. Omdat mogelijk een zeer snelle verstopping van de retourput optrad, is KWR om advies gevraagd. KWR concludeerde dat verstopping door ontgassing van het geretourneerde water een rol kon spelen (zie paragraaf 10.5) en adviseerde om monsternamen van water uit de leiding uit te voeren, de retourput RP3 schoon te pompen en de leiding vooraf aan herstart beter te spuien.

Na schoonpompen, spuien en herstart is de proef herstart. Die retourtest duurde van 18 tot 26 april. Daarbij trad grote fluctuatie in de optredende drukken, wijzend op verstopping.

Bij nader onderzoek is vastgesteld dat de afsluiter in het leidingsysteem aan het begin van de retourleiding de volumestroom regelde, waarbij de onderwaterpomp op vol vermogen draaide. Omdat de afsluiter ver dicht stond, traden wervelingen op, die tot ontgassing kunnen leiden. Op 30 april is een frequentieregelaar geplaatst als debietregeling ter aansturing van de pomp in PP2. Tevens is een vat geplaatst direct voor de invoer in RP3 als ontgassingsmaatregel. De retourinstallatie is op 16 mei verder geoptimaliseerd door de instroming in het ontgassingsvat en een drukventiel op het vat aan te passen.

De druk in de leiding was naar beoordeling door hydraulisch specialisten te laag. Verdere drukverhoging in de retourleiding kon echter met het beschikbare materieel niet worden gerealiseerd omdat de aanwezige retourleiding daar niet tegen bestand was.

Op 16 mei was de retourinstallatie zover geoptimaliseerd dat de retourproef kon worden gestart. Tijdens de stappen in de proef na 16 mei is het retourdebiet als volgt gevarieerd:

- Start op 16 mei 12:00 met debiet verlopend naar 68 m³/u en vervolgens afnemend (situatie 54 m³/u op 18/05 12:00 hierna geëvalueerd).
- 18 mei 15:00, retourdebiet 69 m³/u (situatie 19/05 15:00 en situatie 22/05 14:00 hierna geëvalueerd).
- 22 mei 15:00, retourdebiet 81 m³/u (situatie 23/05 03:00 hierna geëvalueerd).
- 23 mei 09:00, retourdebiet 93 m³/u (situatie 24/05 09:00 hierna geëvalueerd).

Uit de vergelijking van het verloop van de grondwaterstanden in de peilbuis in de omstorting van RP3 met de retourdebieten is afgeleid dat de stijging van de grondwaterstand bij de start van de diverse retourproeven steeds minder is geworden (rond 9 april en 18 april circa 140 cm, op 30 april circa 75 cm, op 15 mei circa 50 cm). De drukafname in de retourput is het effect van het intermitterend schoonpompen van de put en de verbetering van de ontgassing in de retourleiding. Daarom is alleen de laatste proevenserie maatgevend.

Ook tijdens de laatste proevenserie op RP3 was echter nog sprake van putverstopping, die is te constateren uit een toenemende stijghoogte in de putomstorting bij een in stappen gelijkblijvend debiet. Bij peilbuizen in de nabijheid (B22) is de stijghoogte per stap debietverhoging redelijk constant (zie figuur 10.2).



Figuur 10.1 Verpompte debieten tijdens alle proeven op de traditionele retourput RP3



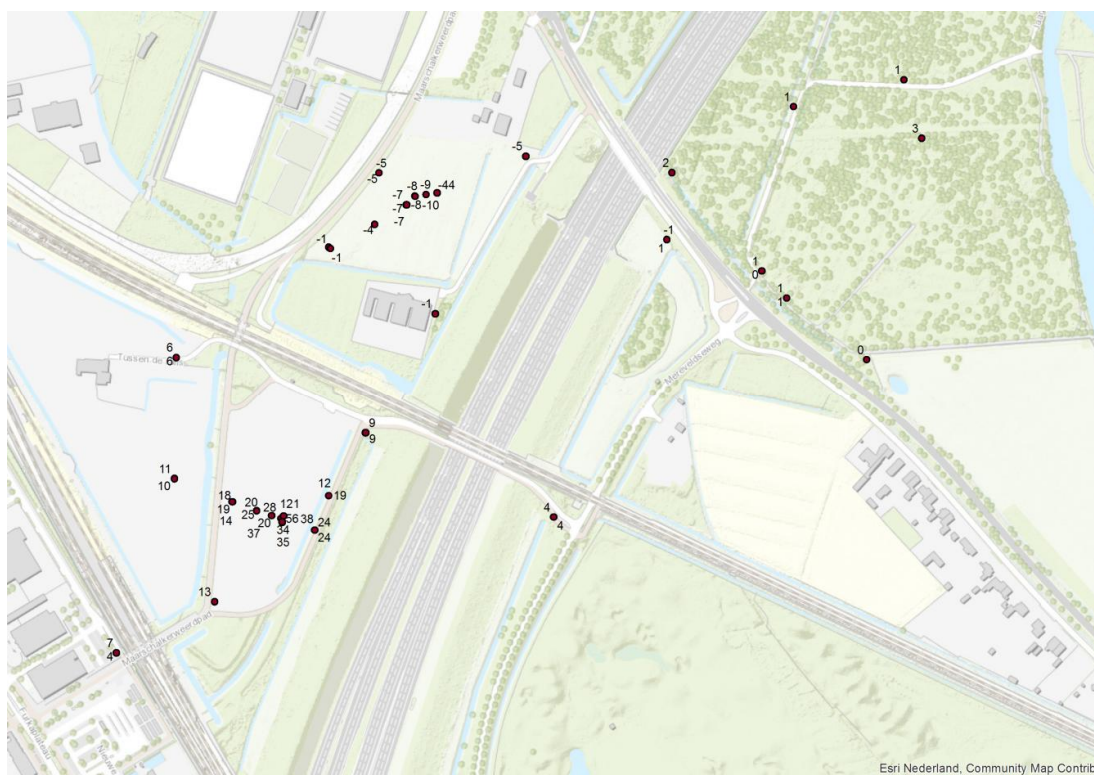
Figuur 10.2 Waterstand in de peilbuis in de omstorting en in de peilbuizen B22-1 en B22-2 op 10 m afstand tijdens alle proeven op de traditionele retourput RP3

10.2 Stijghoogtepatroon tijdens de retourproeven op RP3

Op 18 mei rond 13:00 werd 54 m³/u onttrokken uit PP2 en geretourneerd in RP3.

De situatie is vergeleken met een referentiesituatie op 16 mei om 10:00 toen het bemalingsstelsel enkele dagen uit was.

De verandering van de grondwaterstand door onttrekken en retourneren is weergegeven in figuur 10.3. Negatieve waarden betekenen een stijging van de grondwaterstand ten gevolge van de retourbemaling.



Figuur 10.3 Stijghoogteverandering in de meetpunten in WVP1 [cm] bij onttrekken uit PP2 en retouren via RP3 op 20180518 ($Q=54 \text{ m}^3/\text{u}$) t.o.v. de nulsituatie op 20180516 ($Q=0$). Negatieve waarden betekenen een stijging van de grondwaterstand ten gevolge van de retourbemaling.

Uit het stijghoogtebeeld komt naar voren dat de stijging van de grondwaterstand ter plekke van de (volkomen) retourput RP3 geringer is dan de verlaging ter plekke van de (onvolkomen) onttrekkingsput PP2. Er zijn echter ook verschillen in de reacties bij omliggende peilbuizen rond de putten. Die verschillen kunnen niet alleen terug te voeren zijn op verschillende stroming bij een volkomen en een onvolkomen put. Er is waarschijnlijk effect van groter doorlaatvermogen nabij de retourput dan bij de onttrekkingsput. In de boorbeschrijving van RP3 (zie bijlage G) komt tussen 9 en 12 m-MV een grindlaag voor waaronder en waarboven over meerder meters grindig uiterst grof zand is gevonden. Mogelijk is het doorlaatvermogen bij RP3 groter dan uit de pompproef-evaluatie volgt. Berekeningen met MWell wijzen daar op. Bij PP1 is er geen grindlaag en is het zand iets minder grof. Om het verlagingenbeeld te verklaren zijn meer modelberekeningen nodig met een programma waarin met heterogeniteit rekening kan worden gehouden (zoals iMod). In dit stadium van evaluatie van de proeven met MLU kon dat nader onderzoek nog niet worden uitgevoerd.

10.3 Uitwerking van de putcapaciteit van RP3 tijdens de retourproeven

Om de werking van de retourput te beoordelen is onderzocht wat de ontwikkeling is van de putcapaciteit of specifieke volumestroom in de tijd. De putcapaciteit is het debiet gedeeld door de stijghoogteverandering in de retourput. Volgens de theorie van putstroming zou die verhouding redelijk constant moeten zijn als er geen verstopping optreedt. Het verloop van de putcapaciteit in de tijd tijdens de retourproeven kan worden gebruikt ter beoordeling van de staat van de retourput.

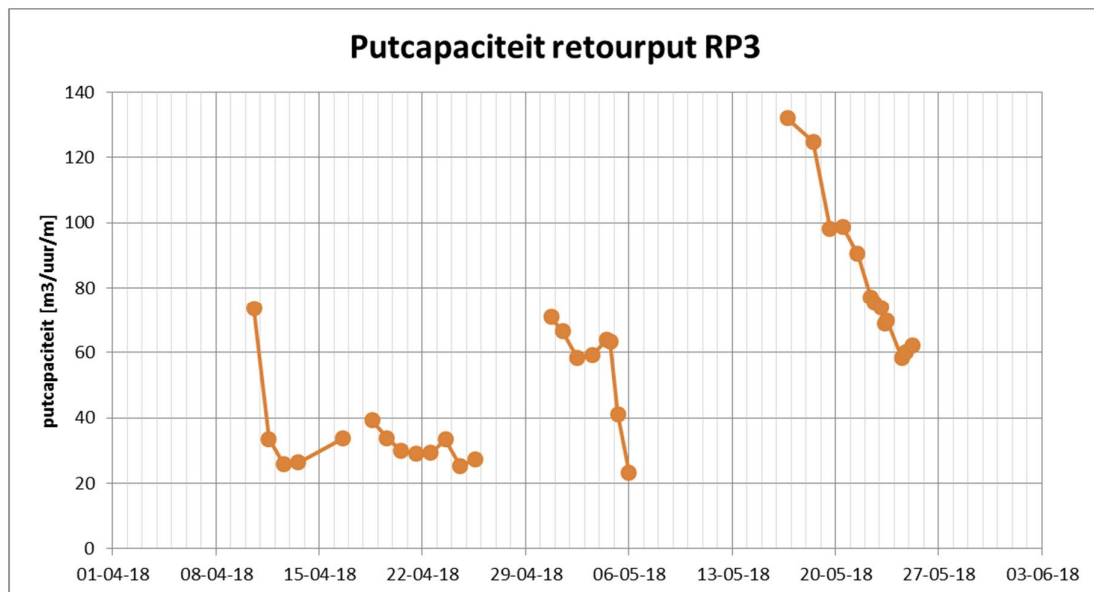
De putcapaciteit tijdens de retourproeven is als volgt uitgewerkt.

Voor de uitwerking van de putcapaciteit kon slechts van de stijghoogten gebruik worden gemaakt die zijn gemeten in de peilbuis in de omstorting van retourput RP3 omdat de geplaatste opnemer in de stijgbuis van put RP3 niet werkte. Aangezien door KWR werd verwacht dat er sprake is van een gasverstopping die zich voornamelijk voordoet in de omstorting en op de boorgatwand, levert de aanpassing van de meetmethode geen beperking in de uitwerking,

Bij uitwerking van de putcapaciteit uit de stijghoogteverandering door de retourproeven is gecorrigeerd voor de grondwaterverlaging die optreedt door onttrekking uit PP2:

- Bepaling van de stijghoogteverhoging in het retourveld uit de metingen door het retouren in het retourveld met put RP3;
- Afleiding van stijghoogteverlaging in het retourveld door onttrekking uit pompput PP2 door beschouwing van de stijghoogteverandering in eerdere pompproeffases⁵;
- Bepaling van de som van verhoging RP3 en verlaging door PP2 ter plaatse van RP3. Dit is de gecorrigeerde stijghoogteverandering in de retourput door het retouren.
- Bepaling van de putcapaciteit van RP3 op basis van het verpompte debiet en de gecorrigeerde stijghoogteverandering.

De afgeleide waarden voor de putcapaciteit van de retourput RP3 zijn weergegeven in de volgende tabel 10.1. De grafiek van de afgeleide putcapaciteit is weergegeven in figuur 10.4.



Figuur 10.4 Specifieke volumestroom of capaciteit van RP3, met het verloop tijdens de retourproef

⁵ De verlaging ter plaatse van RP3 als gevolg van de onttrekking bij PP2 is afgeleid uit de pompproeven op PP2 die in maart zijn gedaan. Alle uitgevoerde korte pompproeven bij PP2 gaven ongeveer hetzelfde verlagingbeeld. De verlaging op 22 maart 08:00 na inzetten van de pompproef op 21 maart 08:00 is als vergelijking meegenomen. Bij het onttrekken uit PP2 met een debiet van 150 m³/u bedroeg de verlaging bij B1_02 en RP3 (beide op een afstand van 335 m van PP2) $dh_{PP2} = 11,45$ cm. Deze verlaging is omgerekend naar waarden van stijghoogteverlagingen in RP3 bij de debieten die tijdens de retourproeven werden verpompt. De verlaging bij RP3 door onttrekking bij PP2 is als correctie bij de stijging van de grondwaterstand opgeteld die ter plekke van RP3 ten opzichte van de nulstand werd gemeten.

Tabel 10.1 Opname van stijghoogten en debieten ter bepaling van de capaciteit van RP3

Datum opname	Tijdstip opname	Gws h_{RP3} nabij RP3 [cmNAP]	Debiet Q [m ³ /u]	Stijging Δh_{RP3} tgv RP3 [cm]	Correctie PP2 $\Delta h_{RP3} - \Delta h_{PP2}$ [cm]	Putcapaciteit SQ [m ³ /u/m]
Nulstand bepaling en start proef 1						
09-Apr	14:00	59,52	0	0	0	-
10-Apr	14:00	121,18	48	62	65	73,5
11-Apr	14:00	207,57	51	148	152	33,6
12-Apr	14:00	229,78	45	170	174	25,9
13-Apr	14:00	226,67	45	167	171	26,4
Herstart proef 1						
16-Apr	14:00	198,43	48	139	143	33,7
Herstart proef 1 met verbeterde spuiprocedure						
18-Apr	14:00	200,45	57	141	145	39,2
19-Apr	14:00	197,85	48	138	142	33,8
20-Apr	14:00	196,77	42	137	140	29,9
21-Apr	14:00	200,63	42	141	144	29,1
22-Apr	14:00	199,71	42	140	143	29,3
23-Apr	14:00	190,74	45	131	135	33,4
24-Apr	14:00	211,78	39	152	155	25,1
25-Apr	14:00	209,43	42	150	153	27,4
Proef 2 na plaatsing van frequentieregelaar en ontgassingsvat						
30-Apr	18:00	131,6	54	72	76	70,9
01-Mei	12:00	132,37	51	73	77	66,5
02-Mei	12:00	133,39	45	74	77	58,2
03-Mei	12:00	132,22	45	73	76	59,1
04-Mei	12:00	130,91	48	71	75	64,0
04-Mei	18:00	212,8	102	153	161	63,3
05-Mei	06:00	292,69	99	233	241	41,1
05-Mei	23:55	274,12	51	215	218	23,3
Wijziging retoursysteem en verbeterd ontgassingsvat; bepaling nulstand en uitvoering proef 3						
15-Mei	10:00	56,84	0	-	-	-
16-Mei	18:00	105,84	72	49	54	132,1
18-Mei	12:00	98,13	57	41	46	124,9
19-Mei	15:00	118,93	66	62	67	98,3
20-Mei	12:00	121,41	69	65	70	98,8
21-Mei	12:00	127,85	69	71	76	90,5
22-Mei	10:00	133,9	63	77	82	77,0
22-Mei	16:00	154,31	78	97	103	75,4
23-Mei	03:00	160,28	81	103	110	73,9
23-Mei	09:00	163,94	78	107	113	69,0
23-Mei	12:00	187,11	96	130	138	69,8

Datum opname	Tijdstip opname	Gws h_{RP3} nabij RP3 [cmNAP]	Debiet Q [m ³ /u]	Stijging Δh_{RP3} tgv RP3 [cm]	Correctie PP2 $\Delta h_{RP3} - \Delta h_{PP2}$ [cm]	Putcapaciteit SQ [m ³ /u/m]
24-Mei	12:00	208,86	93	152	159	58,4
24-Mei	18:00	132,98	48	76	80	60,1
25-Mei	06:00	134,92	51	78	82	62,2

Uit de retourproef op RP3 is vastgesteld dat bij de eerste 2 pogingen van de retourproef een snelle afname van de capaciteit van RP3 optrad tot een waarde van circa 25 m³/uur/m. Bij de derde poging is de trend sterk dalend tot 21 m³/uur/m. Bij de vierde fase is de retourinstallatie verbeterd met een aangepast ontgassingsvat. Tussentijds is de retourput schoongepompt door intermitterend pompen met een hoog debiet. Het blijkt dat na het schoonpompen de retourput een goede capaciteit terugkrijgt. De verstopping door gasvorming is dus goed te verwijderen. Bij opvoeren van het retourdebiet naar RP3 na 22 mei tot hoeveelheden groter dan 50 m³/uur neemt de capaciteit verder af.

Op basis van de dikte van de holocene kleilaag, 5 m ter plekke van de retourput met een maaiveldhoogte van NAP + 2,63 m, zou de stijghoogte mogen toenemen als gevolg van het retouren tot 4,45 m + NAP, uitgaande van een volumegewicht van 15 kN/m³ van de siltige klei. Dat is circa 3,9 m hoger dan de grondwaterstand. Bij een retourdebiet van 57 m³/uur treedt een stijging op van 0,41 m op. Dus eigenlijk zou er in de retourput 540 m³/uur ingebracht moeten kunnen worden als er geen verstopping zou optreden.

Omdat de grondwaterstanden in het gebied relatief hoog zijn ten opzichte van maaiveld wilden we de grondwaterstijghoogte rond de retourput niet meer dan 1,5 m opzetten vanwege veiligheid en risico van langsloopsheid van de retourput. Op basis van de bodemopbouw mocht dan worden verwacht dat er een debiet van ongeveer 150 m³/uur in een traditionele retourput teruggebracht kon worden.

10.4 Verloop van de retourproeven op de DSI-strengen

Ten behoeve van het onderzoek in het tweede deel van de retourproeven naar het functioneren van een DSI-retoursysteem zijn 2 DSI-strengen geplaatst:

- Streng 1 op het retourveld op grote afstand (340 m) van PP2.
- Streng 2 achter de zuivering op korte afstand (55 m) van PP2.

Voor de plaatsing van de controlepeilbuizen naast de DSI-strengen wordt verwezen naar paragraaf 5.4. De ontwikkeling van de grondwaterstanden is weergegeven in figuur 10.6.

Streng 2 naast de zuivering is van 30 mei tot 4 juni 12:00 belast met een retourdebiet van circa 48 m³/uur. De ontwikkeling van de grondwaterstanden is weergegeven in figuur 10.5.

Streng 1 op het retourveld is van 4 juni 12:00 tot 29 juni belast met een retourdebiet oplopend van 50 tot maximaal 177 m³/uur.



Figuur 10.5 Stijghoogteverandering bij DSI-streng 2 achter de zuivering. Retour op streng 2 was van 30 mei tot 4 juni 12:00. Effecten daarna zijn het gevolg van pompen uit PP2 en retour op DSI-streng 1 in retourveld

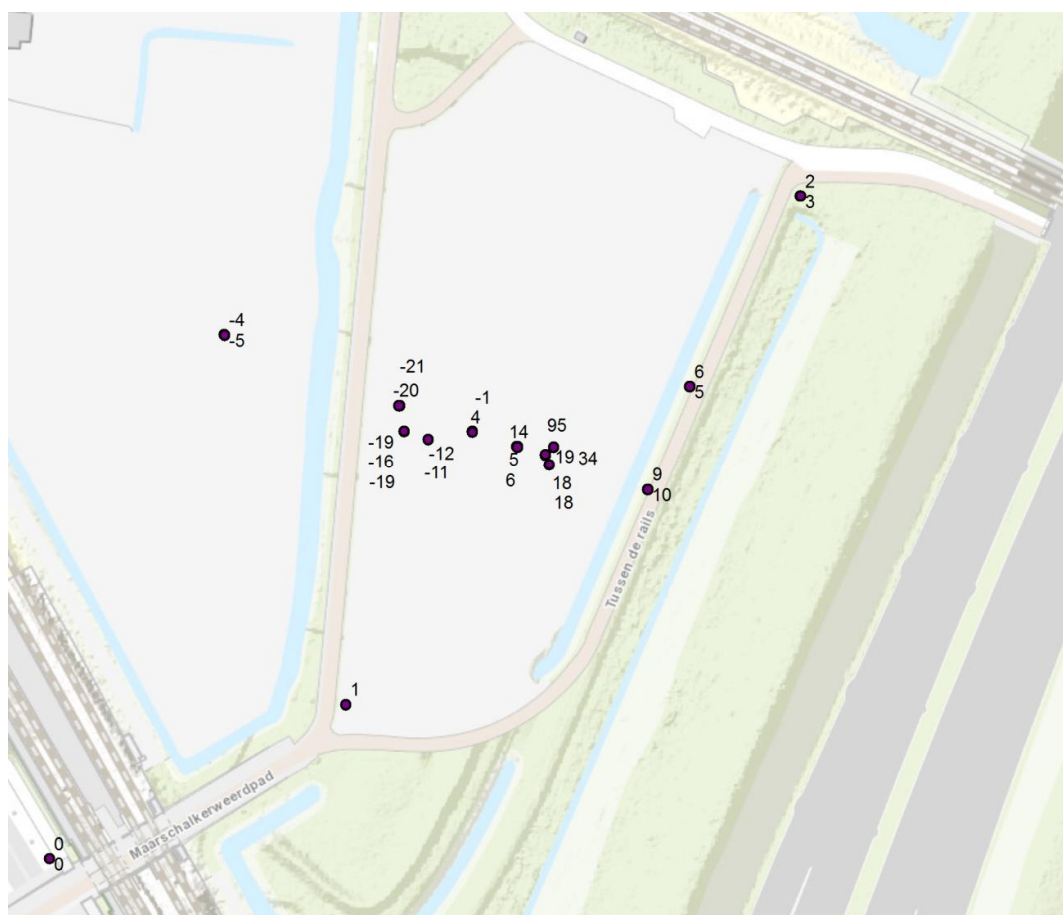


Figuur 10.6 Stijghoogteverandering bij DSI-streng 1 in het retourveld

In de nacht van 11 op 12 juni tijdens de proef op streng 1 in het retourveld viel het aggregaat uit, waardoor de onttrekking en de retourflow wegvielen. In de dagen na herstel tot 19 juni heeft het systeem weer gewerkt. Het bleek echter dat de retourleiding na herstart van het systeem op 12 juni niet goed was gespuid. Op 19 juni is RP3 kort aangeschakeld om de leiding te kunnen laten bemonsteren in het kader van de analyse van putverstopping door KWR. Vervolgens heeft kort onderhoud plaatsgevonden en op 20 juni 10:30 was het DSI-systeem weer actief tot einde van de proeven op 29 juni 10:00.

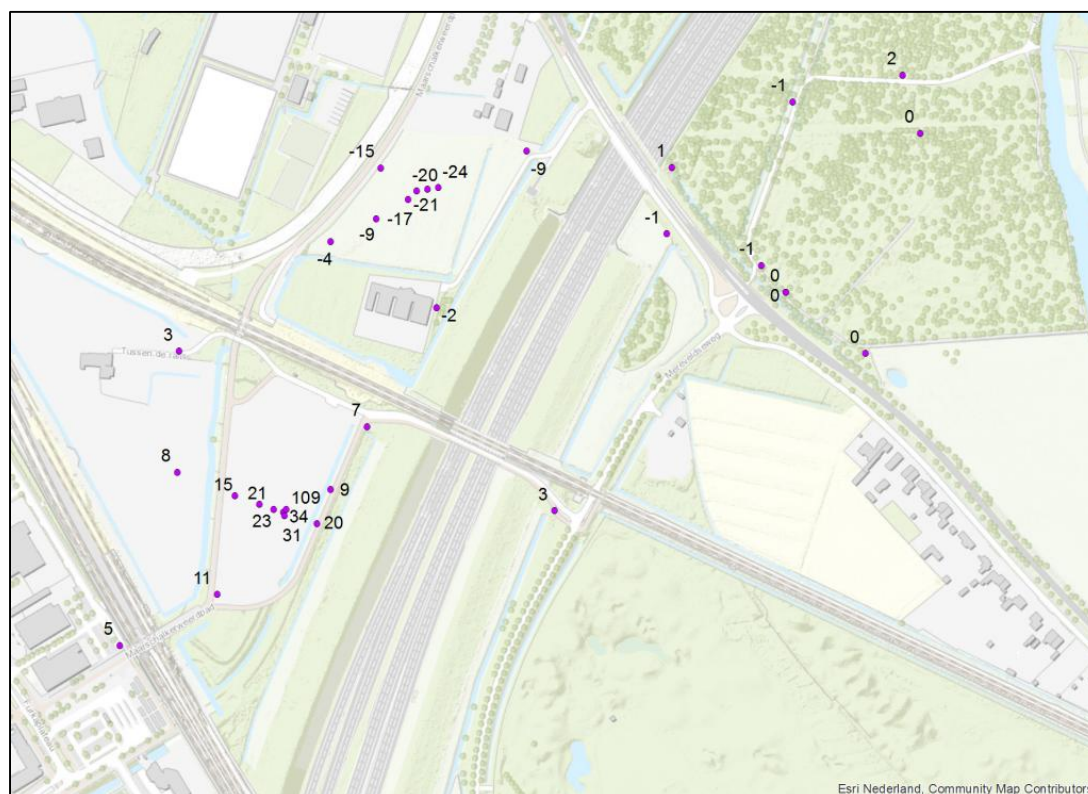
10.5 Stijghoogtepatroon tijdens de DSI-retourproeven

Het patroon van stijghoogteverandering door het onttrekken bij PP2 en retouren bij de DSI-streng 2 nabij de zuivering is in beeld gebracht met verlagingen (positieve waarden) en stijgingen (negatieve waarden) in figuur 10.7 voor de situatie op 4 juni toen $48 \text{ m}^3/\text{u}$ werd verpompt. In het beeld zijn per punt verschillende peilbuisfilters aanwezig. De verlaging in de peilbuis in de omstorting van PP2 bedraagt 95 cm terwijl de verlaging op 5 m afstand in de peilbuizen bij PP1 nog maar 18 cm is. Die verlagingen corresponderen met de verhogingen bij de peilbuizen die op enkele meters afstand van de DSI-streng staan. DSI-retour op korte afstand van de pompput is dus effectief maar beperkt wel de verlaging ter plekke van de bemaling in belangrijke mate.



Figuur 10.7 Stijghoogteverandering in de meetpunten in WVP1 [cm] bij onttrekken uit PP2 en retouren via DSI-streng 2 achter de zuivering op 20180604 ($Q=48 \text{ m}^3/\text{u}$) t.o.v. de nulsituatie op 20180527 ($Q=0$). Negatieve waarden betekenen een stijging van de grondwaterstand ten gevolge van de retourbemaling.

Het patroon van stijghoogteverandering door het onttrekken bij PP2 en retourneren bij de DSI-streng 1 in het retourveld is in beeld gebracht met verlagingen (positieve waarden) en stijgingen (negatieve waarden) in figuur 10.8 voor de situatie op 10 juni toen $48 \text{ m}^3/\text{u}$ werd verpompt.



Figuur 10.8 Stijghoogteverandering in de meetpunten in WVP1 [cm] bij onttrekken uit PP2 en retouren via DSI-streng 1 in het retourveld op 20180610 ($Q=48 \text{ m}^3/\text{u}$) t.o.v. de nulsituatie op 20180527 ($Q=0$). Negatieve waarden betekenen een stijging van de grondwaterstand ten gevolge van de retourbemaling.

Er lijkt een verschil te zijn tussen de drukontwikkeling bij de retourstreng 1 in het retourveld en de afpomping bij de onttrekkingsput PP2. De verhoging in RP3 is 24 cm terwijl de verlaging in PP2 109 cm is. Bij het onttrekken uit put PP2 treden echter ook stromingsverliezen op waardoor de verlaging daar groter is. Bij PP1 op 5 m afstand van de pompput PP2 is de verlaging 31 cm terwijl de verhoging in peilbuis B22 op 10 m afstand van de streng 20 cm is. Dat klopt wel.

Bij vergelijking van de stijghoogtebeelden bij gebruik van DSI-streng 1 op 340 m afstand en DSI-streng 2 op 55 m afstand van de onttrekkingsput blijkt wel dat retouren op grotere afstand van de onttrekkingsput inhoudt dat een grotere verlaging bij de onttrekkingsput resulteert (109 vs 95 cm).

10.6 Uitwerking van de capaciteit van de DSI-retourfilters

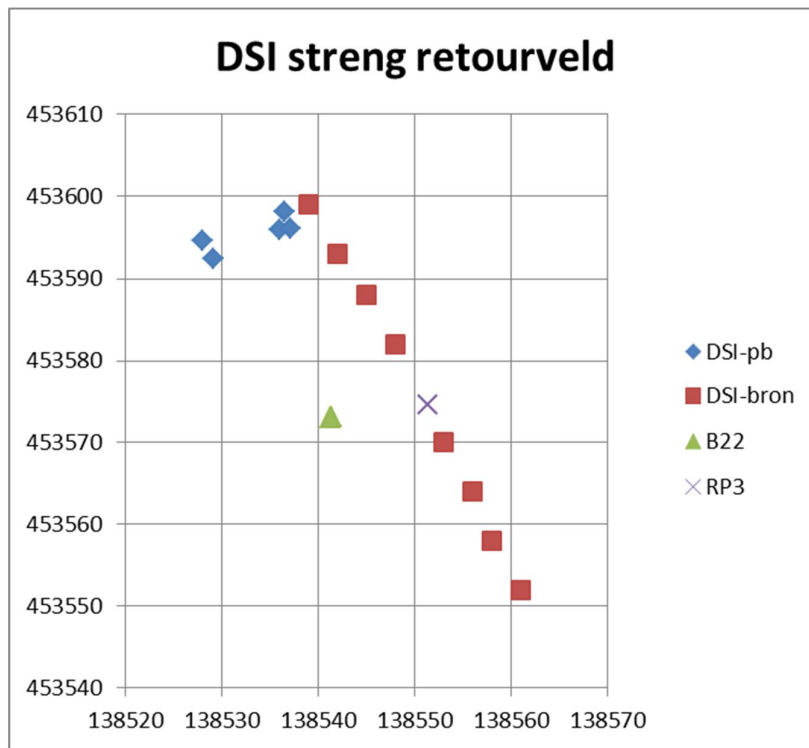
De retourflow per DSI-filter is uitgewerkt voor de DSI-streng op het retourveld.

De positie van de DSI retourfilters en de verschillende peilbuizen ter plekke is schematisch weergegeven in figuur 10.9.

De peilbuis in de omstorting van retourput RP3 ligt ongeveer middenin de DSI-streng.

Peilbuis B22 ligt eveneens halverwege de streng maar op een afstand van ongeveer 10 m zijwaarts uit de streng.

De DSI-peilbuizen staan aan het eind van de streng op circa 3 en 10 m zijwaarts uit de streng.



Figuur 10.9 Positie van de DSI-filters en diverse meetpunten in coördinaat- raster

10.6.1 Capaciteit op basis van stijghoogte bij DSI-peilbuizen

Het uitwerken van een capaciteit voor een retourstreng is anders dan voor een retourput. De debiet- en stijghoogteverdeling over de lengte van een streng is niet gelijkmatig. Daarom zijn 2 punten beschouwd: aan het eind en in het midden van de streng.

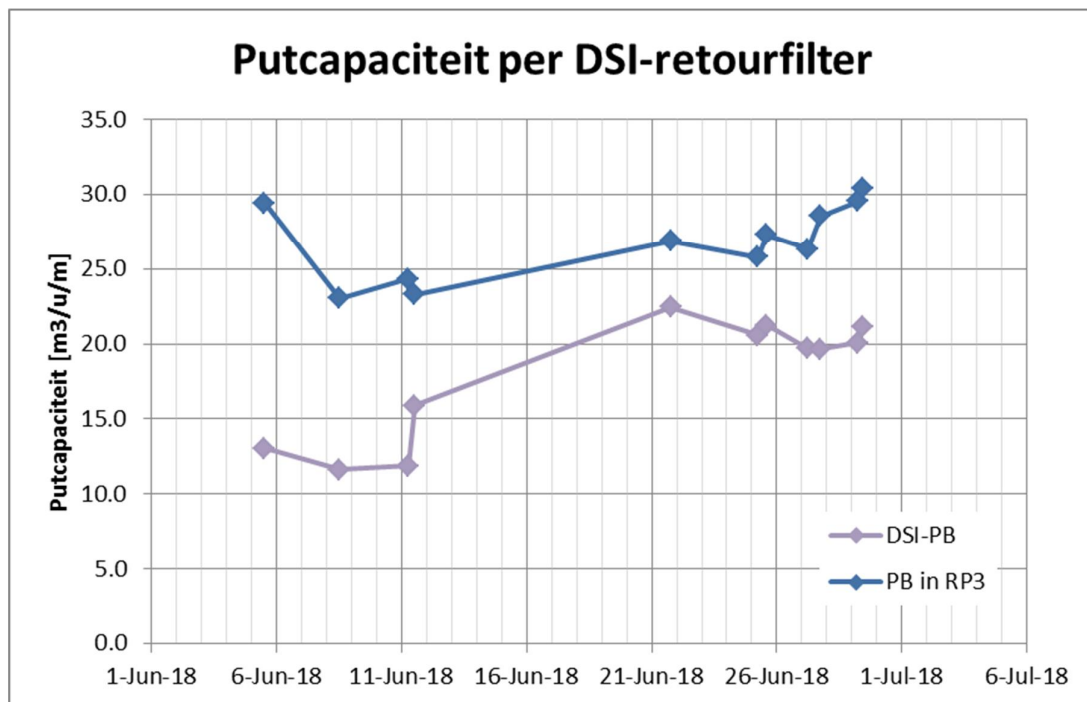
In eerste instantie is de capaciteit onderzocht voor het meest noordelijke punt waar de DSI-peilbuizen zijn geplaatst. Dat is aan het eind van de streng. De stijghoogteverandering is bepaald op de diepte van het injectiefilter (op NAP – 14,78 m). De onderkant van het 2 m lange filter in de 2 geplaatste peilbuizen DSI-PB3 en DSI-PB6 staan op 2,5 en 3,5 m afstand van het injectiepunt op circa NAP – 12,5 à – 13 m diepte. De peilbuis in RP3 geeft de stijghoogteverandering in het midden van de streng en dit is het beste punt ter vergelijking met de resultaten van de traditionele retourput. De stijghoogtetoeename in de peilbuizen bij de meetpunten bij de injectiestreng is bepaald met correctie voor de optredende verlaging bij het gerealiseerde debiet als gevolg van de onttrekking door PP2.

De gecorrigeerde stijghoogteveranderingen in de DSI-peilbuizen bij retour staan vermeld in de vijfde kolom van tabel 11.2.

Tabel 10.2 Optredende stijghoogteveranderingen in meetpunten bij retouren op DSI-streng retourveld

datum	Retour-debiet Q_{tot} [m ³ /u]	Aantal DSI-filters n_{DSI}	Debiet Qpunt [m ³ /u]	DSIPB3+6 peilbuizen $dh_{DSI corrPP2}$ [m]	RP3 Peilbuis $dh_{RP3 corrPP2}$ [m]	B22 Peilbuis $dh_{B22 corrPP2}$ [m]	Leidingdruk [mwk]
11 juni 06:00	48	8	6	0,53	0,25	0,33	1
27 juni 06:00	100	7	14,3	0,78	0,54	0,67	4
29 juni 06:00	150	6	25	1,33	0,83	1,04	geen meting
29 juni 10:00	180	6	30	1,58	1,00	1,25	10

Volgens de uitwerking voor beide DSI-peilbuizen is de capaciteit of specifieke volumestroom Q_{SDSI} van een enkel DSI-filter (berekend als $Q_{SDSI} = Q_{tot} / (dh_{corr} / n_{DSI})$) gedurende de retourproef toegenomen van $Q_{SDSI} = 11 \text{ m}^3/\text{u}/\text{m}$ naar uiteindelijk $Q_{SDSI} = 19 \text{ m}^3/\text{u}/\text{m}$ per DSI-injectiepunt.



Figuur 10.10 Putcapaciteit van DSI-retourfilters in het retourveld, verloop tijdens de retourproeven volgens meting met DSI-peilbuizen op circa 3 m afstand aan het eind van de streng en volgens meting met peilbuis RP3 halverwege de streng.

De controlepeilbuizen staan op enige afstand van het injectiepunt waardoor de werkelijk aanwezige drukhoogte bij het injectiepunt nogal wat meer kan zijn geweest. Dat blijkt ook wel omdat gaande de proef 2 DSI-punten zijn dichtgezet vanwege optredende langsluipigheid rond de filters. De kleiafdichting rond de 2 filters is waarschijnlijk opgebarsten omdat de waterdruk ter plekke te hoog werd. Verder is aangenomen dat de verdeling van debiet en stijghoogte over de injectiepunten in de streng gelijkmatig is. Waarschijnlijk geven de injectiepunten aan het eind van de streng meer debiet, terwijl de stijghoogtetoeename ter

plekke minder is dan in het midden van de streng. Daarom wordt de analyse voor de DSI op basis van deze metingen genoteerd als de maximaal opgetreden putcapaciteit. Voor een volledige vergelijking van de DSI en retourput is een nadere uitwerking nodig. In het kader van de evaluatie van de retourproeven was daar geen mogelijkheid toe.

10.6.2 Capaciteit van DSI-retour op basis van peilbuis RP3

De hierboven afgeleide waarde van de specifieke volumestroom aan het eind van een streng is groter dan voor een positie in het midden van de streng. Daarom is de exercitie herhaald door te kijken naar het effect op de druk in de leiding en naar het effect bij het meetpunt in de omstorting van RP3, dat ongeveer halverwege de streng is geplaatst. De stijghoogteverandering blijkt daar ongeveer 80% te zijn van die bij de peilbuizen DSI-PB3 en DSI-PB6 aan het eind van de streng.

De stijghoogtetoeename bij RP3 blijkt lineair te zijn met het verpompte debiet. Dit is volgens de theorie voor een niet verstoppende put correct maar het zou ook zo kunnen zijn dat ter plekke van deze peilbuis geen informatie naar voren komt van verstoppingsverschijnselen. Mogelijk is de afstand tussen RP3 en de DSI-filters te groot om eventuele verstopping die rond de DSI-retourfilters zou optreden, op te merken.

10.6.3 Werking van de DSI-retour op basis van peilbuis B22

Tevens is gekeken naar het effect op de druk in de leiding en naar het effect bij het meetpunt B22, dat ongeveer halverwege de streng is geplaatst. B22 staat op een afstand van bijna 10 m van de DSI-streng en RP3. De stijghoogteverandering is daar ongeveer half zo groot te zijn als bij de peilbuizen DSI-PB3 en DSI-PB6 aan het eind van de streng. Dit heeft met de afstand tussen de injectiepunten en de meetpunten te maken.

De stijghoogtetoeename bij B22 is vrijwel lineair met het verpompte debiet. Dit is in overeenstemming met de stromingstheorie. Vanwege de afstand kan B22 niet worden gebruikt om iets te concluderen over de eventuele verstopping van DSI-filters.

10.6.4 Capaciteit van de DSI-retourfilters op basis van de leidingdruk

De exercitie is tenslotte herhaald door te kijken naar het effect op de druk in de leiding. Met betrekking tot de leidingdruk wordt opgemerkt dat de waarde moest worden afgelezen van een analoge manometer op de veldleiding.

De toename van de leidingdruk, die evenredig zal zijn aan de druk in een DSI-filter is meer dan lineair stijgend bij toename van het debiet. Bij toename van het debiet zal wrijvingsverlies in de leiding en rond de venturi in het injectiepunt een rol gaan spelen in de ontwikkeling van de leidingdruk. Omdat enkele injectiepunten tijdens het opvoeren van het debiet zijn opgebarsten, is er naar onze mening verstopping rond de DSI-injectiepunten opgetreden.

10.7 Vergelijking van de effectiviteit van RP3 en DSI

Een onderzoeksvraag was om de effectiviteit van een DSI-systeem te vergelijken met die van een traditionele retourput. De uitvoeringswijze en de werking verschillen echter aanzienlijk.

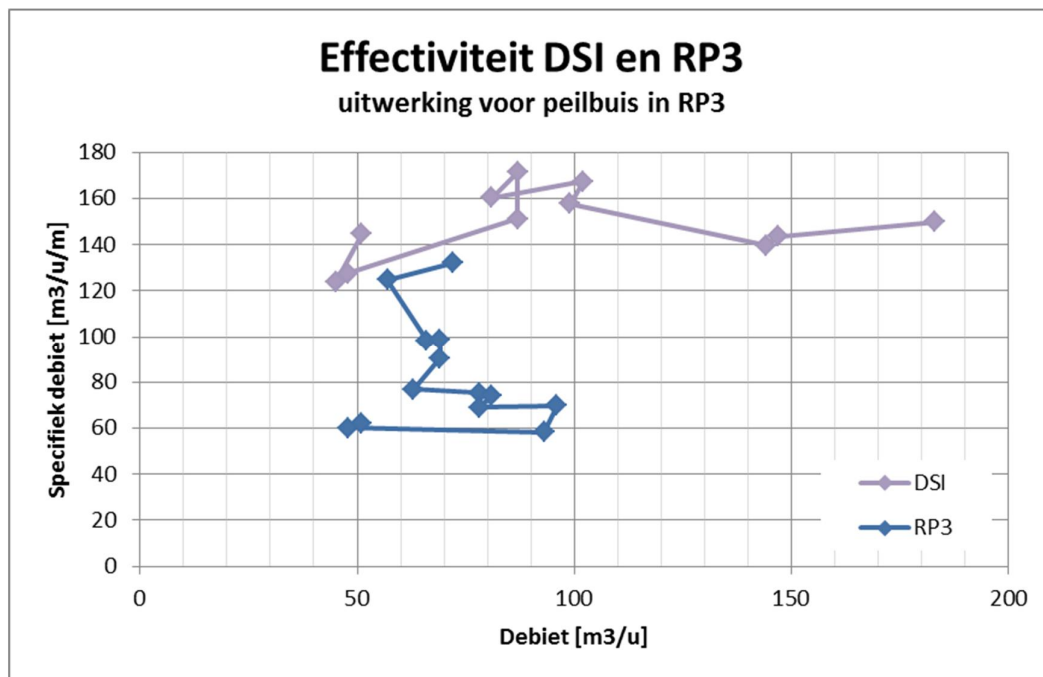
De verschillen zijn op de volgende aspecten beschouwd:

- Filteromtrek.
- Stromingssnelheid.
- Capaciteit.
- Verstoppingssnelheid.

De buis- of boorgatdiameter van de DSI-punten was 110 mm en de filterlengte 2 m, dat is $0,69 \text{ m}^2$ filteroppervlak per injectiepunt, $4,15 \text{ m}^2$ bij toepassing van 6 DSI-filters en $5,53 \text{ m}^2$ bij 8 DSI-filters. Op maaiveldniveau ging de druk in het DSI-systeem van 0,1 naar 1 bar, ofwel 1 tot 10 mwk (meter waterkolom), bij respectievelijk 48 tot $180 \text{ m}^3/\text{u}$. Dat komt uit op een gemiddelde stromingssnelheid op de boorgatwand van 8,7 m/u bij het lage debiet respectievelijk 43 m/u bij een ruim 275% hoger debiet.

De boorgatdiameter van de retourput RP3 was 600 mm en de filterlengte 45 m, dat komt neer op $84,8 \text{ m}^2$ omstortingsoppervlak in het boorgat. De stijghoogtetoeename in de omstorting ten opzichte van de nulstand verliep bij de laatste serie retourproeven op RP3 in mei van circa 0,45 m bij een debiet van $57 \text{ m}^3/\text{u}$ naar 1,6 m bij een debiet van circa $95 \text{ m}^3/\text{u}$. Dat komt uit op een gemiddelde stroomsnelheid op de boorgatwand van 0,67 m/u bij het lage debiet tot respectievelijk 1,1 m/u bij een 66% hoger debiet.

Een DSI-systeem kent een veel grotere stromingssnelheid op de boorgatwand dan een traditionele retourput. De werking van de systemen zal dus totaal verschillend zijn.



Figuur 10.11 Effectiviteit van DSI-retourfilters en traditionele retourput uitgezet als specifiek debiet versus debiet

Bij de traditionele retourput constateren we een afname van de effectiviteit of capaciteit van het systeem bij toename van het debiet. Het traditionele retoursysteem is in de onderhavige situatie gevoelig voor verstopping. Van het DSI-systeem neemt de effectiviteit veel minder af bij hoger debiet. Het retoursysteem is echter te kort actief geweest om uitspraken te doen over putverstopping op lange termijn. De bij DSI gehanteerde hoge drukken kunnen leiden tot opblazen van de kleiafdichting rond de filters. Dat laatste is een aandachtspunt bij het ontwerp en zal door goede monitoring bewaakt moeten worden. Dergelijke monitoring speelt bij traditionele retourputten echter ook een rol, om tijdig de putten te kunnen schoonspoelen.

Eigenlijk is het proces van DSI nog niet duidelijk genoeg gedocumenteerd om conclusies over toepasbaarheid en gedrag op lange termijn te kunnen trekken. Lopend onderzoek van de promovendus aan de UU, drs. Jan van Lopik, geeft waarschijnlijk duidelijkheid over de

werking van het systeem, maar zijn onderzoeksresultaten kwamen voor voorliggende evaluatie niet tijdig beschikbaar.

10.8 Evaluatie van de putverstopping tijdens retourneren uit bemonstering door KWR

Tijdens de proeven op de traditionele retourput in april en mei kwam het herhaaldelijk voor dat de waterdruk in de omstorting opliep tot een hoogte die niet met de grondwaterstroming kon worden gecorreleerd. Daaruit werd afgeleid dat er een verstopping gaande was in de omstorting of op de boorgatwand. Om het verschijnsel te kunnen verklaren, is KWR gevraagd om monsters te nemen van het water dat via de afvoerleiding naar de retourput werd verpompt.

In het rapport van KWR [KWR 2018B] met betrekking tot het verstoppingsrisico van de retourbemaling is opgemerkt dat weliswaar putverstopping optrad maar dat bij inspectie geen verstopping door vorming van neerslagen (kalk, ijzer) kon worden geconstateerd ondanks hoge kalk- en ijzergehalten in het grondwater.

De uitgevoerde meting van turbiditeit en de MFI-meting (Membraan Filtratie Index) tijdens de uitvoering van de retourproeven leverden lage waarden op. Deeltjesverstopping en vorming van chemische neerslagen vormde derhalve tijdens de proeven geen probleem. Bij een zeer langdurig gebruik van retourputten met hoog debiet kan deze verstopping wel een rol gaan spelen.

Door KWR zijn gasbemonsteringen van het retourleidingsysteem uitgevoerd. Omdat de gasdruk in het water volgens de laboratoriumbepaling 1,3 bar is en de leidingdruk daar ver onder lag (0,2 bar), was de kans op gasvorming in de leiding groot. Bij monsternamen uit de leidingen met een ballonsysteem werd 5 ml gas per liter bepaald. Er bevond zich geen zuurstof in het gas, maar voornamelijk stikstof en CO₂ en kleine hoeveelheden van andere gassen. Bij hoger debiet werden bij het aftappen uit de leiding nabij de retourput meer gasbelletjes waargenomen dan bij lage flow.

Het ontwijken van CO₂ treedt op vanwege de voorkomende hoge gehalten van opgelost calciumbicarbonaat in het grondwater. Door de ontgassing kan ook kalkneerslag optreden maar dit verschijnsel is niet waargenomen.

Metingen naar biologische activiteit zijn uitgevoerd maar deze hebben niet aangetoond dat er sprake is van verstopping van bacteriële oorsprong.

De gasvorming hangt behalve met de druk volgens KWR ook samen met turbulentie in de retourleiding. Deze turbulentie treedt op bij sterke stroming door bijna dichtgedraaide afsluiters of als gevolg van vallend water in pijpenbruggen (invoer in de retourput moet vanzelfsprekend met een invoerleiding worden gedaan). Verstopping als gevolg van ontgassing is door KWR als de belangrijkste oorzaak aangeduid voor het teruglopen van de putcapaciteit van de traditionele retourput.

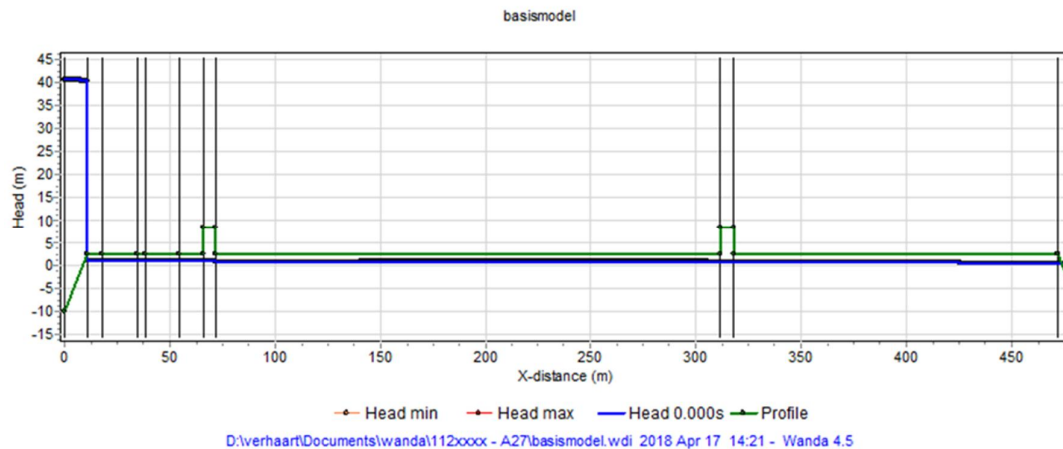
Bij de door KWR gemeten 5 ml gas per liter water in de leiding en bij een debiet van 50 m³/uur betekent het dat een hoeveelheid van 250 l/uur aan gas een retourput wordt ingebracht. Bij de dimensie van de retourput houdt dit een hoeveelheid in van 3 liter gas per uur per m² boorgatwand. Het gas zal zich echter vooral bovenin de omstorting van een retourput ophopen.

10.9 Drukverdeling in het leidingsysteem

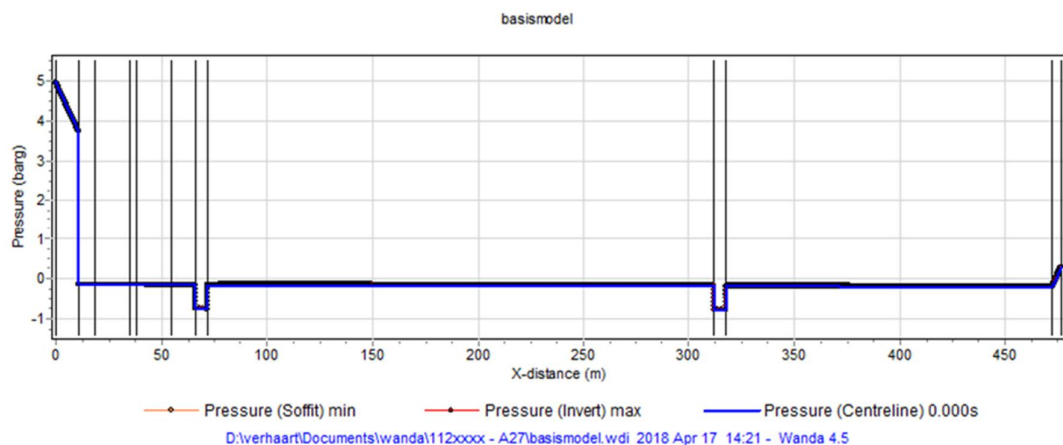
Om de werking van het leidingsysteem te controleren zijn door Deltares leidingberekeningen gemaakt met het programma Wanda. De gebruikte leiding met diverse diameters en enkele afsluiters, bochten en bruggen is in de berekeningen ingevoerd.

De globale berekening gaf inzicht in de waterdruk in het leidingsysteem.

Uit de hierna gerapporteerde leidingberekeningen volgt dat bij een debiet van 50 m³/u de verliezen in het systeem zeer beperkt zijn (orde 1 mwk). De pomp die voor de pompproeven is geïnstalleerd, levert een opvoerdruk van 40 mwk. Deze druk moet bijna volledig door de afsluiter, die in de leiding is geplaatst, worden weggeknepen om de te hoge leidingdrukken te reduceren. Deze situatie is niet ideaal omdat de waterstroming door de afsluiter heen wordt geperst waardoor daarachter een sterke turbulentie optreedt. Daarna heerst in de leiding onderdruk, vooral na de leidingbruggen. Dit is te zien in onderstaande figuren. De eerste figuur laat de hydraulische gradiënt zien en de tweede figuur de druk in het systeem. Duidelijk blijkt dat de druk in het systeem bijna overal minder dan atmosferisch is. In de praktijk werd nabij de retourput in de leiding een druk gemeten van circa 0,2 bar bij een debiet van 50 m³/uur.

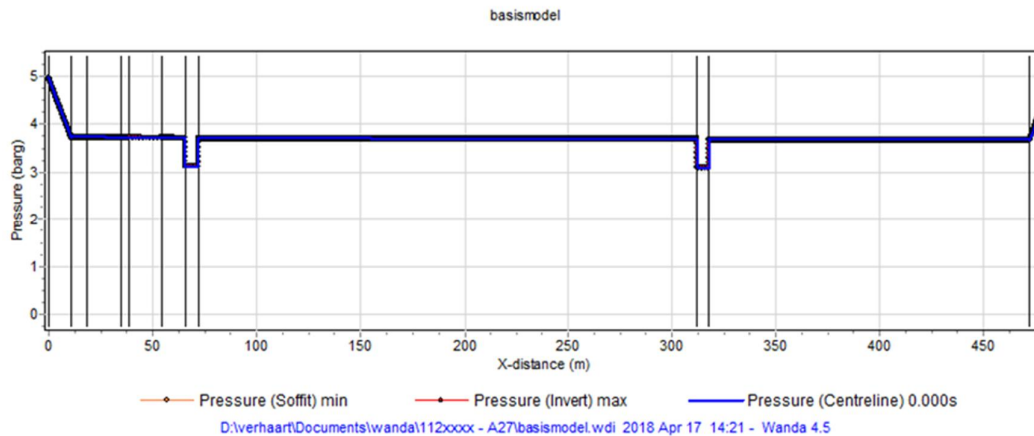


Figuur 10.12 Verloop van hydraulische gradiënt over de retourleiding



Figuur 10.13 Verloop van waterdruk over de retourleiding bij sterk geknepen afsluiter aan het begin van de leiding

Een oplossing is om niet alle druk aan het begin van de leiding weg te knippen, maar met de afsluiter aan het einde van de leiding het laatste deel van de druk weg te knippen. Als dan de afsluiter aan het begin helemaal open zou zijn gezet en de druk aan het einde was weggeknepen, zou de druk in het systeem als in figuur 10.14 zijn geweest (bij 50 m³/u). Dit levert dan wel weer een heel hoge druk op. De aannemer meende dat de leidingen (en met name de flenskoppelingen) die druk niet aan zouden kunnen. De beste oplossing was geweest om een deel van de druk met een afsluiter aan het begin weg te knippen en het resterende deel met een afsluiter aan het einde maar dit is niet zo uitgevoerd.



Figuur 10.14 Verloop van waterdruk over de retourleiding bij sterk geknepen afsluiter aan het eind van de leiding

De retourproef heeft geleerd dat het pomp- en leidingontwerp voor het gewenste debiet effect heeft op gasverstopping. Keuze van een passende pomp en leidingdiameter of toepassing van een frequentieregelaar die het aantal toeren van de pomp terugbrengt, is van belang om een juiste leidingdruk te realiseren om in de onderhavige omstandigheden gasvorming in het leidingwater te beperken.

11 Conclusies en aanbevelingen

11.1 Interpretatie van grondboringen voor peilbuizen en pompputten

Voor project A27 Ring Utrecht zijn pompproeven, stopproeven en retourproeven uitgevoerd op het terrein Tussen de Rails te Utrecht, waaruit de bodemopbouw en waarden van geohydrologische parameters konden worden afgeleid.

Uit de boorbeschrijvingen en boorgatmetingen op de pompputten is de volgende bodemopbouw afgeleid, met toenemende diepte:

- Van maaiveld (NAP + 2 à 2,5 m) tot NAP – 2 à – 5 m de Holocene kleiige deklaag.
- tot circa NAP – 10 m fijn tot grof zand van de Formatie van Echteld .
- tot circa NAP – 30 m grof zand van de Formaties van Kreftenheije en Urk waarin lokaal grindige lagen aanwezig zijn.
- tot circa NAP – 60 m fijn tot grof zand van de Formatie van Sterksel, waar bovenin lokaal kleiige lenzen aanwezig zijn op wisselende diepten.
- tot een diepte van circa NAP – 75 m de Formatie van Waalre met kleilagen afgewisseld met een zeer fijnzandige tussenlaag. De klei is aangetroffen in de 4 diepe boringen die op onderlinge afstanden van 100 tot 300 m zijn gemaakt.

De flowmetingen die in de putten zijn uitgevoerd, geven aan dat de zandlagen van de Formaties van Kreftenheije en Urk meer doorlatend zijn dan de zandlagen van de Formatie van Sterksel .

11.2 Resultaat van de pompproeven

Uit de pompproef die in februari is uitgevoerd op een volkomen pompput met een debiet van 260 m³/u en de pompproef in maart 2018 op een onvolkomen pompput met een debiet van 130 m³/u, konden door middel van kalibratie van een berekeningsmodel met het rekenprogramma [MLU] uit de gemeten verlagingen van grondwaterstanden de geohydrologische parameterwaarden worden afgeleid. Uit de uitwerking van de verschillende pompproeven blijkt enige variatie in de parameterwaarden. De meest waarschijnlijke combinatie van waarden voor de geohydrologische parameters is in de onderstaande tabel vermeld.

Door uitvoering van proeven op onvolkomen pompput PP2 kon onderscheid worden gemaakt in het bovenste deel van WVP1 (zandlagen van Formaties van Echteld, Kreftenheije en Urk) en het onderste deel van WVP1 (zandlagen van Formatie van Sterksel).

Het eerste watervoerend pakket bestaat uit enkele zandlagen voor verschillende geologische formaties. Het doorlaatvermogen is groot ($kD1 = 2400 \pm 300 \text{ m}^2/\text{d}$). De aangeboorde grindlagen verklaren de gevonden hoge waarde van het doorlaatvermogen van het eerste watervoerende pakket. De doorlatendheden van de afzonderlijke zandlagen zijn uit de uitwerkingen met MLU afgeleid (zie tabel 1.2). Minimale of maximale waarden zijn extremen per zandlaag. Grofzandige en grindige lagen komen in alle Formaties voor en zijn in de boringen op verschillende diepten gevonden.

De proeven waren er niet op gericht om de waarden voor de eigenschappen van de tweede watervoerende pakket (Formatie van Peize Waalre) te bepalen maar de weergegeven waarden zijn aangehouden volgens informatie uit regionale modellen.

Bij de interpretatie van de pompproef is de weerstand van de toplaag een sluitpost in de analyse. De relatief lage weerstand van 50 à 100 dagen in het gebied rond de pompproef kan worden verklaard door de voeding vanuit freatische berging in de meer zandige zones, vooral in oostelijke richting, die zich in de gehanteerde schematisatie gedraagt al als een voeding bovenin een licht weerstandbiedende laag boven het watervoerend pakket.

Tabel 11.1 Samenvatting van de geohydrologische parameterwaarden die uit de proeven zijn afgeleid voor de schematisatie van de laagopbouw ter plekke van locatie Tussen de Rails nabij de A27 te Utrecht. De aangegeven weerstand van de Waalre klei (gele vakken) is onzeker omdat de gemeten verlagingen in het tweede watervoerende pakket tijdens de pompproef klein waren. De eigenschappen van de Peize/Waalre Formatie (oranje vakken) volgen niet uit de proeven maar komen uit regionale modellen

Geohydrologische interpretatie pompproeven A27		Parameterwaarden na kalibratie voor diverse pomp- en stopproeven		
Laagschema	MLU	verwacht	min	max
Waterremmende toplaag, Holocene kleiige toplaag	C1 [d]	100	40	270
Eerste watervoerende pakket, Formaties van Echteld, Kreftenheije, Urk, Sterksel	kD1 [m ² /d]	2400	2300	2700
	S1 [-]	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Scheidende laag Waalre klei	C2 [d]	2000	1000	5000
Tweede watervoerende pakket, Formaties van Peize Waalre	kD2 [m ² /d]	4000	3500	4500
	S2 [-]	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Tabel 11.2 Samenvatting van de afgeleide minimale en maximale doorlatendheidswaarden voor onderscheiden zandlagen in het eerste watervoerende pakket voor locatie Tussen de Rails nabij de A27 te Utrecht.

Geohydrologische interpretatie pompproeven A27		Parameterwaarden na kalibratie voor diverse pomp- en stopproeven		
zandlaag	parameter	Laagdikte [m]	k_{\min} [m/d]	k_{\max} [m/d]
Doorlatendheid van de watervoerende zandlagen [m/d]				
Echteld	k1-1	7,5 à 10	20	120
Kreftenheije/Urk	k1-2	22,5	20	70
Sterksel	k1-3	25	20	40

In het watervoerende pakket komen in de Formaties tussenkleilagen voor die een lokale verbreiding kennen. Wanneer deze kleilagen worden gemodelleerd als lagen met een hydraulische weerstand in MLU blijken de waarden daarvan klein te zijn: 0,1 dagen voor kleilagen in de Kreftenheije/Urk Formatie en 0,5 tot 2 dagen voor kleilagen in de Sterksel Formatie.

De bepaalde waarden voor de bergingscoëfficiënten van de waterremmende lagen zijn niet weergegeven in de tabel. Verwezen wordt naar de tekst in het rapport. De waarden zijn zeer klein (orde $1 \cdot 10^{-6}$).

De weerstand van de Waalre klei werd in het vooronderzoek op basis van boorbeschrijvingen geschat op 650 tot 10.000 dagen. In het gebied rond de pompproef heeft de Waalre_formatie een weerstand in de orde van 2000 dagen of hoger. Het is zeer waarschijnlijk dat de kleilagen in de formatie een hogere weerstand in de orde van 5000 dagen hebben. Er is niet uit sluiten dat door geulvorming lokale onderbrekingen met een lagere weerstand in de laag aanwezig zijn die het regionale gemiddelde lager doen zijn.

11.3 Resultaat van de stopproeven

Aangezien ter plekke van het proefterrein sprake is van een kleiige toplaag die in alle boringen is aangetroffen, wordt de geohydrologische situatie gekenmerkt als semi-spanningswater. Uit de proeven volgt dat de bergingscoëfficiënt van het eerste watervoerende pakket klein is, $S_1 = 6 \cdot 10^{-4}$ tot $3 \cdot 10^{-3}$. Uit de proeven met verschillende onttrekkingsduur volgt dat de reactiesnelheid bij het stoppen of uitvallen van een bemaling groot is. De grondwaterstand keert na verlaging in de pompput tot circa 4 m bij uitschakelen van de pomp binnen een minuut terug. De terugkeer is zo snel dat in de put en de peilbuizen een waterslag-effect optreedt. Na een week onttrekken en daarna uitschakelen van pompput PP2 was de verlaging in de omgeving binnen enkele uren met 90% verminderd.

11.4 Resultaat van de retourproeven

11.4.1 Putverstopingsrisico

Het risico op verstopping door ijzerhydroxideneerslag is groot wanneer het voorkomende anoxisch grondwater in het watervoerend pakket waarin ijzer in hoge concentratie in oplossing is, met zuurstofrijk water wordt gemengd. In de uitvoering van de retourproeven kon dit risico goed worden beheerst door een volledig afgesloten retoursysteem toe te passen. Het risico kan nog wel aan de orde zijn als ondiep zuurstofrijk freatisch grondwater wordt aangetrokken (op plekken waar de kleiige toplaag ontbreekt) of als de grondwaterstand langdurig beneden de kleiige toplaag wordt verlaagd.

Tijdens de retourproeven met de traditionele retourput trad gasverstopping op. Deze was het gevolg van ontgassing door turbulentie in de leiding en lage leidingdruk. Turbulentie ontstond door een te grote pompcapaciteit en verkleining van de opvoerhoogte via afsluiters. De kans op verstopping door ontgassing van het grondwater is groot als de leidingdruk beneden een absolute gasdruk van 1,3 atm wordt verlaagd. Als gevolg van gasvorming kan ook kalkneerslag optreden. Te lage leidingdruk trad op door toepassing van leidingbruggen. Inzet van een frequentieregelaar bij de pompput en een ontgassingsvat bij de retourput leverde onvoldoende beheersing om verstopping van retourputten te beperken.

11.4.2 Traditionele retourput

Uit de retourproeven op locatie is geconcludeerd dat de capaciteit van een traditionele, volkomen retourput (geplaatst over de volledige dikte van het eerste watervoerende pakket) met een boorgatdiameter van 0,6 m beperkt is tot circa $50 \text{ m}^3/\text{u}$ bij een stijghoogtetoeename van circa 0,5 m in de omstorting rond de put, bij toepassing van een retoursysteem met lage druk waarbij ontgassing in de retourleiding optreedt. Bij een voortdurend optredende ontgassing moet een dergelijk putsysteem frequent worden schoongepompt. Verstopping als

gevolg van hoge ijzer- en kalkgehalten trad bij het toegepaste gesloten retour(leiding)systeem niet op. Voor de retourproeven is gebruik gemaakt van een gesloten leidingsysteem en een later extra geplaatste ontgassingsinstallatie. Aangezien de kleiige deklaag (Holocene kleiige toplaag) ter plekke 5 m dik is en de grondwaterstanden in het gebied relatief hoog zijn ten opzichte van maaiveld is tijdens de retourproeven besloten om de grondwaterstijghoogte rond de retourput niet meer dan 1,5 m op te zetten om het risico van vernatting en langloopsheid van de retourput te vermijden. Op basis van de bodemopbouw was verwacht dat er 3 keer zoveel debiet in een traditionele retourput teruggebracht zou moeten kunnen worden. Rekening houdend met een extra veiligheid op vernatting (stijghoogtetoeename tot maximaal 0,5 m onder maaiveld) zou op de locatie van het retourveld maximaal 2 keer zoveel bemalingswater retour in de ondergrond moeten kunnen worden gebracht (100 m³/uur).

11.4.3 DSI-retoursysteem

Een debiet van 10 m³/u per retourfilter in een DSI-retourstreng was tijdens de uitgevoerde proeven goed haalbaar maar injectie van 30 m³/u per punt is ook gerealiseerd. Echter dat hoge debiet kon niet lang genoeg worden doorgezet om verstoppingsproblemen te bestuderen. De voorkomende gasverstopping was voor een DSI-systeem wellicht minder problematisch omdat met hogere drukken wordt gewerkt. Wel moet worden opgemerkt dat daardoor bij enkele retourfilters opbarsten optrad zodat 2 van de 8 filters afgeschakeld moesten worden. De exacte werking van DSI is bij de UU nog in onderzoek zodat conclusies over toepasbaarheid en gedrag pas over enige tijd kunnen worden getrokken.

11.5 Aanbevelingen

Uit de pomp- en retourproeven is lering getrokken over te stellen voorwaarden zodat een retoursysteem op basis van traditionele retourputten in de gegeven situatie met de grondwaterkwaliteit ter plekke van de A27 Ring Utrecht gedurende lange tijd kan functioneren, zijn:

- a) En gedegen ontwerp van leiding- en putsystemen toe te passen (zie de aanbevelingen d t/m l hierna).
- b) Menging van diep en ondiep grondwater en toetreding van zuurstof voorkomen om verstopping van retourputten door ijzerneerslag te vermijden.
- c) Een goede beheersing van drukverdeling (>1,3 bar) na te streven om ontgassing te vermijden.

Aanbevelingen voor ontwerp en uitvoering van leiding- en putsystemen voor de situatie bij de A27 Ring Utrecht zijn:

- d) Gesloten leidingsysteem tussen bemaling en retourveld gebruiken.
- e) Onderwaterpompen met een optimale verhouding tussen opvoerhoogte en debiet te nemen om de leidingdruk te regelen.
- f) Voor debiet- en drukregeling bij voorkeur gebruik maken van frequentieregelaars in plaats van mechanische regeling met afsluiters.
- g) Leidingtrajecten toe te passen met geringe hoogteverschillen (geen pijpenbruggen) om drukval te voorkomen, of de leidingdruk daarop afstemmen.
- h) De druk in de retourleidingen boven een minimaal niveau (>1,3 bar) te houden om ontgassing te vermijden.
- i) Goede lektheid van transportleidingen van grondwater te garanderen.
- j) Een ontgassingsinstallatie van de juiste dimensies en uitvoering te gebruiken.
- k) De invoerbuis in de retourput zodanig uit te voeren, bijvoorbeeld door een regelklep onderaan de invoerbuis toe te passen en door de invoerbuis diep genoeg in de retourput te brengen, zodat dit bijdraagt aan de beheersing van de waterdruk.

- l) De waterdruk aan begin en eind van lange leidingsystemen en in retourputten met automatische elektronische drukopnemers te monitoren.

Op basis van de ervaring lijkt de inzet van DSI-retoursystemen een goed alternatief voor traditionele retourputten omdat beheersing van leidingdruk en gasverstopping daarmee beter te doen is en kosten en flexibiliteit van de inrichting aantrekkelijker zijn. Naar ontwerp en levensduur van dergelijke systemen moet nader onderzoek worden verricht. Het is aan te raden om landelijke ervaringen te verzamelen.

11.6 Beantwoording van gestelde onderzoeksvragen

Bij de opzet van de geohydrologische proeven zijn 5 onderstaanden onderzoeksvragen gesteld, waar nu op basis van de uitgevoerde proeven onderstaande conclusies voor geformuleerd zijn.

1 *Risico van uitval van bemaling*

Bij uitvoering van een kortdurende bemaling is het grondwatersysteem als van semigespannen grondwater. Aangezien de bergingscoëfficiënt van het eerste watervoerende pakket klein is met naar verwachting $S_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ met een marge volgens een factor van 0,5 tot 2, leidt uitschakelen van de bemaling tot een terugkeer van de grondwaterstand tot beginniveau binnen een minuut tijd. Bij langere duur bemalen tot grotere diepte zal de grondwaterstand sterker verlaagd worden en kan een freatisch systeem ontstaan. Deze freatische situatie kon met de proeven niet worden onderzocht vanwege vergunning en omgevingseffecten. Zeker is dat de terugkeer van de grondwaterstand dan trager verloopt maar niet bekend is in welke mate.

2 *Geohydrologisch model voor effectbepaling en gedrag van het grondwatersysteem*

Met de pompproeven zijn de ter plekke geldende waarden voor de geohydrologische parameters afgeleid. Daaruit blijkt dat het doorlaatvermogen van het eerste watervoerende pakket zeer groot is met $kD_1 = 2400 \pm 300 \text{ m}^2/\text{d}$. De waarden liggen aan de bovengrens van de marge die in de voorstudie in 2016 is aangehouden. Het grote doorlaatvermogen leidt ertoe dat het waterbezwaar van bemalingen groot zal zijn en dat verlagingseffecten van bemalingen zonder tegenmaatregelen tot grote afstand reiken.

3 *Haalbaarheid van de bemalingsoplossing*

Vanwege het grote doorlaatvermogen van de eerste watervoerende laag is het waterbezwaar van een bemaling zonder afschermdende maatregelen groot. Indien de pompputten op grote afstand van het werk moeten worden geplaatst, neemt het waterbezwaar bij toepassing van een bemaling sterk toe. Door inzet van retourbemaling zal het waterbezwaar door het rondpompeffect verder toenemen. De grootte van een bemaling zal vanwege de vastgestelde condities van een niet eerder in dit gebied gekende omvang zijn. Gedurende een dergelijk werk zal continu toezicht op de bemaling moeten zijn omdat de risico's van niet functioneren erg groot zijn.

Gezien het risico van uitval zullen bijzondere voorzieningen nodig zijn om de bemaling gaande te houden (zoals dubbele uitvoering van energievoorziening en leidingen, noodafvoer en dergelijke).

4 *Praktische haalbaarheid van retourbemaling*

Aangezien de kleiige deklaag aan de westkant van de Verdiepte Ligging in de A27 een variërende dikte tot maximaal 5 m heeft en de grondwaterstanden in het gebied relatief hoog zijn ten opzichte van maaiveld, en aan de oostkant van de Verdiepte Ligging in de A27 vrijwel ontbreekt, kan de grondwaterdruk rond een retourput niet al te hoog worden opgezet zonder risico van vernatting, langloopsheid of opbarsten rond de retourput.

Uitgaande van een goede beheersing van verstoppingsprocessen kan per klassieke retourput waarschijnlijk niet meer dan $100 \text{ m}^3/\text{u}$ worden teruggebracht in de ondergrond. Klassieke retoursystemen moeten zodanig worden ingericht om verstopping door ijzerneerslag en ontgassing, waardoor de druk in de omstorting rond het filter hoger kan oplopen, te voorkomen. Dit is door een goed ontwerp van het retoursysteem beheersbaar.

Inzet van DSI-retour-systemen lijkt wat gunstiger, met lagere kosten en grotere flexibiliteit maar de werking op lange duur is nog niet voldoende zeker. Aangezien de onttrekkingsdebieten van de bemaling zonder afscherpende maatregelen bij het voorkomende grote doorlaatvermogen van de watervoerende laag omvangrijk zijn, zal het aantal benodigde retourputten bij een voorziene integrale retourbemaling groot zijn.

Het onderhoud van een retoursysteem zal zeer veel inspanning vergen. Daarmee is de praktische haalbaarheid van retourbemaling bij bemaling zonder aanvullende debietbeperkende maatregelen niet gunstig.

5: *Hydraulische weerstand van de Waalre klei*

Er zijn in de 4 geplaatste diepe waarnemingspunten bij lange duur van grondwateronttrekking met hoog debiet uit het eerste watervoerende pakket nagenoeg geen verlagingen onder de Waalre klei waargenomen. Dat wijst er op dat de hydraulische weerstand van de betreffende waterremmende laag in het onderzoeksgebied waarschijnlijk groot is. Nader onderzoek moet meer zekerheid geven over de continuïteit van deze laag.

12 Referenties

Deltares 2016A	- Deltares, Monitoringsplan grondwatereffecten verbreding A27 Utrecht, kenmerk 1230669-000-BGS-0013, november 2016
Deltares 2016B	- Deltares, Onderzoek Grondwaterstroming Verbreding A27 Utrecht Zuid, Fase 1 Vooronderzoek, kenmerk 1230669-000-BGS-0014, 2016
Deltares 2017A	- Deltares, Inrichting pompproef nabij A27 Ring Utrecht, kenmerk 11201709-004-BGS-0005, oktober 2017
Deltares 2017B	- Deltares, Zettingseffecten spoor door pompproef A27 Tussen de rails te Utrecht, kenmerk 11201709-004-BGS-0014, december 2017
Deltares 2018A	- Deltares, Draaiboek uitvoering pompproef A27, memo zonder kenmerk, februari 2018
Deltares 2018B	- Deltares, Memo boorgatmetingen, kenmerk 11202343-004-BGS-0003, mei 2018
Deltares 2018C	- Deltares, Onderzoek Waalre-klei, feitelijk rapport – geotechnisch laboratoriumonderzoek, kenmerk 11202343-006-BGS-0002, september 2018
Deltares 2018D	- Deltares, Waterkwaliteit grondwater A27 Ring Utrecht, kenmerk 11202343-007-BGS-0004, oktober 2018
HvT 2018A	- Henk van Tongeren Water en Techniek, Eindrapportage pakket A, Geohydrologisch onderzoek, meetdata pomp- en retourproeven, juli 2018
HvT 2018B	- Henk van Tongeren Water en Techniek, Eindrapportage pakket B, Geohydrologisch onderzoek, installatie monitoringsysteem, juli 2018
HvT 2018C	- Henk van Tongeren Water en Techniek, Eindrapportage pakket C, Geohydrologisch onderzoek, waterzuivering, juli 2018
IWACO 1975	- IWACO, Geohydrologisch onderzoek t.b.v. bouwputten en kunstwerken in het Mereveld tracé van Rijksweg 27, rapport 312 en 312-2 (gewijzigde versie), 1975
KWR 2018A	- KWR, Evaluatie putverstoppingsrisico retourbemaling A27 op basis van grondwaterkwaliteitgegevens, KWR 2018.021, maart 2018
KWR 2018B	- KWR, Verstoppingsrisico retourbemaling A27, kenmerk KWR2018_069, juli 2018
MLU	- MicroFEM & MLU Software development and Support, Dr. C.J. (Kick) Hemker, Elandsgracht 83, 1016 TR Amsterdam, The Netherlands, infomicrofem.com
Stouthamer 2015	- Esther Stouthamer, Kim Cohen, Wim Hoek, De vorming van het land,. Geologie en geomorfologie, ISBN 9789491269110, Geheel herziene 7e druk, 2015
TNO 2017	- TNO, Inventarisatie en interpretatie van het bestaande grondonderzoek t.b.v. de verbreding van de A27 tussen de knooppunten Lunetten en Rijnsweerd, kenmerk TNO 2017 R11576, november 2017
Van den Bos 2014	- Van den Bos, V. ea, . Roman impact on the landscape near castellum Fectio, The Netherlands. Vegetation History and Archaeobotany 23, p277-298, 2014.

A Gegevens van geplaatste boringen, putten en peilbuizen

Tabel A.1A Locaties en boordata van de boringen voor peilbuizen

Locatie	X coördinaat	Y coördinaat	maaiveldhoogte [cmNAP]	boormethode	boorgat- diameter [mm]
B01_01	138497,168	453593,055	141	zuigboring	219
B01_02	138497,175	453593,194	141	zuigboring	219
B02_01	138530,750	453571,415	252	zuigboring	219
B02_02	138530,905	453571,321	252	zuigboring	219
B03_01	138522,647	453563,391	247	zuigboring	219
B03_02	138522,708	453563,463	247	zuigboring	219
B03_03	138522,751	453563,457	247	zuigboring	219
B04_01	138766,353	453530,972	226	pulsboring	219/178
B04_02	138766,381	453530,915	226	pulsboring	219/178
B04_03	138766,381	453530,915	226	pulsboring	219/178
B05_01	138549,684	453461,558	157	zuigboring	178
B05_02	138549,757	453461,552	157	zuigboring	178
B06_01	138307,497	453420,570	171	zuigboring	178
B06_02	138307,428	453420,566	171	zuigboring	178
B07_01	138484,410	453349,390	184	pulsboring	219/178
B07_02	138484,530	453349,340	184	pulsboring	219/178
B07_03	138484,610	453349,370	184	pulsboring	219/178
B08_01	138359,800	453284,580	221	zuigboring	350
B08_02	138359,910	453284,518	221	zuigboring	350
B08_03	138359,739	453284,506	221	zuigboring	350
B09_01	138382,661	453276,505	277	zuigboring	350
B09_02	138382,677	453276,267	277	zuigboring	350
B10_01	138396,505	453271,871	267	pulsboring	219/178
B10_02	138396,432	453271,774	267	pulsboring	219/178
B10_03	138396,516	453271,658	267	pulsboring	219/178
B10_04	138396,607	453271,900	267	pulsboring	219/178
B11_01	138405,318	453268,992	278	zuigboring	219
B11_02	138405,289	453269,214	278	zuigboring	219
B12_01	138437,000	453258,310	166	zuigboring	219
B12_02	138437,000	453258,310	166	zuigboring	219
B12_03	138437,000	453258,310	166	zuigboring	219
B13_01	138343,219	453191,529	145	zuigboring	178
B13_02	138343,301	453191,591	145	zuigboring	178
B14_01	138251,355	453143,762	184	zuigboring	178
B14_02	138251,329	453143,824	184	zuigboring	178
B15_01	138178,110	452979,940	141	zuigboring	178
B15_02	138178,110	452979,940	141	zuigboring	178
B16_01	138305,670	453306,536	138	zuigboring	178
B16_02	138305,702	453306,397	138	zuigboring	178

B17_01	138450,090	453290,420	161	zuigboring	178
B17_02	138450,090	453290,420	161	zuigboring	178
B18_01	138450,068	453524,012	154	zuigboring	219
B18_02	138450,137	453523,890	154	zuigboring	219
B18_03	138451,649	453522,332	154	zuigboring	219
B19_01	138492,940	453545,000	205	pulsboring	219/178
B19_02	138493,080	453545,070	205	pulsboring	219/178
B20_01	138634,254	453608,884	198	zuigboring	219
B20_02	138634,384	453608,934	198	zuigboring	219
B21_01	138660,524	453270,230	302	zuigboring	219
B21_02	138660,454	453270,409	302	zuigboring	219
B21_03	138660,383	453270,315	302	zuigboring	219
B22_01	138541,340	453573,000	265	zuigboring	219
B22_02	138541,270	453572,920	265	zuigboring	219
B23	138366,341	453285,554	232	handboring	178
B24	138383,956	453282,490	242	handboring	178
B25	138399,935	453276,715	269	handboring	178
B26	138404,776	453275,070	256	handboring	178

Tabel A.1B Locaties en boordata van de boringen voor pomp- en retourputten

Locatie	X coördinaat	Y coördinaat	maaiveldhoogte [cmNAP]	boormethode	boorgat- diameter [mm]
PP1_01	138406,531	453265,871	279	zuigboring	600
PP1_02	138406,486	453265,988	279	zuigboring	600
PP2_01	138407,856	453271,629	276	zuigboring	600
RP3	138551,4	453574,5	264	zuigboring	600

Tabel A.2 Inbouwstaten van de peilbuizen, met aanduiding van plaatsing in grondlaag (geologie: HOL= Holocene zandlaag, CEC=Formatie van Echteld, KR= Formatie van Kreftenheije, UR = Formatie van Urk, STO= Formatie van Sterksel, bovenste deel, WA= Formatie van Waalre)

Locatie	Bovenkant peilbuis [cmNAP]	Onderkant filter [cmNAP]	Lengte filter [cm]	peilbuis-diameter [mm]	serienr modem	serienr diver	filter in geologische formatie
B01_01	200	-872	300	50	37859401	AG699	CEC
B01_02	194	-1859	300	50	37859402	AG519	KR
B02_01	323	-758	100	50	37859403	AG727	CEC
B02_02	313	-1752	300	50	37859404	AG631	KR
B03_01	314	-170	100	50	37859406	AG756	HOL
B03_02	305	-768	300	50	37859407	AG695	CEC
B03_03	302	-1784	300	50	37859408	AG542	KR
B04_01	295	-145	100	50	37859409	AG647	HOL
B04_02	290	-2060	300	50	37859410	BG383	KR
B04_03	282	-7758	100	50	37859411	AG499	WA
B05_01	151	-281	100	50	37859412	AG483	HOL
B05_02	149	-832	200	50	37859413	AG493	CEC
B06_01	250	-111	100	50	37859414	BG397	HOL
B06_02	246	-807	200	50	37859415	BG393	CEC
B07_01	255	-599	100	50	37859416	AG650	CEC
B07_02	251	-1849	300	50	37859417	AG677	KR
B07_03	248	-7512	100	50	37859418	AG724	WA
B08_01	295	-469	100	50	37859419	AG711	HOL
B08_02	289	-1746	300	50	37859420	AG486	KR
B08_03	280	-5397	200	50	37859421	AG696	STO
B09_01	352	-2133	300	50	37859422	BG392	KR
B09_02	340	-3269	300	50	37859423	AG522	UR
B10_01	336	-324	200	50	37859425	AG651	CEC
B10_02	333	-1742	300	50	37859426	BG389	KR
B10_03	330	-4970	100	50	37859427	AG726	STO
B10_04	328	-7723	100	50	37859428	AG514	WA
B11_01	355	-813	300	50	37859435	BG395	CEC
B11_02	351	-1715	300	50	37859436	AG632	KR
B12_01	230	-68	100	50	37859449	BG401	HOL
B12_02	224	-853	300	50	38020901	BG388	CEC
B12_03	219	-1858	300	50	38020902	BG386	KR
B13_01	218	-176	100	50	38020906	AG513	HOL
B13_02	211	-866	300	50	38020909	AG728	CEC
B14_01	172	-55	100	50	38020910	AG720	HOL
B14_02	169	-805	200	50	38020911	AG510	CEC
B15_01	202	-282	100	50	38020912	BG398	HOL
B15_02	198	-835	200	50	38020913	AG729	CEC

Locatie	Bovenkant peilbuis [cmNAP]	Onderkant filter [cmNAP]	Lengte filter [cm]	peilbuis- diameter [mm]	serienr modem	serienr diver	filter in geologische formatie
B16_01	203	-143	100	50	38020907	AG487	HOL
B16_02	200	-849	300	50	38020908	BG385	CEC
B17_01	229	-156	100	50	38020914	AG704	HOL
B17_02	220	-817	200	50	38020915	BG384	CEC
B18_01	229	-105	100	50	38020916	AG673	HOL
B18_02	216	-830	300	50	38020917	AG503	CEC
B18_03	228	-1818	300	50	38020918	AG655	KR
B19_01	287	-1791	300	50	38020919	BG400	KR
B19_02	285	-7820	100	50	38020920	BG390	WA
B20_01	269	-389	100	50	38020921	AG635	HOL
B20_02	260	-890	300	50	38020922	AG736	CEC
B21_01	384	105	100	50	38020923	AG497	HOL
B21_02	376	-693	300	50	38020924	AG636	CEC
B21_03	370	-1390	300	50	38020925	BG387	KR
B22_01	315	-746	300	50	37655719	BG908	CEC
B22_02	310	-1726	300	50	37655720	BG866	KR
B23	289	17	100	50	37655711	AG645	HOL
B24	304	62	100	50	37655712	AG531	HOL
B25	326	61	100	50	37655717	AG551	HOL
B26	324	56	100	50	37655718	AG633	HOL
PP1_01	354	-1754	300	50	38020903	BH152	KR
PP1_02	351	-4450	300	50	38020904	BA277	STO
PP2_01	328	-1850	100	50	38020905	BH146	KR
RP3	322	-2120	100	50	37655725	BH125	KR

Tabel A.3 Gegevens van de peilbuizen nabij de DSI-strengen

Locatie	Afstand DSI en schema meetdiepte [m-m]	X coördinaat	Y coördinaat	Bovenkant buis [cmNAP]	Maaiveld [cmNAP]	Onderkant filter [cmNAP]
DSI-streng 1 bij zuivering						
DSI-PB2	2-ondiep	138536.95	453596.12	295	166	-454
DSI-PB3	2-18	138537.09	453596.04	300	145	-1256
DSI-PB6	2-20	138536.54	453598.09	296	302	-1298
DSI-PB9	10-18	138529.09	453592.49	282	269	-1131
DSI-PB10	10-20	138528.08	453594.57	284	256	-1314
DSI-streng 2 bij retourveld						
DSI-PB4	2-ondiep	138361.40	453276.50	275	154	-777
DSI-PB7	2-18	138361.52	453276.49	272	232	-968
DSI-PB1	2-20	138361.46	453276.43	265	157	-1433
DSI-PB5	10-18	138368.85	453273.94	301	198	-1133
DSI-PB8	10-20	138369.00	453273.94	296	242	-1308

Tabel A.4 Plaatsingsgegevens van de meetpunten van oppervlaktewater

Locatie	X coördinaat	Y coördinaat	plaatsing	bovenkant buis [cmNAP]	serienummer modem	serienummer diver
Wp1	138320,100	453189,160	open buis in sloot	144	37655726	AG501
Wp2	138426,150	453251,790	open buis in sloot	206	37655727	AG558

Tabel 12.5 Locaties en boordata van de DSI-retourfilters

Locatie	X coördinaat	Y coördinaat	maaiveldhoogte [cmNAP]	boormethode	boorgat-diameter [mm]
DSI-streng 1 retourveld					
DSIveldP1	138539	453599	232	Spoelboring	180
DSIveldP2	138542	453593	240	Spoelboring	180
DSIveldP3	138545	453588	234	Spoelboring	180
DSIveldP4	138548	453582	239	Spoelboring	180
DSIveldP5	138553	453570	266	Spoelboring	180
DSIveldP6	138556	453564	265	Spoelboring	180
DSIveldP7	138558	453558	250	Spoelboring	180
DSIveldP8	138561	453552	229	Spoelboring	180

DSI-streng 2 bij zuivering					
DSIzuivP1	138355	453271	228	Spoelboring	180
DSIzuivP2	138357	453277	203	Spoelboring	180
DSIzuivP3	138361	453290	213	Spoelboring	180
DSIzuivP4	138363	453296	200	Spoelboring	180

Tabel A.6 Inbouwstaten van de DSI-retourfilters

Locatie	bovenkant buis [cmNAP]	onderkant filter [cmNAP]	filter- lengte [cm]	filter- diameter [mm]
DSI-streng 1 retourveld				
DSIveldP1	302	-1478	200	110
DSIveldP2	300	-1273	200	110
DSIveldP3	294	-749	200	110
DSIveldP4	298	-1672	200	110
DSIveldP5	325	-1657	200	110
DSIveldP6	317	-1565	200	110
DSIveldP7	306	-1332	200	110
DSIveldP8	291	-1332	200	110
DSI-streng 2 bij zuivering				
DSIzuivP1	273	-1412	200	110
DSIzuivP2	276	-1533	200	110
DSIzuivP3	271	-1484	200	110
DSIzuivP4	255	-1498	200	110

B Toegepast leidingmateriaal

Tabel 12.1 Samenstelling van de retourleiding

Leidingdeel of appendage	materiaal	lengte
- onderwaterpomp in PP1 en/of PP2 met stijgleiding	Staal	10 m
- bocht 90 gr op pompput	staal	
- bocht 45 gr	Staal	
- slang 160 mm	Rubber	6,6 m
- afsluiter (om het debiet te knijpen)	Staal	
- slang 250 mm	Rubber	7,2 m
- watermeter	Staal	
- leiding 250mm	PE	16,65 m
- harp aansluiting (zuivering en retour)	Staal	
- dubbel T-stuk met aansluiting voor RP3 en DSi	Staal	
- leiding 160 mm, afsluiter, drukmeter, tapkraan, watermeter	Staal	4 m
- slang 160mm	Rubber	3,6 m
- bocht 90 gr	Staal	
- leiding 160 mm	Staal	12 m
- Y-stuk	Staal	
- leiding 250 mm	PE	11,5 m
- bocht 90 gr	Staal	
- 1 ^e pijpenbrug	Staal	2,3 + 6 + 6 + 6 + 2 m
- leiding bestaande uit geflensde 6 m lange leidingdelen 250 mm, drijvend in de sloot en in de duiker onder het spoor door	PE	240 m
- 2 ^e pijpenbrug	Staal	3 + 8 + 6 + 8 + 2,5 m
- leiding 250 mm	PE	6,2 m
- 45 gr bocht	PE	
- leiding uit geflensde 6 m lange leidingdelen 250 mm	PE	12 m
- hek naar injectieveld		
- leiding uit geflensde 6 m lange leidingdelen 250 mm	PE	136 m
- Y-stuk 1 poot blind en 1 poot naar 200 mm met T-stuk aftakking naar DSi, afsluiter, aftapkraan, watermeter.	Staal	
- slang 160 mm	Rubber	6,6 m
- ontgassingsvat circa 3 m hoog en 1 m diameter met 3 aansluitingen en overloop (geplaatst op 30 april)	Staal	
- slang 160 mm	Rubber	6,6 m
- 135 gr bocht boven retourput met kraan/ontluchting	Staal	
- invoerbuis 110 mm in retourput	PE	8 m

Een nadere specificatie is weergegeven in rapport A van Henk van Tongeren BV.

C Fotografisch overzicht van de testlocaties



Figuur 12.1 Pompput 1 met afvoerleiding waarin watermeter en monsterpunten in de richting van waterzuivering en pijpenbrug. Tevens is de westelijke meetraai met peilbuizen in stalen kokers te zien.



Figuur 12.2 Pompput 2 met afvoerleiding en afsluiter



Figuur 12.3 afvoerleiding met manometer, monsternamepunt, afsluiter, watermeter en pijpenbrug over fietspad



Figuur 12.4 Verdeelstuk naar DSI-systeem 1 achter zuivering en leiding naar retourveld 2



Figuur 12.5 Verdeelstuk naar DSI-systeem 1 achter zuivering en leiding naar retourveld 2, watermeter 2, pijpenbrug



Figuur 12.6 Aanvoer en aanleg van de HDPE-pijpdelen voor de retourleiding langs fietspad en sloot



Figuur 12.7 Doorvoer van de retourleiding door de duiker onder de spoorlijn Utrecht - Arnhem



Figuur 12.8 Inrichting retourput RP3 bij aanvang



Figuur 12.9 Verdeelstukken RP3 en DSI-streng 2 met afsluiters, watermeter en monsternamepunten



Figuur 12.10 *Ontgassingsvat bij RP3, onderin afvoer naar retourput, midden invoer vanuit retourleiding, aansluiting boven spuileiding, kraan ten behoeve van ontluchting met klein fontein, hoogste opvoerleiding op het vat is de overdrukbeveiliging*



Figuur 12.11 Plaatsing DSI-streng 1 nabij zuivering



Figuur 12.12 DSI-streng 2 na aanleg



Figuur 12.13 DSI-streng 2 bij in gebruikname, inclusief drukopnemer op de putkop



Figuur 12.14 Bemonstering PP1 voor waterkwaliteitsanalyse door KWR



Figuur 12.15 MFI-meting PP1 door KWR. MFI = Membraan Filtratie Index



Figuur 12.16 Monstername voor analyse waterkwaliteit door KWR

D Logboek van de uitgevoerde proeven

E Pompproeven gevoeligheidsanalyse parameterbepaling

Om de gevoeligheidsanalyse in hoog tempo uit te kunnen voeren is aanvullend op het programma MLU in python een routine geprogrammeerd om de ijkingsresultaten afzonderlijk per aquifer of grondlaag te kunnen presenteren. Tevens is met de tekstverwerkingsprogrammatuur Latex een geautomatiseerde rapportgenerator opgezet om de bijlagen systematisch te kunnen weergeven.

F Rapport A Henk van Tongeren Water en Techniek BV: waterzuiveringsinstallatie

**G Rapport B Henk van Tongeren Water en Techniek BV:
boringen en peilbuizen,**

H Rapport C Henk van Tongeren Water en Techniek BV: waarnemingen