

**Verkenning verwachtingswaarde
en bovengrens bemalingsdebiet
A27 Verdiepte ligging Ring
Utrecht**



**Verkenning verwachtingswaarde en
bovengrens bemalingsdebiet A27
Verdiepte ligging Ring Utrecht**

Gijs Janssen
Liduin Bos - Burgering
Neeltje Goorden
Hans van Meerten

Titel

Verkenning verwachtingswaarde en bovengrens bemalingsdebiet A27 Verdiepte ligging Ring Utrecht

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.	11203795-003	11203795-003-BGS-0003	45

Trefwoorden

A27 verdiepte ligging, folieconstructie, gevoeligheidsanalyse, grondwatermodellering, bemalingsdebiet, referentie-ontwerp, retourbemaling, scenarioanalyse, schermwand, uitvoeringsmethode, calamiteitenwinning




Samenvatting

Rijkswaterstaat is voornemens om de A27/A12 Ring Utrecht aan te passen. De verdiepte ligging A27 is indertijd aangelegd binnen een folieconstructie. De uit te voeren werkzaamheden vereisen dat de grondwaterstand ter plaatse moet worden verlaagd om opbarsten van de folieconstructie te voorkomen. Het referentieontwerp bestaat eruit dat de werkzaamheden worden uitgevoerd binnen een te plaatsen schermwand.

Deltares heeft in opdracht van Rijkswaterstaat een grondwatermodel ontwikkeld om effecten van de werkzaamheden op grondwaterstanden in de omgeving te simuleren. In voorliggende rapportage is de modelmatige verkenning van de verwachtingswaarde en de bovengrens van het benodigde bemalingsdebiet beschreven.

Uit de studie volgt dat met de combinatie van grondonderzoek, laboratoriumonderzoek en grondwatermodellering het mogelijk is om te komen tot plausibele verwachtingswaarden en bovengrenzen van de benodigde bemalingsdebieten in de aanlegfase:

- Schermwand volgens specificatie: verwachtingswaarde = 115 m³/u, bovengrens = 455 m³/u.
- Schermwand (lage weerstand 250 d): verwachtingswaarde = 278 m³/u, bovengrens = 622 m³/u.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.2	mei 2020	Gijs Janssen		Bert Sman		Otto de Keizer	
		Liduin Bos – Burgering					
		Neeltje Goorden					
		Hans van Meerten					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	3
1.1 Aanleiding	3
1.2 Doelstelling	4
1.3 Onderzoeksvragen	4
1.4 Afbakening	5
1.5 Leeswijzer	5
2 Geologisch en geotechnisch onderzoek doorlatendheid geulstructuren	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Analyse van de doorlatendheid van WAK1	6
2.2.1 Bodemopbouw WAK1	6
2.2.2 Uitgevoerd grondonderzoek	7
2.2.3 Uitgevoerde doorlatendheidsproeven in het laboratorium	10
2.2.4 Toegepaste berekeningswijze doorlatendheid uit korrelverdeling	11
2.2.5 Selectie van doorlatendheidskenmerken	11
2.2.6 Zuidelijke geulopvulling WAK1 sub-eenheid 0 Sterksel	13
2.2.7 Zuidelijke geulopvulling WAK1 sub-eenheid 2 en 3	14
2.2.8 Noordelijke geulopvulling, doorlatendheid van klei sub-eenheid 1 WAK1	15
2.2.9 Noordelijke geulopvulling WAK1 sub-eenheid 0 Waalre	15
2.2.10 Noordelijke geulopvulling WAK1 afdekkende kleilaag	16
2.3 Geohydrologische schematisatie geulstructuren in WAK1	17
2.3.1 Geohydrologische schematisatie WAK1 Waalre geul	18
2.3.2 Geohydrologische schematisatie WAK1 Sterksel geul	19
3 Modelling calimiteitenwinning	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Algemeen	21
3.3 Aanvullende modelkalibratie	21
4 Modelling geulstructuren	24
4.1 Ondergrondschematisering	24
4.1.1 Algemeen	24
4.1.2 Verwerken geulstructuren in ondergrondschematisering	25
4.2 Toekenning weerstanden en doorlatendheden aan geulstructuren	26
5 Modelmatige kwantificering geulweerstand	28
5.1 Introductie	28
5.2 Selectie van weerstandscombinaties voor doorrekeningen	28
5.3 Opzet modelberekeningen	29
5.4 Resultaten	29
5.4.1 Berekenende verlagingsreeksen	29
5.4.2 Plausibiliteitstoets	31
6 Modelmatige verkenning bemalingsdebieten aanlegfase	34
6.1 Introductie	34
6.2 Opzet berekeningen	34
6.2.1 Algemeen	34

6.2.2	Implementatie bemaling	35
6.2.3	Implementatie schermwand	35
6.2.4	Implementatie retourbemaling	35
6.3	Resultaten	36
6.3.1	Bemaling zonder retourbemaling	36
6.3.2	Bemaling met retourbemaling	37
7	Conclusies	38
8	Referenties	39
	Bijlage(n)	
A	Geologisch profiel westzijde	41
B	Geologisch profiel oostzijde	42
C	Lithologisch profiel westzijde B35	43
D	Lithologisch profiel oostzijde	44
E	Lithologisch profiel oostzijde B32/B36	45

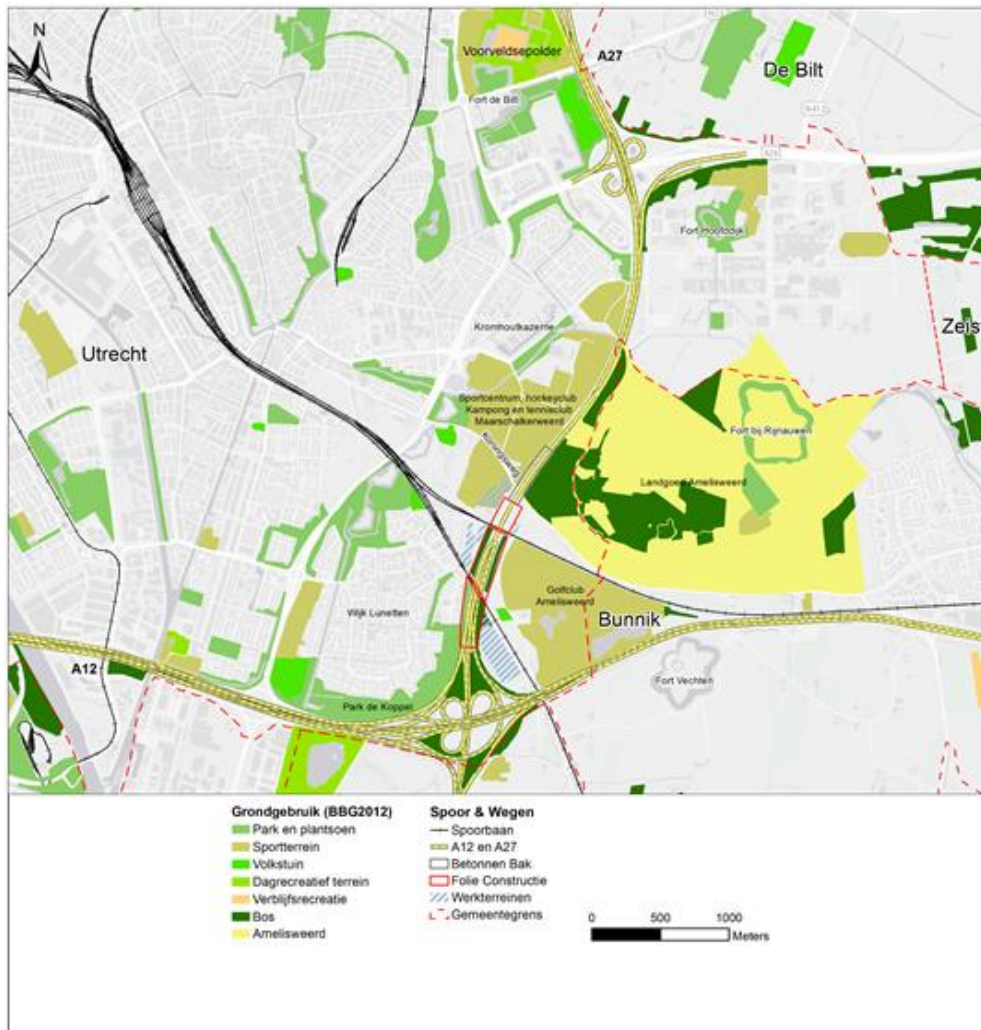
1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Rijkswaterstaat is voornemens om de A27/A12 in de Ring Utrecht aan te passen. De aanpassing moet de doorstroming en de verkeersveiligheid rondom Utrecht verbeteren en de kwaliteit van de leefomgeving gelijkwaardig houden en waar mogelijk verbeteren. Het deel van de A27, dat is gelegen tussen de wijk Lunetten en het landgoed Amelisweerd, is bij de aanleg (start aanleg A27 in 1982) gerealiseerd binnen een folieconstructie, zie Figuur 1.1. Deze constructie blijft bij het voornemen in stand. De uit te voeren werkzaamheden binnen de folieconstructie vereisen dat, naar huidige inzichten over mogelijke uitvoeringsmethoden, de grondwaterstand ter plaatse moet worden verlaagd om schade door opbarsten van de folieconstructie te voorkomen. Afhankelijk van de wijze van realisatie heeft dit tot gevolg dat de grondwaterstand in de omgeving in meer of mindere mate wordt verlaagd. Het referentieontwerp bestaat eruit dat de werkzaamheden aan de verdiepte ligging worden uitgevoerd binnen een te plaatsen schermwand, welke om de gehele verdiepte ligging wordt aangelegd.

De technische uitvoering en mogelijke omgevingsbeïnvloeding maken dit onderdeel van de aanpassing van de A27 (ter plaatse van de folieconstructie), een complex onderdeel van het gehele werk. Deltares heeft in opdracht van Rijkswaterstaat een niet-stationair grondwater-instrumentarium ontwikkeld, met als hoofddoel het modelmatig kunnen kwantificeren van verwachte effecten van de werkzaamheden op grondwaterstanden en stijghoogten in de omgeving. De bouw, kalibratie en validatie van het door Deltares ontwikkelde modelinstrumentarium is beschreven in Vermeulen et al., 2019. De plaatselijke bodemopbouw is gedetailleerd in het model gebracht op basis van informatie zoals die eind 2018 beschikbaar was. Naast het kwantificeren van genoemde omgevingseffecten biedt het model daarom ook de mogelijkheid om het verwachte benodigde bemalingsdebiet kwantitatief te verkennen, en daarmee uitspraken over de technische haalbaarheid van het ontwerp te ondersteunen.

Na de “*data freeze*” van eind 2018 ten behoeve van de bouw van bovengenoemd modelinstrumentarium, is meer informatie (boringen, sonderingen) verkregen over aanwezige geulstructuren in de slecht doorlatende laag op circa 65 meter diepte. Deze aanvullende informatie is verwerkt in een update van de geologische karakterisatie en kartering van de Waalre Klei en het 1^e watervoerend pakket rondom de projectlocatie (Schokker et al., 2019). De geulstructuren leiden lokaal tot een lagere weerstand van de slecht doorlatende afzettingen die voorkomen in de top van de Waalre Klei 1 Formatie (Wak1) en kunnen leiden tot verhoogde toestroming van grondwater tijdens bemalen en daarmee tot hogere benodigde bemalingsdebieten. Er is daarom een noodzaak tot het nader onderzoeken van de te verwachten invloed van deze geulstructuren op de technische haalbaarheid van het ontwerp. Dit nader onderzoek wordt in voorliggende rapportage beschreven.



Figuur 1.1 Ring Utrecht: Ligging folieconstructie A27

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het onderhavige onderzoek is het modelmatig verkennen van de verwachtingswaarde en de bovengrens van het bemalingsdebiet, dat benodigd zal zijn om de stijghoogte binnen de bak afdoende te verlagen.

1.3 Onderzoeksvragen

Voorliggend onderzoek beoogd antwoord te geven op de volgende vragen:

- Wat zijn binnen de geulstructuren in de WAK1 realistische bandbreedten voor de totale weerstand over de WAK1?
- Wat is de **verwachtingswaarde voor het bemalingsdebiet**? Deze wordt gedefinieerd als het benodigde bemalingsdebiet bij verwachtingswaarden van de weerstand van de WAK1 en referentiewaarden van de weerstanden van de schermwand.
- Wat is de **bovengrens van het bemalingsdebiet**? Deze wordt gedefinieerd als het benodigde bemalingsdebiet bij realistische ondergrenzen van de weerstand van de WAK1 en een overeengekomen uniforme ondergrens van de weerstand van de schermwand (van 250 dagen).

1.4 Afbakening

Deze studie beperkt zich tot de nadere kwantificering van de te verwachten benodigde bemalingsdebieten ten tijde van de aanlegfase, in de referentievariant waarin gewerkt wordt met een schermwand. Andere uitvoeringsvarianten worden niet onderzocht. Daarnaast gaat deze studie niet in op omgevingseffecten in de aanlegfase of daarna, in de vorm van bijvoorbeeld opstuwing van grondwater tegen de wand, grondwaterstandsverlaging stroomafwaarts van de wand als gevolg van obstructie van grondwaterstroming, en grondwaterstandseffecten als gevolg van bemaling en retourbemaling.

De studie gaat uit van 1 uitvoeringsvariant van bemalen, waarin de stijghoogte binnen de schermwand vlakdekkend naar eenzelfde waarde (6 m -NAP) wordt gebracht. Optimalisatie van deze methode om bijvoorbeeld het benodigde bemalingsdebiet te verlagen valt buiten de scope van deze studie.

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft hoe vanuit boorbeschrijvingen, korrelverdelingen en doorlatendheidsmetingen uit het laboratorium op bodemmonsters is gekomen tot bandbreedtes van de bodemweerstand binnen de geulstructuren in de WAK1.

Hoofdstuk 3 gaat in op de modellering van een calamiteitenonttrekking en een nadere (lokale) kalibratie van het modelinstrumentarium om tot een zo goed mogelijke reproductie te komen van gemeten verlagingen tijdens deze calamiteitenonttrekking. Hiervoor is het modelinstrumentarium zoals beschreven in Vermeulen et al. (2019) als uitgangspunt genomen. De geulstructuren zijn hierin nog niet opgenomen. Het doel van dit hoofdstuk is te komen tot een model dat als basis kan dienen voor het inschatten van de bodemweerstand in de geulstructuren.

In **Hoofdstuk 4** worden de geulstructuren toegelicht en wordt beschreven hoe de schematisering van het model daarop aangepast is.

In **Hoofdstuk 5** wordt de calamiteitenonttrekking met verschillende combinaties van bodemweerstand in de twee geulstructuren doorgerekend, en wordt geëvalueerd welke combinaties plausible resultaten geven. Dit resulteert in een combinatie van weerstanden die de verwachtingswaarden weergeven, en een combinatie die de ondergrens van de weerstanden aangeven.

In **Hoofdstuk 6** worden met bovengenoemde weerstandscombinaties de verwachtingswaarden en de bovengrenzen van het bemalingsdebiet bepaald, met twee weerstandsvarianten voor de schermwand, zowel met als zonder retourbemaling.

Hoofdstuk 7 bevat de conclusies en aanbevelingen.

2 Geologisch en geotechnisch onderzoek doorlatendheid geulstructuren

2.1 Inleiding

Om het voorkomen van de slecht doorlatende afzettingen op circa 65 meter diepte in de top van de Waalre Klei 1 Formatie (WAK1) te bestuderen is in het afgelopen jaar grondonderzoek uitgevoerd door middel van zeer diepe sonderingen en boringen. Via interpretatie van dit grondonderzoek is door Deltares en TNO de geologische structuur van de laag beschreven, die wordt aangeduid als een afzetting met klei, leem en fijn zand. De afzetting wordt in REGIS aangegeven met de afkorting WAK1. De informatie over WAK1 is samengevat in Van Kesteren et al. (2019a, b) en Schokker et al. (2019).

Doorlatendheidsmetingen op grondmonsters, die zijn uitgevoerd door Deltares en door Wiertsema & Partners, zijn gerapporteerd in Harkes (2019).

De doorlatendheden van de bodemlagen die in het iMOD A27 grondwatermodel zijn opgenomen zijn eerst gebaseerd op REGIS, daarna geijkt op peilbuisdata uit DINO en van andere beheerders van monitoringnetwerken en vervolgens op de lokaal uitgevoerde pompproef. De ontwikkeling van dit model is gerapporteerd in Vermeulen et al. (2019).

In het projectgebied komen in de WAK1 geulstructuren voor die lokaal afwijkende eigenschappen hebben van de gebiedsgemiddelde waarden die volgen uit de regionale modelijking. De geulstructuren zijn onderzocht met boringen en sonderingen en doorlatendheden zijn bepaald van monsters uit de boringen.

In Sectie 2.2 is de doorlatendheid per geulstructuur geïnterpreteerd die volgt uit beproevingen van grondmonsters in het geotechnisch laboratorium. In 2.3 zijn de geohydrologische schematisaties beschreven die voor de geulstructuren zijn afgeleid.

2.2 Analyse van de doorlatendheid van WAK1

2.2.1 Bodemopbouw WAK1

De opbouw WAK1 laag wordt door TNO (Van Kesteren 2019 a, b) gekarakteriseerd als:

- De laag is een rivierafzetting van vroeg-pleistocene ouderdom. De diepte van WAK1 kent een groot verloop. De bovenkant van WAK1 ligt aan de noordkant van de betonbak op circa NAP – 50 m, halverwege ter hoogte van boringen B32 en B36 (zie Figuur 5.1) op circa NAP – 60 m en aan de zuidkant van de folieconstructie op circa NAP – 55 m. De onderkant van de WAK1 ligt aan de noordkant van de betonbak op circa NAP – 60 à – 70 m, halverwege ter hoogte van boringen B32 en B36 op circa NAP – 80 m en aan de zuidkant van de folieconstructie op circa NAP – 70 m.
- De WAK1 is gelaagd, waarbij 3 sub-eenheden worden onderscheiden (zie ook de geologische profielen in Bijlage A en B):
 - Sub-eenheid 1 bestaat uit klei en leem met plaatselijk veen, 5 à 8 m dik.
 - Sub-eenheid 2 betreft een fijn zandige tussenlaag, plaatselijk leem, 5 à 10 m dik.
 - Sub-eenheid 3 is een laag bestaande uit klei en leem van één tot enkele meters dikte.
- Halverwege het wegtraject bij B32 en B36 is een zandige riviergeulopvulling van de Sterksel Formatie aangetroffen die in WAK1 snijdt tot een diepte van circa NAP – 70 m. Deze insnijding wordt aangeduid als “Waalre sub-eenheid 0 Sterksel”. Onder de geulinsnijding komen afzettingen voor van sub-eenheid 2 en sub-eenheid 3.
- Aan de noordkant ter hoogte van de overgang van folieconstructie naar betonbak zijn 1 of meer geologische breuken vastgesteld. Door het verzet bij de breuken is een discontinuïteit aanwezig in de diepteligging van de WAK1 van enkele meters.
- Aan de noordkant van de betonbak komt een zandige riviergeulopvulling voor, die door TNO wordt aangeduid als “Waalre sub-eenheid 0 Waalre”. In deze geulopvulling zijn meerdere op elkaar liggende geulsequenties aanwezig. Bovenin is de insnijding afgedekt met een dunne kleilaag, de geulopvulling bestaat uit zand met leemlenzen en onderin komen verspoelde kleibrokken voor. Deze in het noorden aanwezige geulopvulling snijdt volledig door de kleilagen heen.
- Verder noordelijk van de betonbak (op enkele kilometers naar het noorden toe) wigt de WAK1 uit.

2.2.2 Uitgevoerd grondonderzoek

In 2018 zijn 4 pulsboringen (B04, B07, B10 en B19) tot circa 80 m diepte gemaakt door Geotron voor bemalingsbedrijf Van Tongeren (zie Van Meerten, 2018) en in 2019 zijn 6 pulsboringen (B31 t/m B36) gemaakt door Wiertsema&Partners (zie Harkes, 2019). De pulsboringen zijn geplaatst nabij gemaakte sonderingen (uitgevoerd door Fugro en Inpijn-Blokpoel):

Tabel 2.1 *Langs het wegtraject uitgevoerde pulsboringen*

Pulsboring	Locatie
B04	Langs Koningsweg
B07	Tussen de Rails
B10	Tussen de rails
B19	Maarschalkerweerd bij Asiel
B31	Lunetten Zwarte Woud
B32	Mereveldseweg bij golfbaan
B33	Houtenseweg bij gemeentewerf
B34	NO-zijde in Amelisweerd
B35	NW-zijde bij sportterrein
B36	Mereveldseweg bij spoor Utrecht-Arnhem

TNO (Van Kesteren 2019 a, b) heeft aangegeven op welke diepte de verschillende eenheden voorkomen ter plekke van de boringen B31-B36. De laagdiepten bij de overige pulsboringen volgen uit de interpretatie van de boorbeschrijvingen van Firma Van Tongeren.

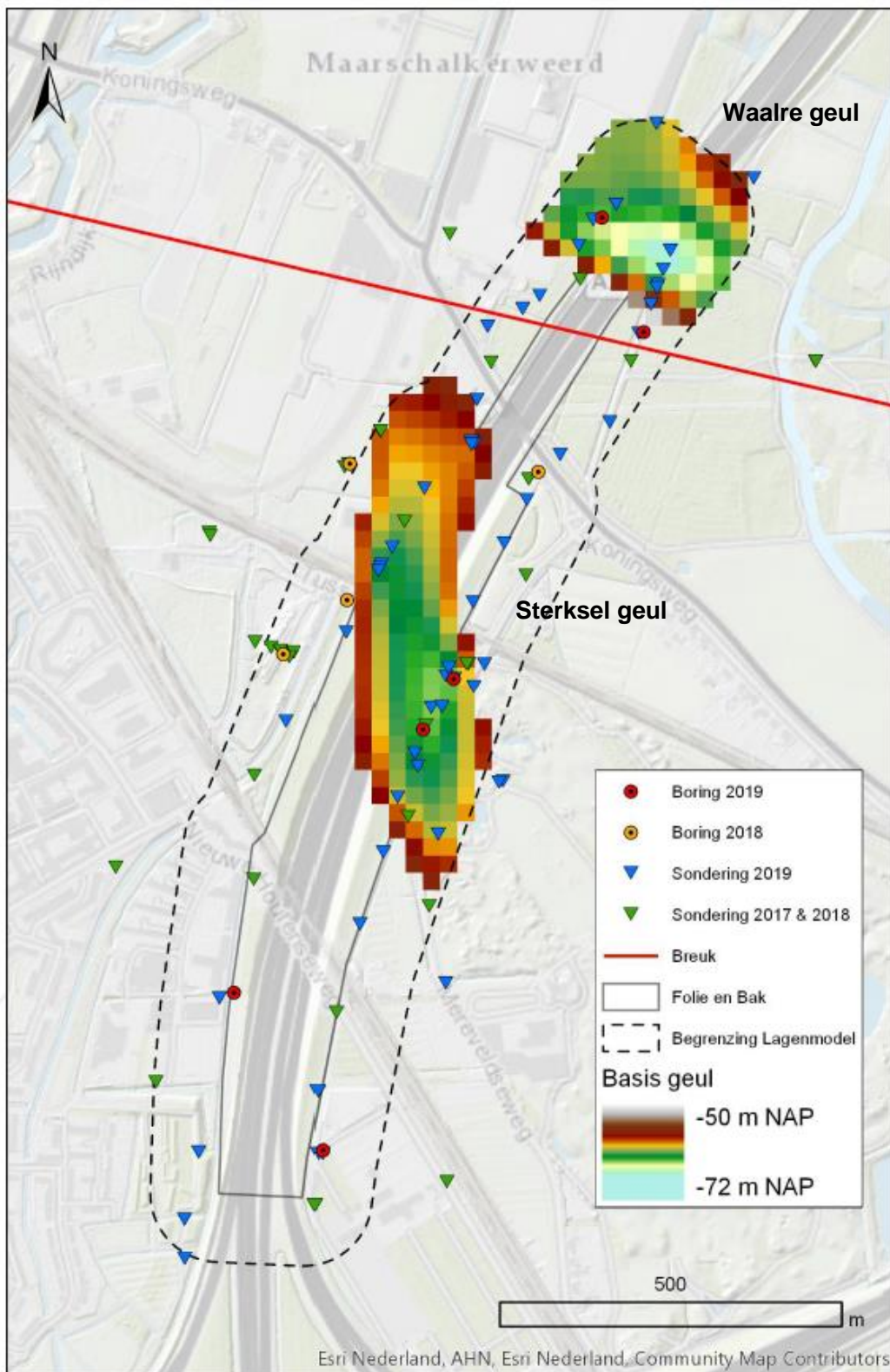
De pulsboringen van Van Tongeren uit 2018 zijn in het veld beschreven. Tijdens de pulsboringen zijn in de Waalre Formatie Ackermann steekbussen genomen (niet continu over de diepte).

In de pulsboringen van 2019, die door Wiertsema & Partners zijn uitgevoerd, zijn iedere meter (continu) steekbussen geslagen.

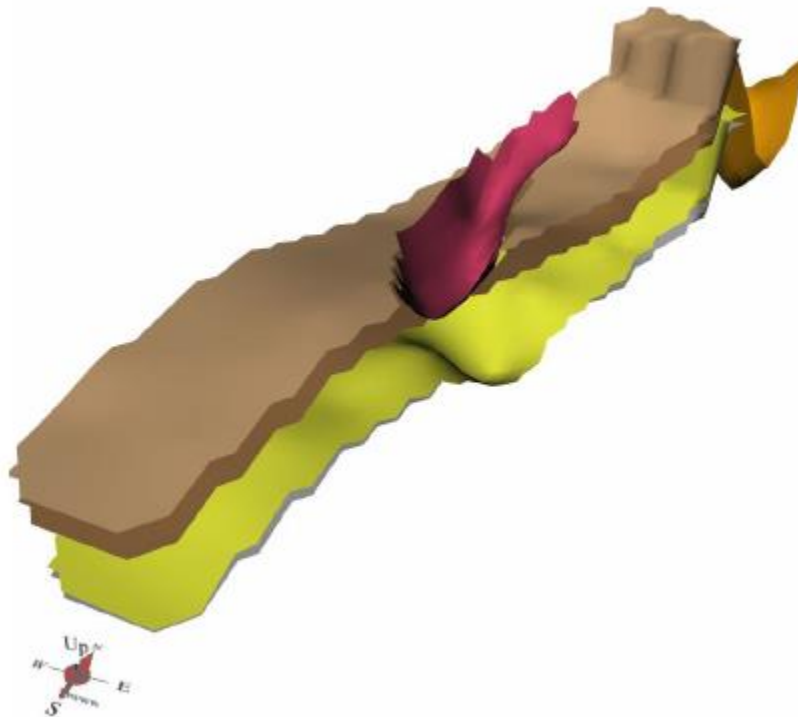
Tabel 2.2 Top en basis van de diverse eenheden in WAK1. #NA = subeenheid in de boring niet aangetroffen

Pulsboring	Sondering	Laagdiepte met top en basis [m-NAP]			
		Subeenheid 0 Zandige geulopvulling matig fijn tot matig grof	Subeenheid 1 Leem tot klei	Subeenheid 2 Zeer fijn zand, gelaagd met leem of siltlaagjes	Subeenheid 3 Klei
B04	DKMP46		58,5 – 65,7	65,7 – 66,1	66,1 – 72,5
B07	DKMP50d		60,4 – 66,2	66,2 – 67,2	67,2 – 73
B10	DKMP7		59,1 – 66,6	66,6 – 71,1	71,1 – 74,4
B19	DKMP25a	58 – 60,5	60,5 – 64,5	64,5 – 71,5	71,5 – 72,5
B31	DKMP53		53,5 – 64,0	64,0 – 67,0	67,0 – 72,0
B32	DKMP28	58 – 67 Kleibrokken aan basis	#NA	67,0 – 78,5	
B33	DKMP56a		54,4 – 62,5	62,5 – 68,0	68,0 – 70
B34	DKMP43		48,8 – 53,0	53,0 – 59,5	59,5 – 61,4
B35	DKMP36	51 – 68 Bovenin leem en kleilagen Kleibrokken aan basis	#NA	#NA	#NA
B36	DKMP32	58 – 68,7 Kleibrokken aan bovenzijde	#NA	68,7 – >80 Kleibrokken Basis niet gehaald	Eenheid 3 ligt hier wellicht dieper en is mogelijk nog niet aange- boord.

De ligging van de geulstructuren is getoond in de Figuren 2.1 en 2.2.



Figuur 2.1 Ligging en diepte van de Sterksel- en Waalre-geulstructuur (Van Kesteren, 2019b).



Figuur 2.2 Ligging en diepte van de basis van Sterksel- en Waalre-geulstructuur binnen de Waalre afzetting WAK1 (Van Kesteren, 2019b).

2.2.3 Uitgevoerde doorlatendheidsproeven in het laboratorium

Uit de steekbussen zijn in het laboratorium aan de hand van visuele beoordeling van de lithologie monsters verzameld waarop proeven zijn verricht in het geotechnisch laboratorium.

De volgende doorlatendheidsbepalingen zijn uitgevoerd:

- Zeving met korrelgrootteverdeling inclusief fijne delen, waaruit de doorlatendheid is afgeleid (NEN-EN-ISO 17892-4, 2016).
- Doorlatendheid van opgebouwde monsters met constant head test (zandig materiaal) (NEN-EN-ISO 17892-11, 2016).
- Doorlatendheid verticaal en horizontaal gestoken monsters met falling head test (kleilig en lemig materiaal) (NEN-EN-ISO 17892-11, 2016).

Alle bepaalde doorlatendheden zijn opgenomen in Harkes (2019).

De zandige monsters zijn opgebouwd in de proefstukken voor de doorlatendheidsproeven "constant head (CH)". Dat houdt in dat de structuur van de zandige monsters niet is bewaard, maar dat de monsters geroerd zijn beproefd. De proeven zijn bij verschillende pakking (dichtheid) verricht. Op grond van de berekende waarde van voorkomende korrelspanning en de conusweerstand, in nabijgelegen sonderingen, is volgens de methode van Lunne (Lunne ea, 1997) afgeleid dat de gemiddelde pakking en dichtheid van toepassing is op de in situ condities.

Ook bij de uitvoering van korrelverdelingen (KVD) worden de monsters geroerd en gaat de structuur (gelaagdheid) verloren. Zowel bij de uitvoering van proeven CH als KVD volgens de

norm is het gevolg van het verstoren van de structuur dat de afgeleide doorlatendheid waarschijnlijk een relatieve, gemiddelde waarde zal zijn.

De in 2019 uitgevoerde boringen zijn in het geologisch laboratorium in detail lithologisch beschreven (zie lithologische profielen in Bijlagen C t/m E). Op basis van de zandmediaan en het lutumgehalte is per boring het verloop van de doorlatendheid van de zandlagen over de diepte geschat.

2.2.4 Toegepaste berekeningswijze doorlatendheid uit korrelverdeling

Voor de berekeningen van de doorlatendheid uit korrelverdelingen is gebruik gemaakt van 2 empirische formules. Uit een vergelijking met de CH-metingen (tabel 2.4) volgt dat de doorlatendheden van matig tot grof zand met geringe bijmenging liggen in tussen de waarde afgeleid volgens Grontmij en de waarde volgens de correlatieformule van Beyer.

- 1) De formule van Grontmij (Cultuurtechnisch Vademecum, 2019) is opgesteld voor fijn zand en zavel met maximaal 12% lutum ($d < 2 \mu\text{m}$):

$$k = (M50/60)^2 \cdot 10^{-0,2L}$$

met:

- k = waterdoorlatendheid [m/d].
- M50 = mediaan van de zandfractie [μm].
- L = lutumgehalte in %.

- 2) De bepaling van doorlatendheid uit de korrelgrootteverdeling volgens de correlatieformule van Beyer (1964) luidt:

$$k = [A/(Cu+B)+C] \cdot d_{10}^2$$

met:

- k = waterdoorlatendheid [m/s].
- d_{10} = korrelgrootte [cm] waarbij 10 gewichts-% van het monster door een zeef met zekere grootte valt.
- Cu = gelijkmatigheidscoëfficiënt = d_{60}/d_{10} .

De constanten in de Formule van Beyer (die van de pakkingsdichtheid afhankelijk zijn), zijn in de volgende tabel vermeld (*deze waarden gelden voor de aangehouden eenheden die in de formule beschrijving zijn aangegeven*):

Tabel 2.3 Constanten in doorlatendheidsformule van Beyer

Pakking	Los	Matig	Vast
A	3,49	2,68	2,34
B	4,40	3,40	3,10
C	0,80	0,55	0,39

2.2.5 Selectie van doorlatendheidskenmerken

Er zijn lithologische profielen (bijlage C, D en E) gemaakt aan de hand van het geologisch profiel, de interpretatie van de sonderingen en de boorbeschrijvingen.

De doorlatendheidsbepalingen zijn per boring op de monstertdiepten in het lithologische profiel geplaatst, waarbij de monsters per geologische sub-eenheid bij elkaar gebracht zijn in deelverzamelingen.

De in het lab onderzochte doorlatendheidswaarden met bepalingen volgens verschillende proeven op zandige monsters zijn vergeleken. Voor alle onderliggende data die uit de proeven volgen, wordt verwezen naar Harkes (2019). Enkele voorbeelden met vergelijking tussen constant head tests en korrelgroottebepalingen zijn weergegeven in Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Vergelijking van doorlatendheden voor enkele zandige monsters; K_m bepaald met Constant head tests CH-gem voor monsters met gemiddeld opgebouwde pakking en volgens korrelverdeling KVD met berekening K_G volgens formule van Grontmij en K_B volgens formule van Beyer

Boring en monsternr	Beschrijving	Diepte [m-NAP]	Proef	Mz [mm]	Lutum [%]	K_m [m/d]	K_G [m/d]	K_B [m/d]
B34-61	Zs2 zf	57,26-57,31	CH-gem			0,43		
B34-62	Zs2	57,36-57,42	KVD	0,116	4,2		0,54	6,2
B34-63	Zs1 zf	62,13-62,18	CH-gem			1,47		
B34-64	Zs1	62,33-62,43	KVD	0,134	2,7		1,44	7,8
B35-126	Zs1	63,27-63,37	KVD	0,259	0,9		12,3	21,4
B35-127	Zs1 mg	63,37-63,42	CH-gem			17,3		
B36-443	Kz3	73,34-73,44	KVD	0,094	8,4		0,05	4,39
B36-444	Lz2	73,44-73,54	FH			6E-3		

Uit Tabel 2.4 is uit de overeenkomst tussen de doorlatendheid volgens constant head tests en doorlatendheidsbepaling uit de korrelverdeling afgeleid dat, bij de bepaling van doorlatendheden uit korrelverdelingen van fijn tot kleiig en lemig fijn zand, het beste uitgegaan kan worden van de correlatieformule volgens Grontmij. Hierbij wordt naast de mediaan van de zandfractie ook het lutumgehalte meegewogen.

Indien volgens de beschrijving sprake is van voornamelijk klei, veen of leem, kan de doorlatendheidsbepaling beter met falling head tests gebeuren. Dit is eerder gebleken bij de analyse van de monsters uit de serie boringen uit 2018 (zie Tabel 2.5).

De deelverzamelingen van de zandige monsters zijn vervolgens beschouwd als populaties met een lognormale verdeling van de doorlatendheidswaarden. Per sub-eenheid zijn de statistische eigenschappen afgeleid en in volgende paragrafen gerapporteerd.

De doorlatendheid van de zandige delen is daarmee bepaald. Echter, voor het verticaal grondwatertransport via de geulopvulling (sub-eenheid 0) en de zandige tussenlaag (sub-eenheid 2) zal met name het voorkomen van kleilenzen de hydraulische weerstand bepalen.

Tabel 2.5 Vergelijking van doorlatendheden voor enkele monsters; K_m bepaald met Falling head tests FH en volgens korrelgrootteschatting met berekening K_G volgens formule van Grontmij

Boring en monsternr	Beschrijving	Diepte [m-NAP]	Proef	Mz [mm]	Lutum [%]	K_m [m/d]	K_G [m/d]	K_B [m/d]
B04-17	Zs2 k	65,39-65,44	FH	0,041	5,3	2,4E-3	0,04	
B04-18	Vm	65,49-65,54	FH	0,029	6,8	1,8E-2	0,01	
B04-19	Vm	65,79-65,84	FH	0,028	6,3	7,9E-4	0,01	
B07-41	Lz3	67,86-67,91	FH	0,035	10,2	5,9E-7	3E-3	
B07-38	Lz3	73,46-73,51	FH	0,024	7,8	1,6E-4	5E-3	

2.2.6 Zuidelijke geulopvulling WAK1 sub-eenheid 0 Sterksel

De volgende resultaten zijn gevonden:

- In de Sterksel geulopvulling in WAK1 bij boringen B32 en 36 aan oostzijde laten de sonderingen zien dat er in deze opvulling naast voornamelijk zand ook kleilagen voorkomen. Deze lenzen scheiden waarschijnlijk verschillende generaties in de geulvorming.
- Op basis van de visuele classificatie bij de boorbeschrijving in het geologisch laboratorium zijn de zandmediaan en het lutumgehalte geschat. Aan de hand daarvan zijn volgens de bepaling met de Grontmij formule de waarden van de doorlatendheid in de geulopvulling in B32 en B36 afgeleid. De doorlatendheid varieert in B32 over een diepte van 59 tot 67 m-NAP tussen 2,5 en 18 m/d en in B36 over een diepte van 59,4 tot 70 m-NAP tussen 0,2 en 28 m/d. De range in de bepaalde doorlatendheden is groot.
- Er volgt een horizontaal doorlaatvermogen van 67 tot 111 m²/d in de geulopvulling WAK1 sub-eenheid 0 Sterksel.
- Uit enkele doorlatendheidsbepalingen van monsters uit B36 rond een diepte van 61,5 m-NAP waar schoon matig grof zand voorkomt, volgt uit vergelijking (Tabel 2.6) van horizontale (K_G) en verticale doorlatendheid (K_m) dat de mate van anisotropie groot is, in de orde van 20, Harkes (2019).

Tabel 2.6 Vergelijking van doorlatendheden voor enkele monsters; K_m bepaald met Falling head tests FH en volgens korrelgrootteschatting met berekening K_G volgens formule van Grontmij

Boring en monsternr	Beschrijving	Diepte [m-NAP]	Proef	Mz [mm]	Lutum [%]	K_m [m/d]	K_G [m/d]
B36-420	Zsg1	61,34-61,44	kvd	0,431	1,6		24,70
B36-418	Zs1	61,40-61,50	FH-vert			0,78	
B36-421	Zs1	61,54-61,64	kvd	0,293	1,4		12,52

- Ook op diepten van 66,4 en 66,8 en 67,3 m-NAP, waar matig grof zand met kleibrokken voorkomt, zijn falling head tests uitgevoerd (Tabel 2.7) van verticaal (K_m) en horizontaal gestoken monsters. Daaruit komen lage doorlatendheden voort (in de orde van grootte van $2 \cdot 10^{-2}$ m/d horizontaal (FH-hor) en $3 \cdot 10^{-3}$ à $5 \cdot 10^{-4}$ m/d verticaal (FH-vert)) waardoor voor die laag een anisotropiefactor van 5 tot 50 is afgeleid, Harkes (2019).

Tabel 2.7 Vergelijking van doorlatendheden voor enkele monsters zand met kleibrokken; K_m bepaald met Falling head tests FH voor horizontaal en verticaal gestoken monsters

Boring en monsternr	Beschrijving	Diepte [m-NAP]	Proef	K_m [m/d]	A [-]
B36-423	Zs1+kb	66,09-66,29	FH-hor	2,4E-2	48
B36-424	Zs1+kb	66,29-66,49	FH-vert	4,9E-4	
B36-425	Zs1+kb	66,49-66,74	FH-hor	2,3E-2	5
B36-426	Zs1+kb	66,74-66,94	FH-vert	4,3E-3	
B36-427	Zs1+kb	67,04-67,24	FH-vert	2,8E-2	9
B36-429	Zs1+kb	67,24-67,44	FH-hor	3,1E-3	

2.2.7 Zuidelijke geulopvulling WAK1 sub-eenheid 2 en 3

Volgens het geologisch profiel (zie Bijlagen A en B) komen onder de geulopvulling klei- en leemlagen voor die tot sub-eenheid 2 en sub-eenheid 3 worden gerekend. Het doorlatendheids-onderzoek wijst het volgende uit:

- De kleidikte onder de geulopvulling in sub-eenheden 2 en 3 varieert van 2,2 tot 6,2 m in de boringen en sonderingen.
- Het aantal bepalingen met falling head tests op klei- en leemmonsters uit sub-eenheid 2 en sub-eenheid 3 in B32 en B36 voorkomend tussen 67,5 en 81 m-NAP is 11 stuks.
- De verticale doorlatendheidswaarden (Tabel 2.8) liggen in een range tussen $4,4 \cdot 10^{-4}$ en $7,8 \cdot 10^{-6}$ m/d. Het gemiddelde, volgens een lognormale verdeling¹, is $4,1 \cdot 10^{-5}$ m/d. Dat is een lage waarde voor klei en leem.

Tabel 2.8 Vergelijking van doorlatendheden voor enkele monsters klei en leem; K_m bepaald met Falling head tests FH voor gestoken monsters

Boring en monsternr	Beschrijving	Diepte [m-NAP]	Proef	K_m [m/d]
B32-279	Ks2h2	67,43-67,49	FH-hor	$1,1 \cdot 10^{-5}$
B32-280	Ks2h2	67,55-67,62	FH-vert	$3,1 \cdot 10^{-5}$
B32-285	Zs4	69,63-69,69	FH-vert	$2,7 \cdot 10^{-4}$
B32-286	Ks4	72,49-72,57	FH-hor	$8,6 \cdot 10^{-5}$
B32-287	Ks4	72,58-72,64	FH-vert	$1,7 \cdot 10^{-5}$
B36-433	Lz1	69,34-69,39	FH-vert	$4,4 \cdot 10^{-4}$
B36-444	Ks1	71,39-71,49	FH-vert	$8,4 \cdot 10^{-6}$
B36-449	Ks3	75,44-75,54	FH-vert	$7,4 \cdot 10^{-5}$
B36-455	Ks3	77,44-77,54	FH-vert	$7,8 \cdot 10^{-6}$

¹ Voor de bepaling van statistische kenmerken van doorlatendheid van grondlagen uit proefverzamelingen van data wordt in het algemeen de lognormale verdeling gekozen. De doorlatendheid is niet kleiner dan nul en de lognormale verdeling past meestal het beste bij dataverzamelingen van deze parameter.

Boring en monsternr	Beschrijving	Diepte [m-NAP]	Proef	K_m [m/d]
B36-458	Kz1	78,69-78,79	FH-vert	$8,2 \cdot 10^{-5}$
B36-462	Ks3	80,74-80,79	FH-vert	$2,4 \cdot 10^{-5}$

- Onder de aanname dat de laag continue aanwezig is, en geen heterogeniteiten bevat (zandinsluitingen), kan de verticale weerstand van de laag onder de geulopvulling WAK1 onder sub-eenheid 0 Sterksel rekenkundig worden bepaald op minimaal 5.000 dagen en gemiddeld 400.000 dagen.

Als onderin de gehele zuidelijke geulopvulling klei en leem voorkomen zoals bij B32 en B36 zal de minimumwaarde van de hydraulische weerstand van 5.000 dagen voor WAK1 sub-eenheden 2 en 3 waarschijnlijk de waarde zijn die het gedrag van het geohydrologisch systeem in dit deelgebied rond B32 en B36 bepaalt. Deze waarde lijkt qua orde van grootte overeen te komen met de uitkomst van de vorig jaar uitgevoerde pompproef (range hydraulische weerstand voor WAK1 van 1.000 tot 5.000 dagen).

2.2.8 Noordelijke geulopvulling, doorlatendheid van klei sub-eenheid 1 WAK1

Met monsters uit boring B34 is de doorlatendheid van klei in sub-eenheid 1 bepaald:

- Met falling head tests zijn 3 kleimonsters uit B34 tussen 49 en 52 m-NAP beproefd (tabel 2.9).
- Voor een lognormale verdeling volgt een gemiddelde waarde van de verticale doorlatendheid van $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/d.

Tabel 2.9 Doorlatendheden van enkele monsters klei uit B34; K_m bepaald met Falling head tests FH voor verticaal gestoken monsters

Boring en monsternr	Beschrijving	Diepte [m-NAP]	Proef	K_m [m/d]
B34-43	Ks4	49,23-49,33	FH-hor	$3,5 \cdot 10^{-4}$
B34-50	Ks3	51,08-51,18	FH-vert	$1,6 \cdot 10^{-3}$
B34-54	Ks2h1	52,03-52,08	FH-vert	$7,9 \cdot 10^{-5}$

2.2.9 Noordelijke geulopvulling WAK1 sub-eenheid 0 Waalre

De geulopvulling sub-eenheid 0 Waalre komt voor ter plekke van de betonbak. Ter weerszijden van de betonbak zijn boringen B34 en B35 met omliggende sonderingen geplaatst. B34 aan de oostzijde van de betonbak is net zuidelijk van de geulopvulling gemaakt. B35 aan de westzijde van de betonbak is in de geulopvulling gemaakt. Uit de analyse van doorlatendheid volgt:

- Nabij B34 is DKMP59A gemaakt in de geulopvulling die aangeeft dat de geulopvulling voorkomt van 59 tot 71 m-NAP. Onder de geulopvulling sub-eenheid 0 in de WAK1 komt over een dikte van circa 1 m een laag klei voor, die wordt ingedeeld als sub-eenheid 3.
- De geulopvulling WAK1 sub-eenheid 0 Waalre komt in B35 voor over een dikte 18 m van 49,6 tot 67,6 m-NAP.
- De geulopvulling bestaat volgens beschrijving van B35 uit matig fijn tot zeer grof zand. Onderin de geulopvulling komen over een dikte van circa 0,5 m brokken klei voor.
- Volgens de Grontmij formule kan uit de lithologische beschrijving (met zandmediaan en lutumgehalte) een doorlatendheid met een range van 3,4 tot 36 m/d worden afgeleid.

De gemiddelde doorlatendheid in de geulopvulling sub-eenheid 0 Waalre is 13,5 m/d (lognormale verdeling).

- Het doorlaatvermogen in de geulopvulling is daaruit bepaald op 240 m²/d.
- Omdat de geulopvulling voor een belangrijk deel uit matig grof zand bestaat en de formule van Grontmij voor fijn kleiig zand is opgesteld, is nagegaan of deze berekeningswijze van doorlatendheid goed bij de lokale afzetting past:
 - Met 2 uitgevoerde constant head tests is de proefdoorlatendheid vergeleken met wat uit de korrelverdeling werd afgeleid met de formule van Grontmij en die van Beijer.

Tabel 2.10 Vergelijking van doorlatendheden voor enkele monsters; Km bepaald met constant head tests CH en volgens korrelgrootteschatting met berekening KG en KB volgens formule van Grontmij en Beyer

Boring en monsternr	Beschrijving	Diepte [m-NAP]	Proef	Mz [mm]	Lutum [%]	Km [m/d]	KG [m/d]	KB [m/d]
B35-122	Zs1	56,17-56,27	kvd	0,153	1,8		2,84	11,96
B35-123	Zs1 zf	56,27-56,32	ch-gem			4,41		
B35-126	Zs1	63,27-63,37	kvd	0,259	0,9		12,31	21,45
B35-127	Zs1 mg	63,37-63,42	ch-gem			17,28		

- Van 7 diepten zijn monsters beproefd ter bepaling van de doorlatendheid uit de korrelverdeling. Volgens de Grontmij formule op de korrelverdeling is de doorlatendheid 4,5 m/d en volgens de Beyer formule op de korrelverdeling 9,8 m/d. De doorlatendheid volgens lithologische beschrijving ligt tussen de waarde volgens de Grontmij formule en de Beyer formule in. Voor de 7 monsters is het rekenkundig gemiddelde van bepalingen volgens korrelgrootteschatting via de lithologische beschrijving 13,8 m/d.

Tabel 2.11 Vergelijking van doorlatendheden voor enkele zandige monsters volgens korrelverdeling KVD met berekening KG volgens formule van Grontmij en KB volgens formule van Beyer

Boring en monsternr	Beschrijving	Diepte [m-NAP]	Proef	KG-litho [m/d]	KG [m/d]	KB [m/d]
B35-108	Zs2	50,42-50,52	KVD	5,44	1,22	7,64
B35-109	Zs1	51,37-51,47	KVD	13,44	4,16	10,56
B35-118	Zs1	53,32-53,42	KVD	5,44	1,85	8,47
B35-119	Zs1	54,27-54,37	KVD	5,44	1,68	7,37
B35-122	Zs1	56,17-56,27	KVD	9,00	2,84	11,96
B35-124	Lz3	57,27-57,37	KVD	21,78	0,04	4,32
B35-125	Zs1	60,27-60,37	KVD	36,00	7,74	16,77

2.2.10 Noordelijke geulopvulling WAK1 afdekkende kleilaag

De geulopvulling doorsnijdt de WAK1 ter hoogte van de betonbak in de A27 ring Utrecht nabij boringen B34 en B35 volledig.

- De verticale weerstand van het zand in de geulopvulling is op basis van de hiervoor vermelde horizontale doorlatendheid klein, circa 1,5 dagen. Als uitgegaan wordt van een anisotropiefactor van 5 tot 20, zou de verticale weerstand van het zand in de opvulling 7,5 tot 30 dagen kunnen zijn.

- Er komen in de geulopvulling WAK1 sub-eenheid 0 Waalre kleilagen voor, vooral bovenin op een diepte van 52 tot 52,5 m-NAP (mogelijk onderdeel van de formatie van Sterksel).
- Er zijn 2 falling head tests op monsternormaal uit de kleilaag bovenin B35 uitgevoerd.

Tabel 2.12 Vergelijking van doorlatendheden voor enkele monsters klei uit B35;
Km bepaald met Falling head tests FH voor gestoken monsters

Boring en monsternr	Beschrijving	Diepte [m-NAP]	Proef	K _m [m/d]
B35-112	Lz1	52,02-52,07	FH-vert	6,7*10 ⁻⁵
B35-116	Ks1	53,07-53,12	FH-vert	6,1*10 ⁻⁵

- Met een kleidikte van 1,5 m is de weerstand van de kleilaag bovenin de geulopvulling in B35 gemiddeld circa 25.000 dagen.
- Omdat op andere locaties de afdekkende klei bovenin de geulopvulling in hoogteligging varieert, is het beter om rekening te houden met een geringere weerstand van de afdekkende laag aan de bovenkant van de geul.
- In DKMP35 noordelijk van B35 komt bovenin circa 2 m leem voor. Volgens de beperkte proefverzameling heeft leem in de WAK1 een doorlatendheid van gemiddeld 6*10⁻⁴ m/d met uitlopers naar 6,7*10⁻⁵ m/d (B35, sub-eenheid 0) en 5,8*10⁻² m/d (B31 leem met zandige insluitels). Een hydraulische weerstand van 3.250 dagen is aan te houden maar de range ligt op basis van de laboratoriumwaarden zelfs tussen 30 en 300.000 dagen. Het is de vraag of de maximale waarde op de schaal van het gebied zo hoog zal zijn. Met enige variatie in dikte en doorlaatvermogen zal een maximale waarde van 3.250 tot 30.000 dagen een reële keuze voor het maximum zijn.

2.3 Geohydrologische schematisatie geulstructuren in WAK1

Op basis van de beschouwing van de laagopbouw en de bepaalde doorlatendheden zijn ten behoeve van de geohydrologische modelberekeningen met het iMod A27 model schematisaties gemaakt voor de geulstructuren in de WAK1.

Er is onderscheid gemaakt tussen de "geulstructuur WAK1 sub-eenheid 0 Waalre" aan de noordzijde bij de betonbak en de geulstructuur "WAK1 sub-eenheid 0 Sterksel" halverwege de folieconstructie.

In de volgende paragrafen zijn per geulstructuur 3 mogelijke schematisaties aangegeven, met minimale, gemiddelde en maximale schatting van verticale hydraulische weerstand.

Met betrekking tot de modelberekeningen wordt aangeraden om combinaties van schematisaties met minimale en gemiddelde weerstanden toe te passen waarmee de verwachtingswaarde en de bovengrens van het bemalingsdebiet kan worden verkend als gevolg van de toestroming van grondwater die optreedt door de bodem van een schermwand.

2.3.1 Geohydrologische schematisatie WAK1 Waalre geul

Tabel 2.13 Schematisatie met **maximale** weerstand: WAK1 geul Waalre

Noord	WAK1 subeenheid 0 Waalre geul				Parameterisatie	
	d [m]	kh [m/d]	Aniso	kv [m/d]	c [d]	kD [m ² /d]
subeenh 0 Waalre topklei	1,5	2,5	5.417	4,62*10 ⁻⁴	3.250	4
subeenh 0 Waalre	9	3,40	6	5,67*10 ⁻¹	16	31
subeenh 3	9	3,40	6	5,67*10 ⁻¹	16	31
totaal					3.282	65

Tabel 2.14 Schematisatie met **gemiddelde** weerstand: WAK1 geul Waalre

Noord	WAK1 subeenheid 0 Waalre geul				Parameterisatie	
	d [m]	kh [m/d]	Aniso	kv [m/d]	c [d]	kD [m ² /d]
subeenh 0 Waalre topklei	1,5	10	2.500	4,00E-03	375	15
subeenh 0 Waalre	9	13,50	3	4,50	2	122
subeenh 3	9	13,50	3	4,50	2	122
Totaal					379	258

Tabel 2.15 Schematisatie met **minimale** weerstand: WAK1 geul Waalre

Noord	WAK1 subeenheid 0 Waalre geul				Parameterisatie	
	d [m]	kh [m/d]	aniso	kv [m/d]	c [d]	kD [m ² /d]
subeenh 0 Waalre topklei	1,5	18	1.000	1,80*10 ⁻²	83	27
subeenh 0 Waalre	9	36	1	3,60*10 ¹	0,25	324
subeenh 3	9	36	1	3,60*10 ¹	0,25	324
Totaal					84	675

2.3.2 Geohydrologische schematisatie WAK1 Sterksel geul

Tabel 2.16 Schematisatie met **maximale** weerstand: WAK1 geul Sterksel

Midden	WAK1 subeenheid 0 Sterksel geul				Parameterisatie	
	d [m]	kh [m/d]	Aniso	kv [m/d]	c [d]	kD [m ² /d]
subeenh 0 Sterksel	9	2,5	20	1,25*10 ⁻¹	72	23
subeenh 2	5,5	2*10 ⁻²	20	1*10 ⁻³	5.500	0,11
subeenh 3	5,5	2*10 ⁻²	20	1*10 ⁻³	5.500	0,11
Totaal					11.072	23,22

Tabel 2.17 Schematisatie met **gemiddelde** weerstand: WAK1 geul Sterksel

Midden	WAK1 subeenheid 0 Sterksel geul				Parameterisatie	
	d [m]	kh [m/d]	Aniso	kv [m/d]	c [d]	kD [m ² /d]
subeenh 0 Sterksel	9	10	15	6,67*10 ⁻¹	14	90
subeenh 2	5,5	0,20	15	1,33*10 ⁻²	413	1,1
subeenh 3	5,58	0,20	15	1,33*10 ⁻²	413	1,1
Totaal					839	92,2

Tabel 2.18 Schematisatie met **minimale** weerstand: WAK1 geul Sterksel

Midden	WAK1 subeenheid 0 Sterksel geul				Parameterisatie	
	d [m]	kh [m/d]	Aniso	kv [m/d]	c [d]	kD [m ² /d]
Eenheid 0 Sterksel	9	18	10	1,8	5	162
Eenheid 2	5,5	2	10	0,2	27,5	10
Eenheid 3	5,5	2	10	0,2	27,5	40
Totaal					60	212

3 Modelling calimiteitenwinning

3.1 Inleiding

Bij een analyse van de (in het kader van de advisering rondom de verbreding bijgehouden) database aan monitoringsgegevens, is geconstateerd dat in juni 2019 een zogenoemde calamiteitenonttrekking van Waternet in bedrijf is geweest in verband met verontreinigingen op het Lekkanaal. Normaliter onttrekt Waternet oppervlaktewater vanuit dit Lekkanaal waarna dit na zuivering als drinkwater wordt geleverd. In het geval van een dergelijke calamiteit heeft Waternet de mogelijkheid om grondwater te onttrekken uit het 2^e watervoerende pakket, op enkele kilometers ten zuidwesten van het projectgebied A27. De onttrekking is gestart op 1 juni 2019 om 5:08 en is gestopt op 4 juni 2019 om 13:06. De onttrekking is daarmee circa 3 dagen in bedrijf geweest, waarbij in totaal 344.000 m³ is onttrokken, met een gemiddeld debiet van 4.300 m³/uur. Reconstructie van deze calamiteitenwinning met het grondwatermodel en het hierdoor kunnen vergelijken van de berekende en gemeten stijghoogtes verschaft nader inzicht in de gevoeligheid en de eigenschappen van de Waalre Klei (WAK1) ter plaatse van het projectgebied A27.

3.2 Algemeen

Het grondwatermodel is niet-stationair doorgerekend op tijdstappen van 6 uur waarbij gestart is op 1 juni 2019. Na 53 tijdstappen is de berekening gestopt op 14 juni 2019. Er is gerekend met de jaargemiddelde grondwateraanvulling; deze is gedurende de simulatie constant gehouden. De berekeningen zijn uitgevoerd met iMOD 4.4 op een horizontale modelresolutie van 25x25m. Het modelgebied is het totale modelgebied zoals beschreven in Vermeulen et al (2019).

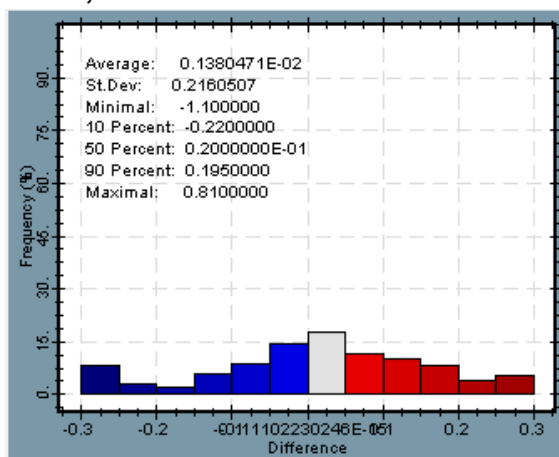
3.3 Aanvullende modelkalibratie

In het grondwatermodel, beschreven in Vermeulen et al. (2019), bevindt de calamiteitenwinning zich dicht nabij de rand van het modelgebied. Omwille van de modellering van de calamiteitenonttrekking is ervoor gekozen het modeldomein uit te breiden. Dit bleek goed mogelijk doordat de gegevensverzameling ten behoeve van de modelbouw is uitgevoerd voor een groter gebied dan uiteindelijk gebruikt als actief modelgebied in Vermeulen et al. (2019).

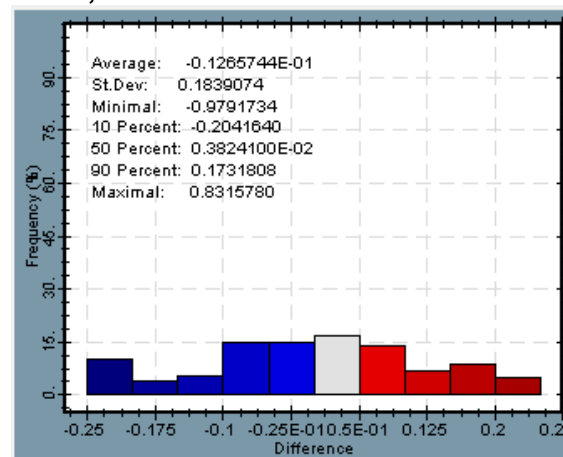
Voor de analyses van de doorlatendheid van de geulstructuren is het noodzakelijk dat het grondwatermodel het effect van de calamiteitenwinning zo goed mogelijk reproduceert, zowel in absolute (stijghoogtes) als in relatieve (verlagingen) zin. Om het model lokaal beter te laten presteren is een aanvullende (lokale en handmatige) modelkalibratie uitgevoerd. De gebruikte meetlocaties betreffen de 10 locaties met diepe filters zoals getoond in Figuur 5.1. Als performance criterium is een goede (kwalitatieve/visuele) reproductie van de verlagingcurve in het tweede watervoerend pakket ten tijde van de calamiteitenwinning gehanteerd. De belangrijkste gevoelige parameters bleken de weerstand van WAK1, de elastische bergingscoëfficiënt van het 2^e watervoerend pakket, en het doorlaatvermogen van het 2^e watervoerend pakket. Wat betreft het doorlaatvermogen en de elastische bergingscoëfficiënt van het 2^e watervoerende pakket zijn de parameteraanpassingen relatief beperkt (vermenigvuldigingsfactor van respectievelijk 1,25 en 2,0 t.o.v. het regionaal gekalibreerde model (Vermeulen et al. 2019) en plausibel in het licht van de onzekerheden van deze parameters.

De benodigde aanpassing van de weerstand van de WAK1 is aanzienlijk groter: deze is modelbreed met een factor 5 verhoogd. Deze aanpassing was nodig om voldoende stijghoogteverval te verkrijgen over de WAK1. Vanwege de grootte van de parameteraanpassing is gecontroleerd of deze het kalibratieresultaat van Vermeulen et al. (2019) (uitgedrukt in modelbrede statistieken voor de overeenkomst tussen modelresultaten en metingen) niet te veel geweld aandoet. Gebleken is dat deze parameteraanpassing het kalibratieresultaat vrijwel onveranderd laat (zie Figuur 3.1; deze figuur toont de kalibratiestatistieken voor het model vóór en na de aanpassing van de weerstand van WAK1. Dit betekent dat de beschikbare metingen in de kalibratieset weinig gevoelig zijn voor de weerstand van WAK1, en de geschatte weerstand daarmee erg onzeker is gebleven na kalibratie. De lage gevoeligheid wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het grote contrast in doorlatendheden en het beperkte aantal metingen in het 2^e watervoerend pakket. Ook uit de eerder uitgevoerde pompproef volgde voor de bovengrens van de weerstand een waarde die een factor 5 hoger lag dan de ondergrens. De aanpassing van de weerstand van WAK1 kan met de grote overgebleven onzekerheid als plausibel worden aangemerkt.

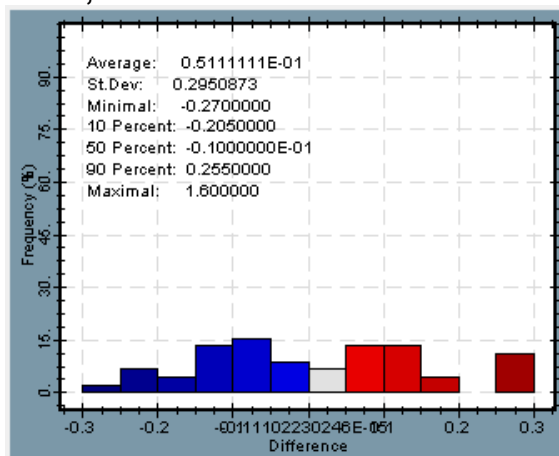
WVP1, NA



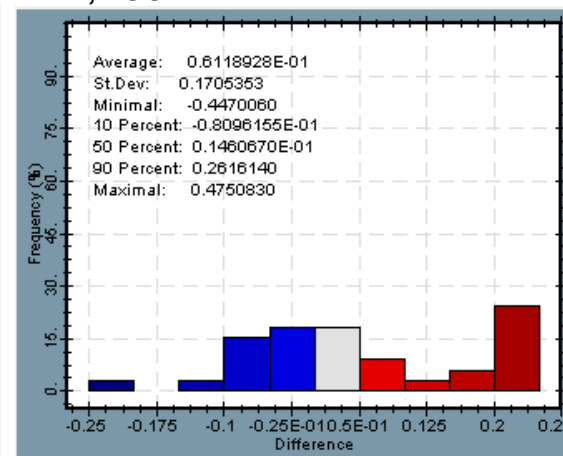
WVP1, VOOR



WVP2, NA

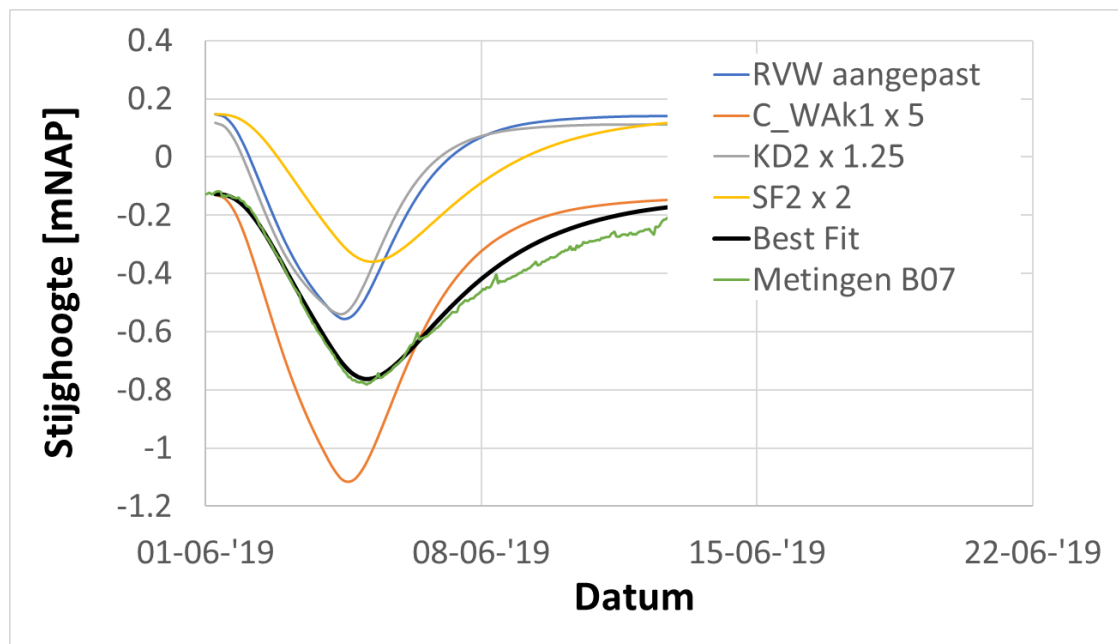


WVP2, VOOR



Figuur 3.1 Vergelijking van de statistieken van de residuen tussen gemeten en berekende stijghoogten voor het langjarige gemiddelde model, na en voor het aanpassen van de weerstand van de WAK1. Voor details over de gebruikte meetset wordt verwezen naar Vermeulen et al., 2019.

Figuur 3.2 toont het individuele effect van de parameteraanpassingen op de gemodelleerde tijdreeksen voor het 2^e watervoerend pakket. Tevens toont de figuur het resultaat van het “best-fit” model (met de combinatie van bovengenoemde parameteraanpassingen), samen met de meetreeks van peilbuis B07 (voor locatie zie Figuur 5.1). Het uiteindelijke (“best-fit”) model volgt de meetreeks op locatie B07 vooral tijdens de verlaging van de stijghoogte erg goed. Het “terugveren” van de stijghoogte na de maximale verlaging gebeurt in het model echter iets te snel. Het model kon op dit punt niet verder verbeterd worden.



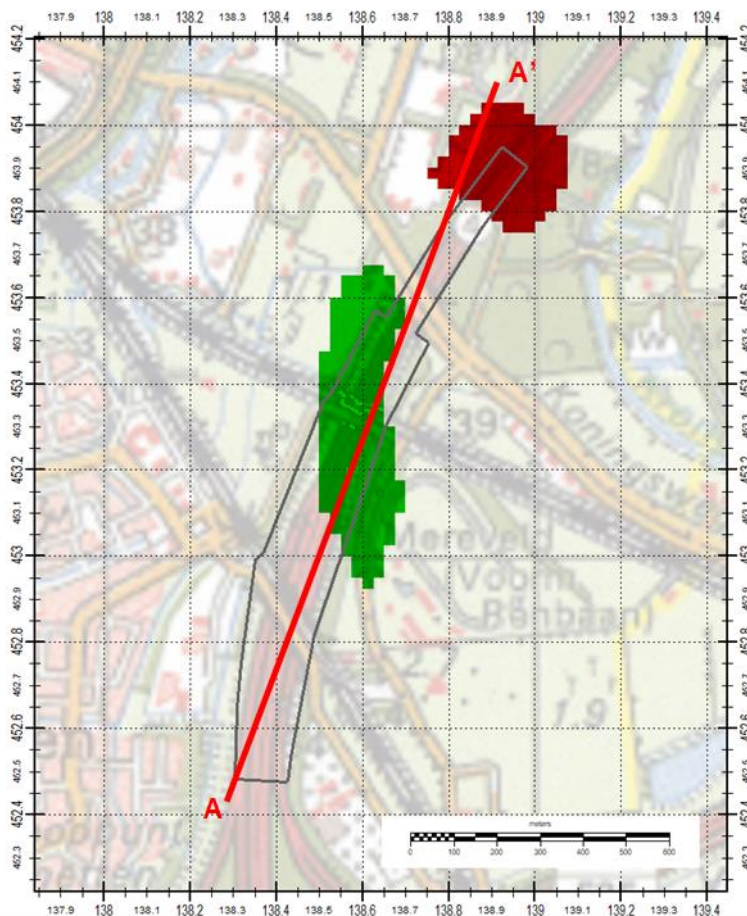
Figuur 3.2 Effect van parameteraanpassingen op gemodelleerde tijdreeksen voor het 2^e watervoerend pakket, ter plaatse van meetlocatie B07. De effecten zijn steeds uitgedrukt ten opzichte van de blauwe lijn, welke het modelresultaat weergeeft van de variant waarin, ten opzichte van het model van Vermeulen et al. (2019), alleen de randvoorwaarden (RVW) zijn aangepast.

4 Modelling geulstructuren

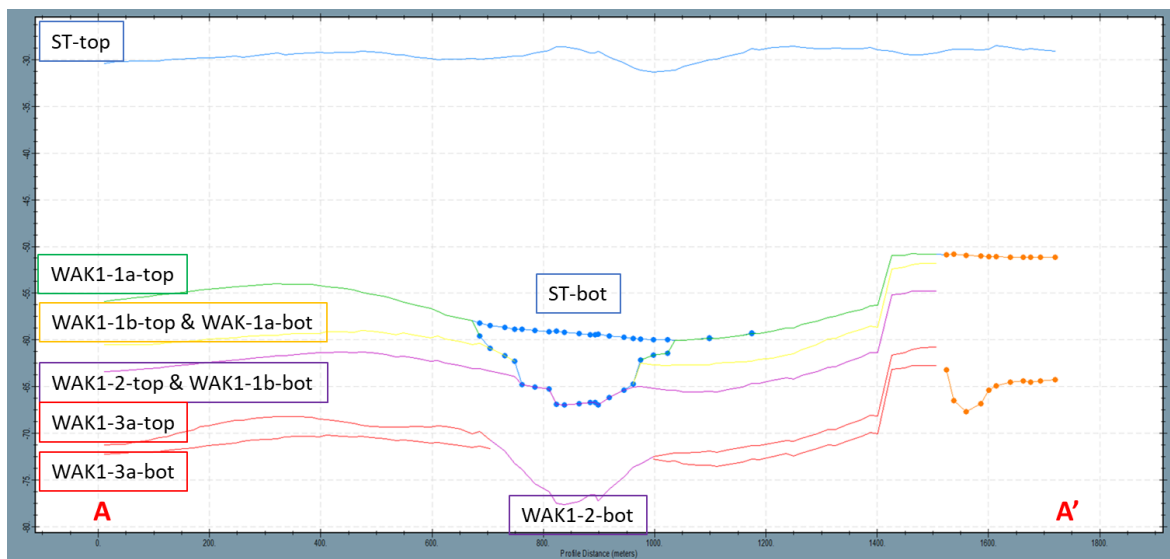
4.1 Ondergrondschematisering

4.1.1 Algemeen

Dit hoofdstuk beschrijft de stappen die doorlopen zijn om de geulstructuren in te brengen in de ondergrondschematisering van het lagenmodel ten behoeve van de grondwatermodellering. De ondergrondschematisering van het lagenmodel bestaat uit 20 lagen (Vermeulen et al., 2019). WAK1 is geschematiseerd in modellaag 13, 14 en 15 (voor de onderscheiden sub-eenheden). TNO heeft een schatting van de ligging en diepte van de twee geulstructuren rondom de A27 aangeleverd (Schokker et al., 2019): (1) de diepte van de boven- en onderkant van de Sterksel-geul (in het midden van de betonbak- en folieconstructie), (2) de diepte van de boven- en onderkant van de WAK1-geul (noordzijde van de betonbak- en folieconstructie) en (3) de schematisering van de WAK1 onderverdeeld in sublagen aangepast op de geulstructuren. De ligging van de geulstructuren nabij de A27 is weergegeven in Figuur 4.1. Figuur 4.2 toont de verticale doorsnede A-A' door de schematisering van de geulstructuren in de Sterksel en WAK1.



Figuur 4.1 Ligging geulstructuren ten opzichte van de betonbak- en folieconstructie (grijs-polygoon): Sterksel-geul (groen) en Waalre-geul (rood).



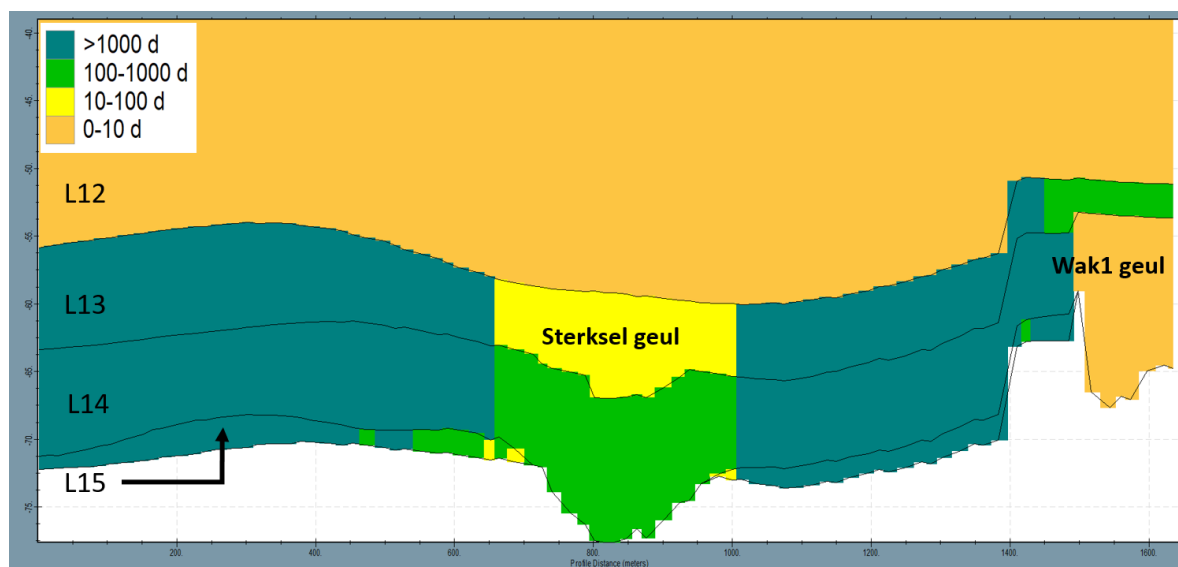
Figuur 4.2 Verticale doorsnede A-A' door de betonbak- en folieconstructie met diepteligging Sterksel formatie en WAK1 met geschematiseerde geulstructuren (blauw en oranje met bolletjes).

4.1.2 Verwerken geulstructuren in ondergrondschematisering

Het verwerken van de geulstructuren in de ondergrondschematisering van het A27 lagenmodel is in verschillende stappen uitgevoerd.

- Allereerst is de diepte van de boven- en onderkant van de gehele WAK1 aangepast in het lagenmodel op basis van de herkartering van TNO (Schokker et al., 2019) van de onderkant van de Sterksel formatie en de onderkant van WAK1 (WAK1-3a):
 - Bovenkant WAK1: onderkant van modellaag 12 en bovenkant van modellaag 13 zijn gezet op onderkant Sterksel formatie
 - Onderkant WAK1: onderkant van modellaag 15 en bovenkant van modellaag 16 zijn gezet op onderkant WAK1.
- Voor de **Waalre-geul** (noord) is de topklei van sub-eenheid 0 geschematiseerd in modellaag 13. De onderkant van modellaag 13 is gezet op onderkant Waalre klei schematisering 1B (= bovenkant WAK1-2). De overige sub-eenheden zijn verwerkt in modellaag 14. Modellaag 15 heeft hier een laagdikte van 0. MODFLOW-2005 kan niet omgaan met laagdiktes van 0, daarom is de minimale dikte van modellaag 15 gezet op 0.5 m. Modellaag 15 heeft hier dezelfde eigenschappen toegekend gekregen als modellaag 14, waarmee de schematisering gelijk is aan één waarin alleen modellaag 14 hier zou bestaan.
- De **Sterksel-geul** is verwerkt in modellaag 13, waarbij de bovenkant van de geul gelijk is aan de onderkant van modellaag 12 en de bovenkant van modellaag 13. De onderkant van de geul (onderkant modellaag 13 en bovenkant modellaag 14) is gelijk aan de WAK1-1b en WAK1-2.

De doorlatendheden van de geulstructuren zijn op basis van de verbreiding van de geulstructuren in de diepte aangepast. De uiteindelijke schematisering voor modellaag 12 t/m modellaag 15 is weergegeven in Figuur 4.3.



Figuur 4.3 Geulstructuren verwerkt in de ondergrondschematisering van het A27 lagenmodel. Modellaag 12 t/m 15 zijn getoond in deze doorsnede. De lagen zijn gekleurd naar weerstand over de modellaag [d].

4.2 Toekenning weerstanden en doorlatendheden aan geulstructuren

In Hoofdstuk 5 worden in de scenarioberekeningen verschillende totale weerstanden aan de geulstructuren toegekend. Hieronder wordt de daartoe gehanteerde methode beschreven.

Het model rekent met een horizontale doorlatendheid en een verticale anisotropie, op basis waarvan tijdens de simulatie de verticale doorlatendheid wordt bepaald. De horizontale doorlatendheid is berekend met behulp van:

$$KH = \frac{kD}{\text{dikte modellaag}}$$

Waarbij de kD direct is afgeleid van de lab-resultaten per modellaag (Tabel 2.14 en Tabel 2.17), en constant is verondersteld voor alle varianten.

De voor de scenario's gewenste totale weerstandswaarden (C) in de geulstructuren zijn omgerekend naar een verticale anisotropie (VA) via:

$$KV = \frac{\text{dikte modellaag}}{C}$$

en

$$VA = \frac{KV}{KH}$$

De relatie tussen VA en C wordt daarmee:

$$VA = \frac{\text{dikte modellaag}}{KH * C}$$

De totale gewenste weerstandswaarde per geul moet verdeeld over de 3 modellagen (van de WAK1), welke verschillende (gemiddelde) diktes hebben. De verdeling is zodanig gedaan dat

het aandeel van elke modellaag aan de totale gewenste weerstand gelijk blijft aan het aandeel aan de totale weerstand zoals gegeven door Tabel 2.14 en Tabel 2.17.

5 Modelmatige kwantificering geulweerstand

5.1 Introductie

Het geologisch en geotechnisch onderzoek (Hoofdstuk 2 heeft bandbreedtes opgeleverd van de doorlatendheden in de geulstructuren. In dit hoofdstuk wordt getracht de verwachtingswaarden en verwachte ondergrenzen van de geulweerstand nader te verkennen aan de hand van de modellering van de calamiteitenwinning. Daarmee zijn vervolgens scenario's doorgerekend ter bepaling van het benodigde onttrekkings- en retourdebiet in de aanlegfase (Hoofdstuk 6). Uit de in Hoofdstuk 2 bepaalde bandbreedtes voor de doorlatendheden van de geulstructuren wordt in Sectie 5.2 een selectie voor Sterksel- en Waalre geul gedestilleerd voor doorrekening met de calamiteitenwinning. De modelresultaten, verkregen met deze combinaties, worden vergeleken met de beschikbare meetreeksen. Daarbij wordt met name bekeken of de berekende:

- "Uitzakking" van de grondwaterstand in het eerste watervoerend pakket tijdens de calamiteitenwinning, en de;
- Verlaging van de stijghoogte in het tweede watervoerend pakket plausibel tijdens de calamiteitenwinning plausibel zijn, gegeven de beschikbare meetinformatie.

De hypothese is dat als de weerstanden in de geulen te laag gekozen worden, dit leidt tot te veel aantrekking van water door de geulstructuren vanuit het eerste watervoerend pakket. Dat uit zich dan in een te grote "uitzakking" van de grondwaterstand in het eerste watervoerend pakket en een te geringe verlaging van de stijghoogte in het tweede watervoerend pakket. Op deze manier zouden de ondergrenzen van de weerstand in de geulen nader verkend kunnen worden.

5.2 Selectie van weerstandscombinaties voor doorrekeningen

De selectie is gebaseerd op de uit Hoofdstuk 2 (Tabel 2.13 t/m Tabel 2.18) volgende verwachtingswaarden en minimale waarden voor de weerstanden binnen de geulstructuren². De gekozen combinaties zijn vermeld in Tabel 5.1. Varianten 3a t/m 3c verkennen de minimale weerstand van de Waalre geul waarbij de weerstand van de Sterksel geul op de verwachtingswaarde wordt gehouden. Varianten 3d t/m 3f verkennen de minimale weerstand van de Sterksel geul waarbij de weerstand van de Waalre geul op de verwachtingswaarde wordt gehouden. Het doel van varianten 4a en 4c is te onderzoeken of combinaties van lage weerstanden in beide geulen realistische resultaten geven; het was denkbaar dat een lage weerstand in één van de geulen geen plausibele modelresultaten zou geven, maar dat door spreiding van de effecten van dergelijke lage weerstanden over beide geulen wel plausibele resultaten zou geven.

² De waarde van 770 dagen als verwachtingswaarde voor de weerstand in de Sterksel geul is lager dan vermeld in Hoofdstuk 2 (839 dagen). Reden is een tussentijdse update van de getallen in Hoofdstuk 2, die te laat kwam om in de scenarioberekeningen mee te nemen.

Tabel 5.1 Doorgerekende weerstandscombinaties voor Waalre geul en Sterksel geul.
 Arceringscodes: groen = verwachtingswaarde, oranje = minimale waarde en
 rood = additionele "worst case" (NB: 3a en 3d zijn dezelfde berekening).

	3a	3b	3c	3d	3e	3f	4a	4c
C-Wak1- Waalre geul (dagen)	380	80	30	380	380	380	80	30
C-Wak1- Sterksel geul (dagen)	770	770	770	770	60	30	60	60

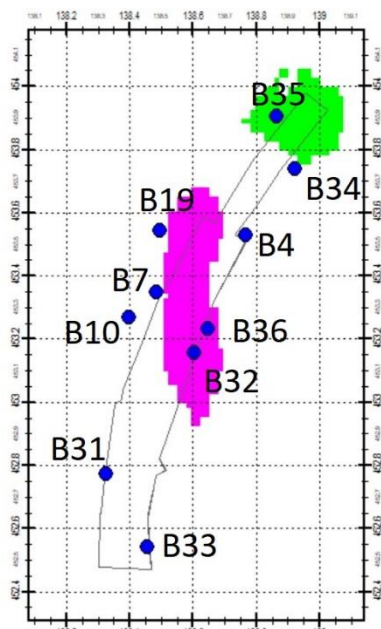
5.3 Opzet modelberekeningen

De opzet van de modelberekeningen is beschreven in Hoofdstuk **Error! Reference source not found.**, waarbij is overgestapt op een andere versie van IMOD voor het uitvoeren van de berekening. De hier gebruikte iMOD-versie is SVN-versie 2637 (dd. 10 oktober 2019).

5.4 Resultaten

5.4.1 Berekende verlagingsreeksen

De modelresultaten zijn beoordeeld aan de hand van metingen afkomstig van 10 meetlocaties met peilfilters onder en boven de WAK1. De ligging van deze meetlocaties is aangegeven in Figuur 5.1. De meetlocaties kunnen in drie groepen worden onderverdeeld: locaties nabij de



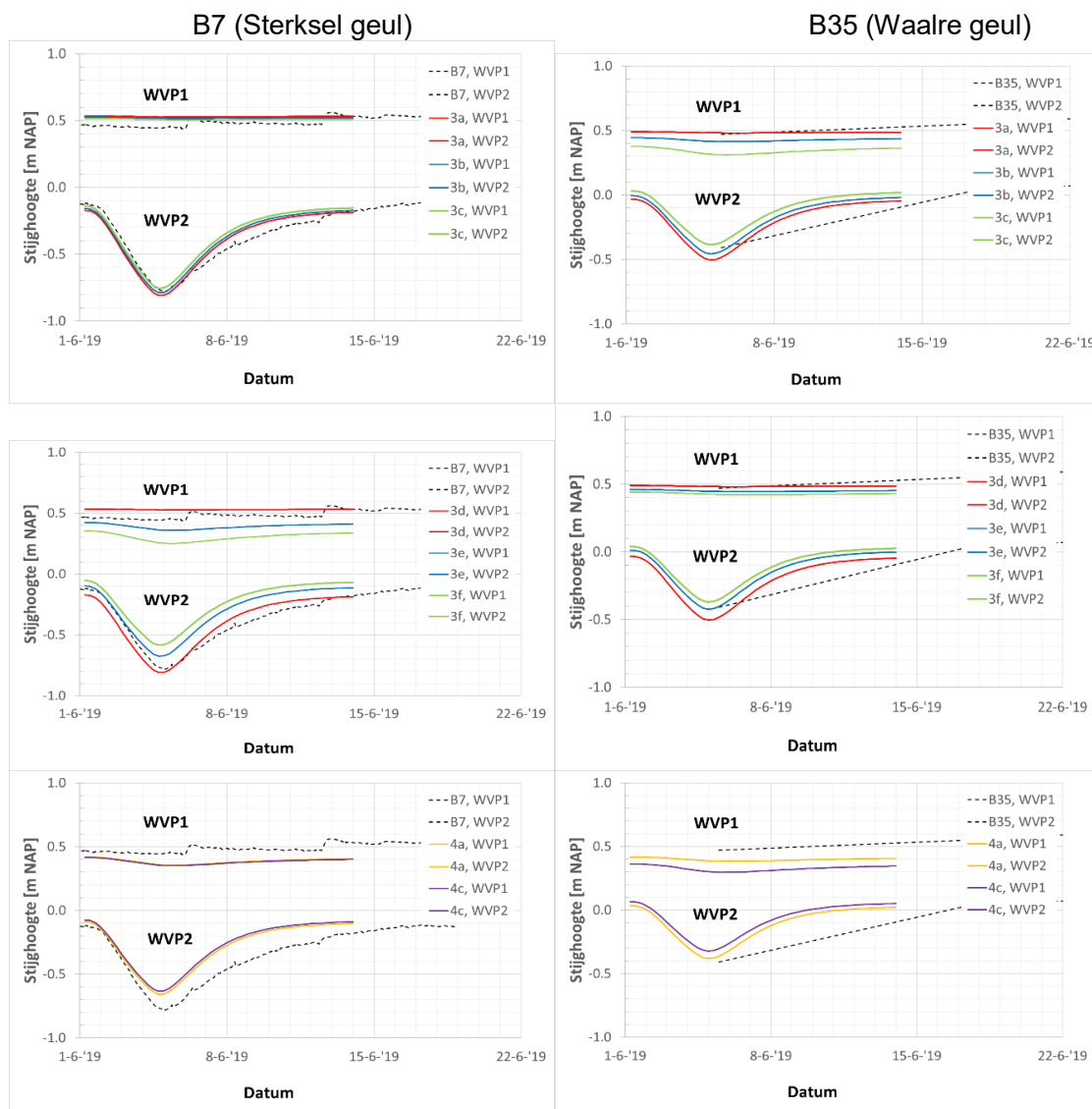
Waalre geul (B34 en B35), locaties nabij de Sterksel geul (B4, B7, B10, B19, B32 en B36) en twee zuidelijke locaties (B31 en B33). De hypothese is dat de noordelijke locaties vooral door variaties van de weerstand in de Waalre geul beïnvloed worden, de centrale locaties door variaties van de weerstand in de Sterksel geul, en de zuidelijke locaties relatief ongevoelig zijn voor de verschillende scenario's.

Figuur 5.2 toont, ter illustratie, de resultaten van de scenario's voor meetlocaties B7 en B35. De hypothese met betrekking tot de invloed van de weerstanden in de geulen worden in deze figuur bevestigd. Variatie van de weerstand in de Waalre geul (scenario's 3a-3c; de twee bovenste Figuren) heeft slechts een zeer gering effect op (centrale) locatie B7, maar wel een duidelijk effect op (noordelijke) locatie B35. Bij locatie B35 is vooral een verlaging van de grondwaterstand in het eerste watervoerend pakket zichtbaar bij lagere weerstanden in de Waalre geul. De verlaging in het 2^e watervoerend pakket wordt ook duidelijk geringer.

Figuur 5.1 Ligging van de meetlocaties met diepe peilfilters

Variatie van de weerstand in de Sterksel geul (scenario's 3d-3f; de twee middelste figuren) heeft een duidelijk effect op locatie B7 en veel minder op B35. Bij B7 wordt bij lagere weerstanden een sterkere verlaging van de grondwaterstand in het 1^e watervoerend pakket zichtbaar, evenals een minder sterke verlaging van de stijghoogte in het 2^e watervoerend pakket. Lagere weerstanden in de Sterksel geul resulteren bij B35 wel in een verhoging van de

uitgangsstijghoogte (op 1 juni 2019, ofwel $t=0$) in het 2^e watervoerend pakket, maar duidelijk minder in stijghoogteverlaging tijdens de onttrekking.



Figuur 5.2 Berekende en gemeten verlagingsreeksen tijdens de calamiteitenonttrekking, voor meetlocatie B7 (nabij Sterksel geul) en B35 (nabij Waalre geul). Boven: resultaten van de scenario's die de weerstand in de Waalre geul verkennen (3a-3c). Midden: resultaten van de scenario's die de weerstand in de Sterksel geul verkennen (3d-f). Onder: resultaten van de scenario's die in beide geulen een lage weerstand aannemen. Opmerking: voor B35 zijn alleen twee handmetingen beschikbaar, vandaar de rechte lijnen als meetreeksen in de rechterfiguren.

De twee onderste figuren in Figuur 5.2 laten zien dat bij B7 scenario's 4a (minimale weerstand in beide geulen) en 4c (worst-case weerstand in beide geulen) nauwelijks onderscheidend zijn. Bij B35 is er daarentegen nog wel een klein verschil tussen beide scenario's, wat wellicht verklaard kan worden door het feit dat B7 net buiten de geulstructuur ligt en B35 erin, of door het grotere oppervlak van de Sterksel geul t.o.v. de Waalre geul, waardoor bij verlaging van de weerstand eerder het "maximale" effect wordt bereikt.

Figuren als in Figuur 5.2 zijn ter analyse ook voor de overige 8 meetlocaties gemaakt, maar zijn niet opgenomen in deze rapportage.

5.4.2 Plausibiliteitstoets

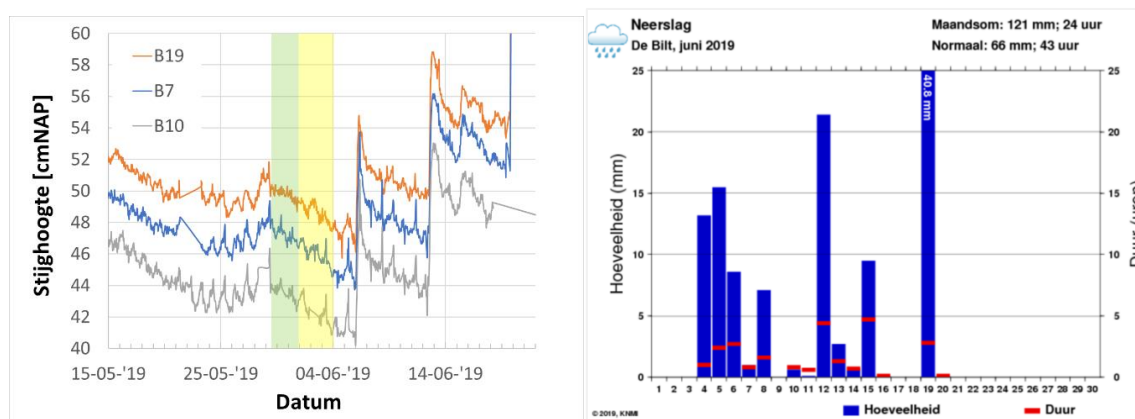
Criteria zijn opgesteld op basis waarvan geëvalueerd is of de berekende verlagingen in het eerste en tweede watervoerend pakket plausibel zijn in het licht van de beschikbare meetinformatie. De criteria worden hieronder nader toegelicht.

Watervoerend pakket 1:

- Maximale "uitzakking" van de grondwaterstand > 3 cm: **discutabel**
- Maximale "uitzakking" van de grondwaterstand > 5 cm: **niet plausibel**

Dit criterium is afgeleid op basis van de gemeten uitzakkingen van de grondwaterstand in het eerste watervoerend pakket, welke voor alle meetpunten een geringe uitzakking laat zien gedurende de calamiteitenonttrekking. Deze uitzakking bedraagt ongeveer 2 cm tussen de start van de onttrekking en het moment van maximale verlaging in het 2^e watervoerend pakket (rond middernacht, 4 naar 5 juni). De totale uitzakking gedurende deze periode zou gemaskeerd kunnen zijn door een neerslagevent op 4 juni, zie Figuur 5.3 rechts. Echter, de meetreeksen van de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (Figuur 5.3 links) duiden daar niet op. De periode van 29 mei tot en met 4 juni laat een gelijkmatige, bijna lineaire verlaging van de grondwaterstand zien. Een effect van het neerslagevent op 4 juni is niet zichtbaar.

In de groen gearceerde periode vindt de verlaging per definitie onafhankelijk plaats van de calamiteitenonttrekking, want deze is in deze periode nog niet begonnen. De geel gearceerde periode betreft de periode vanaf het begin van de calamiteitenonttrekking tot 4 juni (dus zonder neerslagevents). In beide perioden verloopt de verlaging min of meer hetzelfde. Dit duidt erop dat de gemeten verlaging zeer waarschijnlijk in elk geval deels onafhankelijk van de calamiteitenonttrekking plaats heeft gevonden, en de gemeten 2 cm verlaging tijdens de calamiteitenonttrekking een bovengrens betreft wat betreft de invloed van de onttrekking op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket.



Figuur 5.3 Links: gemeten stijghoogteverloop in het eerste watervoerend pakket. Rechts: gemeten neerslag in De Bilt in juni 2019 (Bron: KNMI. Disclaimer: het KNMI is niet betrokken bij het afgeleide werk en onderschrijft de strekking daarvan niet noodzakelijkerwijs).

Watervoerend pakket 2

Absolute verschil tussen maximale gemeten en berekende verlaging > 10 cm: **discutabel**

Absolute verschil tussen maximale gemeten en berekende verlaging > 15 cm: **niet plausibel**

De drempel van 10 cm is gebaseerd op de range in berekende maximale verlagingen tussen de verschillende scenario's. Deze range bedraagt bij de verschillende meetpunten 6 tot 11 cm. Een afwijking tussen gemeten en berekende maximale verlaging die groter is dan deze range is als discutabel aangemerkt, omdat die afwijking dan dus gelijk aan of zelfs groter is dan wat maximaal verwacht kan worden op basis van de onzekerheid in geulweerstand. Het wordt dan aannemelijk verondersteld dat de afwijking voor een belangrijk deel wordt veroorzaakt door een verkeerde inschatting van de geulweerstand. De drempel van 15 cm voor het oordeel "niet plausibel" is enigszins arbitrair gekozen.

Tabel 5.2 Resultaten van de plausibiliteitstoets. Oranje = "discutabel". Rood = "niet plausibel". Grijs gearceerde waarden in de kolom "Meting" betreffen uitzakkingen/verlagingen op basis van een beperkt aantal handmetingen en zij daardoor niet of minder betrouwbaar.

	3a = 3d	3b	3c	3d = 3a	3e	3f	4a	4c	Meting
C-WAk1 -N	380	80	30	380	380	380	80	30	
C-WAk1 -M	770	770	770	770	60	30	60	60	
Noord									
B34 wvp1, uitzakken	0.01	0.02	0.04	0.01	0.02	0.03	0.03	0.05	0.08
B34 wvp2, verlaging	0.50	0.48	0.45	0.50	0.46	0.43	0.44	0.42	0.58
B35 wvp1, uitzakken	0.01	0.03	0.07	0.01	0.02	0.02	0.04	0.07	0.08
B35 wvp2, verlaging	0.47	0.45	0.42	0.47	0.44	0.41	0.42	0.39	0.44
Midden									
B36 wvp1, uitzakken	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.10	0.06	0.06	x
B36 wvp2, verlaging	0.64	0.63	0.62	0.64	0.58	0.53	0.57	0.56	x
B04 wvp1, uitzakken	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.06	0.04	0.04	0.00
B04 wvp2, verlaging	0.56	0.54	0.53	0.56	0.50	0.47	0.49	0.48	x
B07 wvp1, uitzakken	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.10	0.06	0.06	0.00
B07 wvp2, verlaging	0.64	0.63	0.62	0.64	0.58	0.53	0.57	0.56	0.65
B10 wvp1, uitzakken	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.08	0.05	0.05	0.00
B10 wvp2, verlaging	0.67	0.67	0.65	0.67	0.62	0.58	0.61	0.60	0.68
B19 wvp1, uitzakken	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.09	0.06	0.06	0.00
B19 wvp2, verlaging	0.59	0.58	0.56	0.59	0.53	0.49	0.52	0.51	0.58
B32 wvp1, uitzakken	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.10	0.06	0.06	x
B32 wvp2, verlaging	0.66	0.66	0.64	0.66	0.60	0.55	0.59	0.58	x
Zuid									
B31 wvp1, uitzakken	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00
B31 wvp2, verlaging	0.82	0.81	0.81	0.82	0.78	0.75	0.78	0.77	0.83
B33 wvp1, uitzakken	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
B33 wvp2, verlaging	0.86	0.86	0.85	0.86	0.83	0.81	0.83	0.82	0.35

Tabel 5.2 geeft de resultaten van de plausibiliteitstoets voor alle scenario's en meetpunten. Te zien is dat alleen scenario 3a/3d de plausibiliteitstoets volledig doorstaat. Bij alle andere scenario's heeft tenminste één resultaat het predicaat "discutabel". 3a/3d is het scenario met in beide geulen de verwachtingswaarde voor de weerstand. Wetende dat het scenario plausibel is, is dit scenario geschikt ter bepaling van de verwachtingswaarde van het bemalingsdebiet.

Voor het bepalen van de bovengrens van het bemalingsdebiet zijn we, gaande van hoge naar lage weerstanden, geïnteresseerd in de hoogste weerstanden die niet meer plausibel zijn. Voor de Sterksel geul geeft Tabel 5.2 aan dat een weerstand van 770 dagen, afgemeten aan de vergelijking met meetresultaten van de centrale meetpunten (B36, B04, B07, B10 en B19) altijd plausibel is, ongeacht de weerstand van de Waalre geul. De eerstvolgende getoetste weerstand is 60 dagen (3e, 4a, 4c). Op basis van te grote uitzakkingen in het eerste watervoerend pakket bij de centrale meetpunten, zijn al deze scenario's niet plausibel, zelfs niet bij de hoogste weerstand in de Waalre geul. Hiermee is 60 dagen de bepaalde ondergrens van de weerstand in de Sterksel geul.

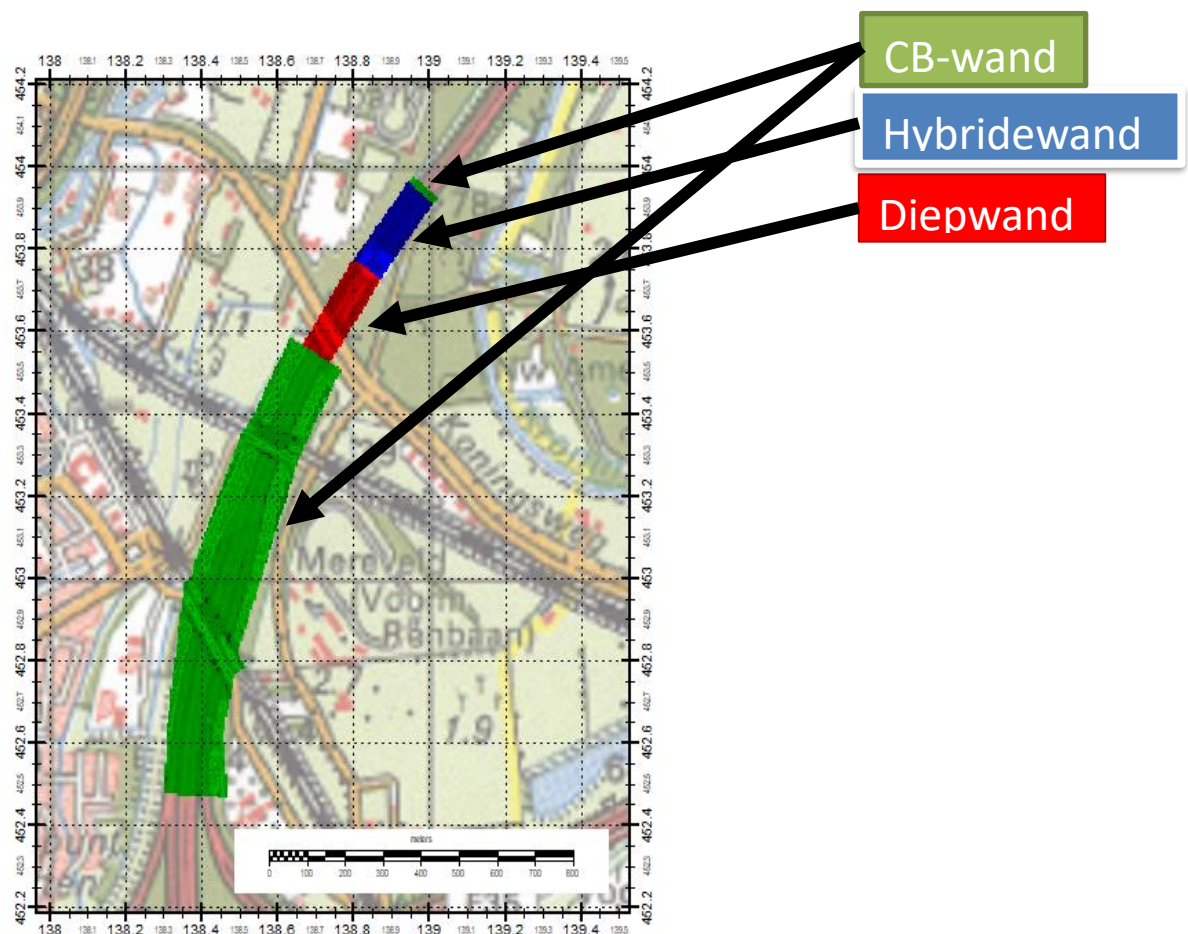
Voor de Waalre geul geeft Tabel 5.2 aan dat een weerstand van 380 dagen, afgemeten aan de vergelijking met meetresultaten van de noordelijke meetpunten (B34, B35) altijd plausibel is, ongeacht de weerstand van de Sterksel geul. De eerstvolgende getoetste weerstand is 80 dagen (3b, 4a). Beide scenario's geven discutabele uitzakkingen in het eerste watervoerend pakket bij de noordelijke meetpunten. Volgens de gehanteerde criteria worden deze scenario's, wat betreft verlagingen nabij de Waalre geul, nog niet als niet-plausibel beschouwd. Echter, op basis van de discutabele verlagingen in het eerste watervoerend pakket, in combinatie met het feit dat een weerstand van 80 dagen in Hoofdstuk 2 was vastgesteld als minimale weerstand, wordt 80 dagen als ondergrens beschouwd voor de weerstand in de Waalre geul.

Met 60 dagen als ondergrens voor de weerstand in de Sterksel geul en 80 dagen als ondergrens voor de weerstand in de Waalre geul, is scenario 4a vastgesteld als het scenario ter bepaling van de bovengrens van het bemalingsdebiet.

6 Modelmatige verkenning bemalingsdebieten aanlegfase

6.1 Introductie

In dit hoofdstuk worden de modelscenario's beschreven die betrekking hebben op de aanlegfase waarin de bemaling binnen schermwanden plaatsvindt. Het referentieontwerp bestaat eruit dat de werkzaamheden aan de verdiepte ligging worden uitgevoerd binnen een te plaatsen schermwand, die om de gehele verdiepte ligging wordt aangelegd. Dit betreft zowel de drie folievakken als de betonconstructie aan de noordzijde. In het referentieontwerp bestaat de schermwand uit verschillende segmenten: een cement-bentoniet wand langs de folieconstructie, een diepwand langs de groene overkapping en een hybridewand langs de betonbak. De kruising met de A27 in het noorden vindt plaats met een cement-bentoniet wand. Het tracé van de schermwand en de verschillende segmenten is weergegeven in Figuur 6.1.



Figuur 6.1 Het tracé en de verschillende segmenten van de schermwand

6.2 Opzet berekeningen

6.2.1 Algemeen

De berekeningen zijn uitgevoerd in steady-state; er is vanuit gegaan dat de aanlegfase voldoende lang duurt dat de steady-state aanname gerechtvaardigd is. Het gehanteerde modelgebied is het totale modelgebied zoals gerapporteerd in Vermeulen et al, (2019). In het

projectgebied A27 is een hogere laterale rekenresolutie gehanteerd van 10x10 m². Daarbuiten loopt de resolutie geleidelijk terug, tot 250x250 m² bij de buitenranden van het modelgebied.

6.2.2 Implementatie bemaling

De bemaling is geïmplementeerd door een vlakdekkende drainage te definiëren met de DRN ("drain") module van MODFLOW-2005. Door deze drains, in combinatie met een lage drainageweerstand, wordt bewerkstelligd dat de resulterende stijghoogte nagenoeg gelijk wordt aan het drainageniveau. Het ingestelde drainageniveau is 6 m -NAP. Dit betekent globaal een verlaging van 6,5 m. De gehanteerde drainage conductance is 5.000 m²/dag. Bij de rekenresolutie van 10x10 m² komt dat neer op een drainageweerstand van 0,02 dagen.

6.2.3 Implementatie schermwand

In Tabel 6.1 zijn de ontwerpparameters van de diverse segmenten van de schermwand vermeld. Deze ontwerpparameters zijn in het model overgenomen. De schermwand is in het model geïmplementeerd als een Horizontal Flow Barrier (HFB). Voor de modelberekeningen is voor de referentievariant aangehouden dat deze zal insnijden tot aan de basis van de Waalre Klei 1 formatie (tot en met modellaag 15).

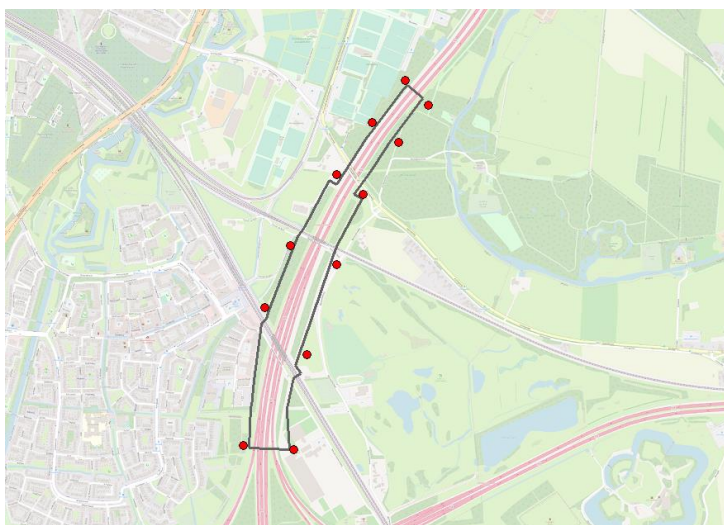
Naast de referentiewaarden voor de weerstanden van de schermwand zijn tevens varianten doorgerekend met een uniforme weerstand van 250 dagen, om de implicaties van een laagwaardigere wand in beeld te brengen.

Tabel 6.1 Eigenschappen en afmetingen segmenten van de schermwand (referentieontwerp)

Segment	Hoogte [m]	Weerstand [d]
Cementbentonietwand folievakken	67	900
Cementbentonietwand betonbak	67	900
Diepwand betonbak (0-40 m)	40	4.000
Diepwand betonbak (40-67 m)	27	400

6.2.4 Implementatie retourbemaling

De benodigde bemaling die is berekend voor de verschillende varianten (zie Sectie 6.3.1) is gelijkmatig verdeeld over 12 retourbemalingsputten. De locaties van de putten worden gegeven in Figuur 6.2. Er wordt geretourneerd in het 1^e watervoerend pakket, gelijkmatig over het dieptetraject tussen -10 en -25 m NAP.



Figuur 6.2 Ligging van de retourbemalingsputten (rode punten) in de doorgerekende modellen

6.3 Resultaten

6.3.1 Bemaling zonder retourbemaling

Tabel 6.2 geeft de berekende bemalingsdebieten voor de scenario's zonder retourbemaling. Te zien is dat de bovengrens van het bemalingsdebiet bij beide wandvarianten iets meer dan het dubbele bedraagt van de verwachtingswaarde. De "slechte" wand vraagt ook iets meer dan het dubbele debiet dan de referentiewand. De kwaliteit van de wand heeft nauwelijks effect op de flux door de Waalre klei; alleen de flux door de wand wordt erdoor beïnvloed. Andersom hebben de verschillende scenario's van de weerstanden in de geulstructuren nauwelijks effect op de flux door de wand, maar alleen op de flux door de WAK1. Gezien het enorme stijghoogteverval over wand en kleilaag is inderdaad te verwachten dat deze twee termen zich min of meer onafhankelijk van elkaar gedragen.

Tabel 6.2 Berekende bemalingsdebieten en onderverdeling van de debieten voor de scenario's zonder retourbemaling. Arceringcodes: groen = verwachtingswaarde, oranje = minimale waarde.

	C Waalre geul (d)	C Sterksel geul (d)	Bemalingsdebiet [m ³ /uur]	Flux door wand [m ³ /uur]	Flux door Waalre klei [m ³ /uur]
Weerstand wand = 250d					
3d	380	770	263	216	47
4a	80	60	585	210	375
Weerstand wand = referentie					
3d	380	770	113	64	48
4a	80	60	443	62	381

6.3.2 Bemaling met retourbemaling

Tabel 6.3 geeft de berekende bemalingsdebieten met retourbemaling. In geval van de referentievariant van de schermwand en verwachtingswaarden van de weerstanden in de geulen levert retourbemaling nauwelijks (< 2%) extra bemalingsdebiet op. Bij een "slechtere" wand en ondergrenswaarden van de weerstanden in de geulstructuren loopt het extra bemalingsdebiet op tot circa 7%.

In de berekeningen met retourbemaling neemt de flux over de wand enigszins toe, en de flux over de Waalre klei zo goed als niet. Dit is verklaarbaar doordat geretourneerd wordt in het eerste watervoerend pakket, en het verhang over de wand dus sterker zal toenemen dan het verhang over de Waalre klei.

Tabel 6.3 Berekende bemalingsdebieten en onderverdeling van de lektermen voor de scenario's met retourbemaling. Arceringscodes: Groen = verwachtingswaarde bodemweerstand. Oranje = ondergrens bodemweerstand. Percentages geven de toename van het debiet aan ten opzichte van de situatie zonder retourbemaling.

	C Waalre geul (d)	C Sterksel geul (d)	Bemalingsdebiet [m ³ /uur]	Flux door wand [m ³ /uur]	Flux door Waalre klei [m ³ /uur]
Weerstand wand = 250d					
3d	380	770	278 (+ 6%)	231	47
4a	80	60	622 (+ 7%)	241	381
Weerstand wand = referentie					
3d	380	770	115 (+ 2%)	67	48
4a	80	60	455 (+ 3%)	69	386

7 Conclusies

Deze studie betreft een nadere kwantificering van de te verwachten benodigde bemalingsdebieten ten tijde van de aanlegfase, in de referentievariant waarin gewerkt wordt met een schermwand. Andere uitvoeringsvarianten zijn niet onderzocht. Bovendien gaat deze studie niet in op omgevingseffecten in de aanlegfase of daarna.

Met een combinatie van grondonderzoek, laboratoriumonderzoek en grondwatermodellering is het mogelijk gebleken om te komen tot plausibele verwachtingswaarden en ondergrenzen van de bodemweerstand in de geulstructuren, en daarmee tot verwachtingswaarden en bovengrenzen van het te benodigde bemalingsdebiet in de aanlegfase.

Uit het grond- en laboratoriumonderzoek volgt voor de Waalre geul als schatting voor de maximale, gemiddelde en minimale weerstand respectievelijk 3.282, 379 en 84 dagen. Voor de Sterksel geul zijn deze waarden respectievelijk 11.072, 839 en 60 dagen.

Uit het onderzoek met het grondwatermodel volgt dat bovengenoemde schattingen voor de gemiddelde weerstanden plausibele resultaten geven. Daarmee is vastgesteld dat deze waarden geschikt zijn om te hanteren als **verwachtingswaarden** voor de weerstanden in de geulstructuren.

Uit het onderzoek met het grondwatermodel is tevens gebleken dat, met bovengenoemde schattingen voor de minimale weerstanden, te veel verlaging van de grondwaterstand wordt berekend in het eerste watervoerend pakket tijdens de calamiteitenonttrekking. Daarmee is vastgesteld dat deze schattingen geschikt zijn om te hanteren als **ondergrens** voor de weerstanden in de geulstructuren.

Met de vastgestelde verwachtingswaarden en ondergrenzen van de weerstanden in de geulstructuren zijn de volgende verwachtingswaarden en bovengrenzen van het benodigde bemalingsdebiet tijdens de realisatiefase berekend:

Zonder retourbemaling:

- In geval van een schermwand met specificaties voor de weerstanden volgens de RWS-inventarisatie: verwachtingswaarde = 113 m³/uur, bovengrens = 443 m³/uur.
- In geval van een wand met lagere kwaliteit (weerstand uniform 250 dagen): verwachtingswaarde = 263 m³/uur, bovengrens = 585 m³/uur.

Met retourbemaling

- In geval van een schermwand met specificaties voor de weerstanden volgens de RWS-inventarisatie: verwachtingswaarde = 115 m³/uur, bovengrens = 455 m³/uur.
- In geval van een wand met lagere kwaliteit (weerstand uniform 250 dagen): verwachtingswaarde = 278 m³/uur, bovengrens = 622 m³/uur.

8 Referenties

Beyer, W. 1964. Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit van Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. WWT, 14. Jahrgang (1964) Heft 6.

Cultuurtechnisch Vademecum. 1992. Deel III Water, par. 4.1.2, p.505, Vereniging voor Landinrichting.

Harkes, M. 2019. Grondonderzoek A27-A12 Ring Utrecht verdiepte ligging. Deltares rapport 11203802-002-BGS-0012_v0.1, oktober 2019.

Lunne, T., P.K. Robertson, J.M. Powell, (1997). Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Taylor&Francis, 1997

NEN EN ISO 17892-4 (2016). Geotechnisch onderzoek en beproeving - Beproeving van grond in het laboratorium – Deel 4: Bepaling van de korrelgrootte verdeling, december 2016

NEN EN ISO 17892-11 (2016). Geotechnisch onderzoek en beproeving - Beproeving van grond in het laboratorium – Deel 11: beproeven van de doorlatendheid, december 2016

Schokker, J. et al. 2019. R11693; Geologische karakterisatie en kartering van de Waalreklei en het eerste watervoerend pakket t.b.v. de verbreding van de A27 bij Utrecht: Update 2019. 31 oktober 2019

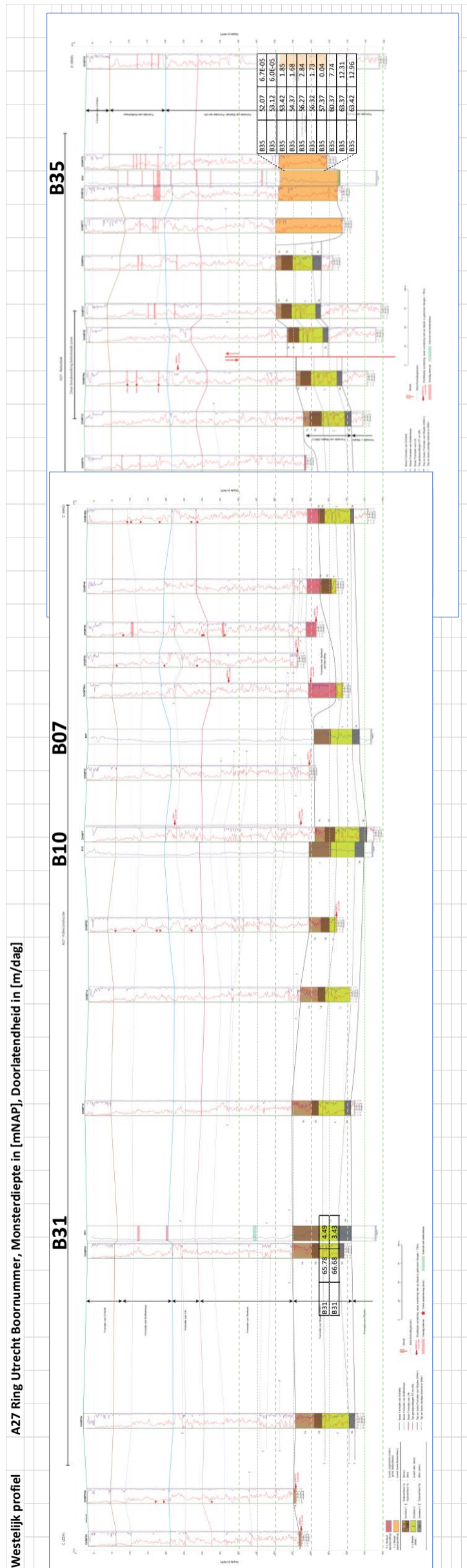
Van Kesteren, W., K. Koster, W. Dabekaussen, J. Schokker. (2019a). A27 - Interpretatie ondergrond, Memo 1: Geologie breukzone. TNO, juli 2019.

Van Kesteren, W., K. Koster, W. Dabekaussen, J. Schokker. (2019b). A27 - Interpretatie ondergrond, Memo 2: Geologie zuidelijk deel. TNO, september 2019.

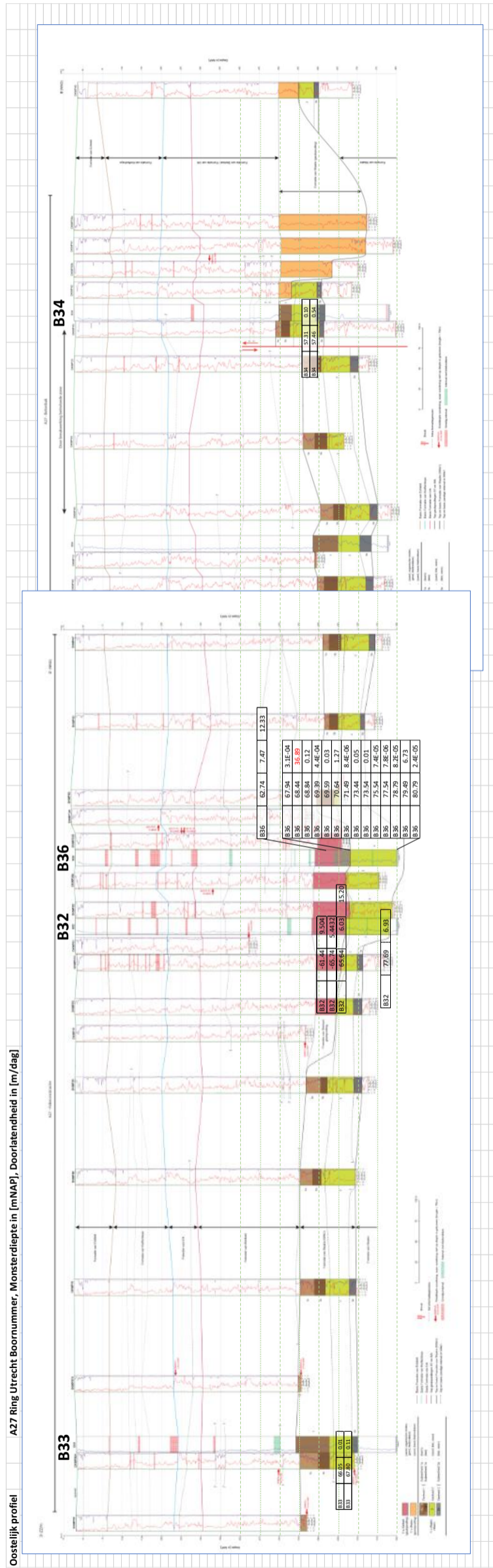
Van Meerten, J.J., J.W. van Esch. (2018). A27 Ring Utrecht – Interpretatie geohydrologische proeven Deltares rapport 11202343-007-BGS-0002, november 2018.

Vermeulen, P., L. Bos-Burgering, W. de Lange, A. Forzoni, A. Veldhuizen, G.Janssen. 2019. A27 Ring Utrecht Modelinstrumentarium - Ontwikkeling Niet-Stationair Grondwatermodel. Deltares rapport 11202346-000-BGS-0001.

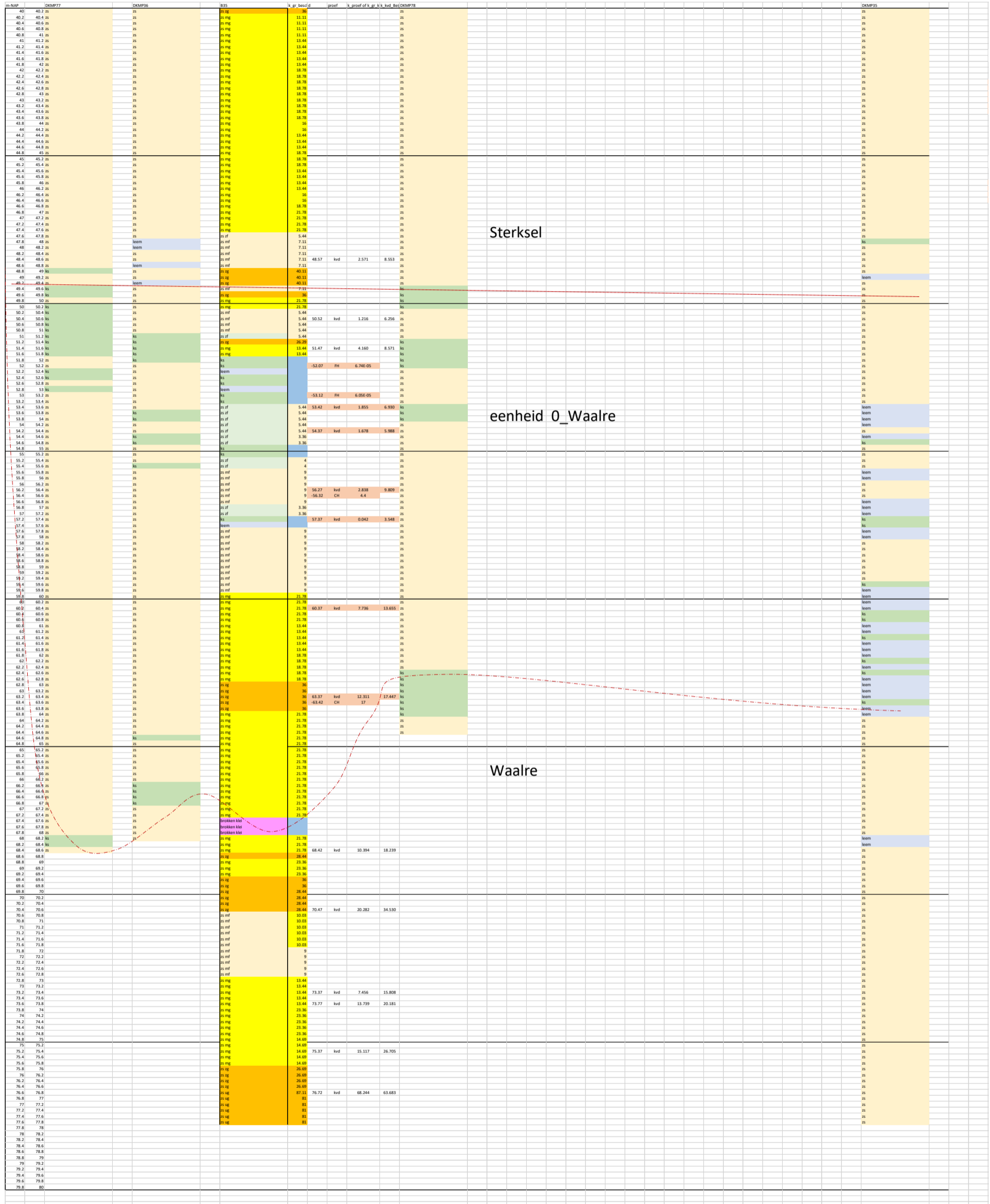
A Geologisch profiel westzijde



B Geologisch profiel oostzijde



C Lithologisch profiel westzijde B35



D Lithologisch profiel oostzijde

