

Proeftoetsing Piping

Pannerden-Kandia en 's Gravenwaard

*sterke dijken
schoon water*



Colofon

Nr.	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Vrijgave	Paraaf
1	16-11-2018	Boye van Zwol		Albert Wiggers		Henk Weijers	
		André Broere		Gert-Ruben van Goor			
		Rik Beekx					
		Hendrik Meuwese					
		Martijn Asschert					
		David Houtkamp					

Versie: 1

Datum: 16-11-2018

Status: Definitief

Inhoud

1	SAMENVATTING	7
2	INLEIDING	12
2.1	Aanleiding	12
2.2	Achtergrond	12
2.3	Samenstelling projectteam	13
2.4	Locaties	13
2.5	Leeswijzer	14
3	BUREAUSTUDIE	15
3.1	Inventariseren gegevens	15
3.2	Karakteriseren ondergrondopbouw	16
3.3	Karakteriseren geohydrologisch systeem	19
4	PARAMETERS	23
4.1	Hoogte maaiveld	23
4.2	Onderkant deklaag	23
4.3	Buitenwaterstand	37
4.4	Freatisch niveau bij uittredepunt	37
4.5	Intredepunt	37
4.6	Uittredepunt	46
4.7	Onderkant zandpakket	57
4.8	Korreldiameter D_{70}	57
4.9	Doorlatendheid zandlaag	60
5	VAKINDELING	72
5.1	Bepaling vakgrenzen	72
5.2	Bepaling maatgevende en representatieve profielen	82
6	ANALYTISCHE BEREKENINGEN	84
6.1	Bepaling benodigde kwelweglengte	84
6.2	Bepaling parameters	84
6.3	Resultaten	89
6.4	Evaluatie	110
7	D-GEO FLOW BEREKENINGEN	114
7.1	Inleiding	114
7.2	Algemeen	114
7.3	Uitgangspunten	115
7.4	Randvoorwaarden	118
7.5	Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse	119
7.6	Resultaten	120
7.7	Conclusies gevoeligheidsanalyse D-Geo Flow	130
7.8	Vergelijking met kritiek verval volgens analytische berekening	130
8	ANALYTISCHE BEREKENINGEN MET FICTIEVE LENGTE VOORLAND	134
8.1	Bepaling kritieke buitenwaterstand	134
8.2	Resultaten	135
8.3	Evaluatie	136
9	CONCLUSIES	144
9.1	Algemeen	144
9.2	Analytische berekeningen	144
9.3	D-Geo Flow berekeningen	145
9.4	Analytische berekeningen met fictieve lengte voorland	146

10 REFERENTIES	148
BIJLAGE 1 HISTORISCHE KAARTEN	150
BIJLAGE 2 GEOTOP DOORSNEDES.....	156
BIJLAGE 3 MAATGEVENDE PROFIELEN 'S GRAVENWAARD	162
BIJLAGE 4 MAATGEVENDE PROFIELEN PANNERDEN-KANDIA	167
BIJLAGE 5 BEPALING EFFECTIEVE DOORLATENDHEID	173
BIJLAGE 6 RESULTATEN ANALYTISCHE BEREKENINGEN.....	174
BIJLAGE 7 PROCESSHEMA BESLISBOOM PIPING.....	175
BIJLAGE 8 RESULTATEN D-GEO FLOW BEREKENINGEN	177
BIJLAGE 9 RESULTATEN ANALYTISCHE BEREKENINGEN VERGELIJKING MET D-GEO FLOW	184
BIJLAGE 10 TOELICHTING RECHTER RANDVOORWAARDE D-GEO FLOW	185
BIJLAGE 11 BEREKENINGEN FICTIEVE LENGTE VOORLAND	187
BIJLAGE 12 RESULTATEN ANALYTISCHE BEREKENINGEN MET FICTIEVE LENGTE VOORLAND	188

1 Samenvatting

Aanleiding en achtergrond

In het kader van de Project Overstijgende Verkenning Piping (POVP) worden verschillende proeftoetsingen uitgevoerd. In deze proeftoetsing wordt de nieuwe werkwijze piping toegepast. De nieuwe werkwijze piping kenmerkt zich in hoofdlijnen door de volgende aspecten [2]:

- Inzet van alle relevante specialismen
- Beschouwing van het systeem als geheel
- Beschouwing van de dijk in zijn omgeving
- Meting en monitoring
- Gevoeligheidsberekeningen om het systeem te doorgronden
- Tijdige afweging van nader onderzoek en keuze voor een type verbetermaatregel

Het samenbrengen van de inzichten van de “geodriehoek” (geotechnicus/adviseur waterkeringen, geoloog/fysisch geograaf en geohydroloog) zorgt ervoor dat er een doelgericht onderzoek uitgevoerd kan worden waarbij nut en noodzaak vroegtijdig onderscheiden worden [2].

De voorliggende rapportage betreft de trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia binnen het dijkkringtraject 48-1 van Waterschap Rijn en IJssel. Het betreft een proeftoetsing, en derhalve niet een complete WBI-beoordeling van de dijktrajecten.

Bureaustudie

In een bureaustudie is alle beschikbare informatie bij elkaar gebracht in een Geografisch Informatie Systeem (GIS) voor het schematiseren van de waterkering en ondergrond ten behoeve van de berekeningen en analyse. De trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia zijn interessant vanwege de heterogene opbouw van de ondergrond door een verleden van vlechtende rivieren. Daarnaast zijn er in het verleden meerdere wellen waargenomen. In het kader van de POVP zijn meerdere HPT-sonderingen, MPT-minipompproeven en pompproeven uitgevoerd. Ten behoeve van een onderzoek naar de intree weerstand van het voorland zijn tevens peilbuizen geplaatst, welke metingen hebben uitgevoerd bij het hoogwater van januari 2018. Daarnaast heeft binnen het dijkkringtraject 48-1 een geofysisch onderzoek plaatsgevonden.

Vakindeling

Om inzicht in de invloed van sloten en open water in het achterland te verkrijgen zijn verkennende opbarst-, heave- en pipingberekeningen uitgevoerd. De uiteindelijke vakindeling is zodanig gekozen dat het traject is opgedeeld in vakken met uniforme geometrie en ondergrond. De indeling is gemaakt op basis van variaties in geometrie (aanwezigheid van sloten of open water, aanwezige kwelweglengte en hoogte van het maaiveld) en variaties in de ondergrond (dikte van de deklaag, en aard en samenstelling van het watervoerend pakket).

Analytische berekeningen

Om inzicht te verkrijgen in de consequenties van de aanpassing van de rekenregel van Sellmeijer (2013) en in de invloed van nieuw vergaarde informatie zijn per vak de kritieke kwelweglengte in opeenvolgende stappen berekend:

- Stap 1: Invoer op basis van derde toetsronde en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 1
- Stap 2: Invoer op basis van derde toetsronde en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2
- Stap 3: Aanpassen geometrie (niveau van de buitenwaterstand en hoogte van het maaiveld) en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2

- Stap 4: Aanpassen dikte deklaag op basis van beschikbare grondonderzoeken en zandbanenkaart en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2
- Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket op basis van SOS segmenten en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2
- Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket op basis van beschikbare onderzoeken en GeoTOP en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2

In tegenstelling tot in Stap 1 is de controle op piping in Stap 2 t/m Stap 6 uitgevoerd met toetsregel Sellmeijer 2. Voor dijkkringtraject 48-1 geldt een veiligheidsfactor piping van 1.33. Daarnaast is in Stap 2 t/m Stap 6 een schematiseringsfactor van 1.0 aangehouden. De veiligheidsfactor piping in Stap 1 bedraagt 1.2 (conform toetsregel Sellmeijer 1).

In de derde toetsronde zijn de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR 2006) aangehouden. Voor het niveau van de buitenwaterstand is in Stap 3 t/m Stap 6 echter de ondergrenswaarde aangehouden.

In Stap 5 en Stap 6 zijn de lage karakteristieke waarde van de korreldiameter D_{70} en de hoge karakteristieke waarde van de specifieke doorlatendheid gehanteerd. De hoge karakteristieke waarde van de specifieke doorlatendheid is berekend uitgaande van een lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt van 0.5 (standaardwaarde). In Stap 5 is de lage karakteristieke waarde van de korreldiameter D_{70} berekend uitgaande van een lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt van 0.12 (standaardwaarde). In Stap 6 is de lage karakteristieke waarde van de korreldiameter D_{70} berekend uitgaande van een lokaal bestand van lognormaal verdeelde waarnemingen.

Op basis van de resultaten van de berekeningen kan het volgende worden geconcludeerd:

- De kritieke kwelweglengte bij Stap 6 is een veelvoud van die bij Stap 1. Voor representatieve profielen binnen de trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia is de kritieke kwelweglengte bij Stap 6 gemiddeld respectievelijk een factor 3.1 en 5.5 langer.
- Het controleren op piping met toetsregel Sellmeijer 2 leidt in alle gevallen tot een aanzienlijke toename in kritieke kwelweglengte.
- Het aanpassen van de geometrie en de dikte van de deklaag leidt gemiddeld genomen tot een aanzienlijke toename in kritieke kwelweglengte. Dit duidt erop dat in de derde toetsronde niet altijd een veilige schematisatie is gegeven.
- Het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van Stochastisch Ondergrond Schematisatie leidt in alle gevallen tot een aanzienlijke toename in kritieke kwelweglengte. De toename in kritieke kwelweglengte is het gevolg van het hanteren van een grotere doorlatendheid van het zandpakket in de berekeningen bij Stap 5.
- Het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van beschikbare onderzoeken en GeoTOP leidt voor het traject 's Gravenwaard gemiddeld genomen tot een aanzienlijke toename in kritieke kwelweglengte, terwijl er voor bepaalde profielen sprake is van een afname in kritieke kwelweglengte. De toename in kritieke kwelweglengte is het gevolg van het hanteren van een kleinere korreldiameter D_{70} in combinatie met een groter doorlaatvermogen van het zandpakket in de berekeningen bij Stap 6.
- Het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van beschikbare onderzoeken en GeoTOP leidt voor het traject Pannerden-Kandia in alle gevallen tot een matige tot aanzienlijke afname in kritieke kwelweglengte. De afname in kritieke kwelweglengte is hoofdzakelijk het gevolg van het hanteren van een kleinere doorlatendheid van het zandpakket in de berekeningen bij Stap 6.
- De kritieke kwelweglengte voor het representatieve profiel bij Stap 5 en Stap 6 is gemiddeld genomen nagenoeg gelijk aan die voor het maatgevende profiel binnen het betrokken vak.

Dit duidt erop dat de vakindeling zodanig is gekozen dat ieder vak een behoorlijk uniforme geometrie en ondergrond kent.

D-Geo Flow berekeningen

Voor de profielen bij dp 72, dp 75 en dp 147 zijn D-Geo Flow berekeningen uitgevoerd. In D-Geo Flow is het mogelijk om 2D transiënte grondwaterstromingsberekeningen uit te voeren met een gelaagde grondopbouw waarin zowel een tijdsafhankelijke hydraulische belasting, de samendrukbaarheid van het korrelskelet en het grondwater, en verandering van de freatische lijn meegenomen kunnen worden. Onderzocht zijn de gevoeligheden van de kwelweglengte, de gelaagdheid van de grondopbouw, de anisotropie van de grondlagen in het watervoerend pakket, de doorlatendheid van de bovenste grondlagen in het watervoerend pakket en de doorlatendheid van de deklaag in het voor- en achterland.

Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsberekeningen voor de profielen bij dp 72, dp 75 en dp 147 kan het volgende worden geconcludeerd:

- Het verlengen van de kwelweglengte leidt tot een toename in kritiek verval. Het verkorten van de kwelweglengte leidt tot een afname in kritiek verval.
- Het op- en neerwaarts verfijnen van de doorlatendheid van de bovenste grondlagen in het watervoerend pakket leidt tot een toename in kritiek verval. Bij opwaarts verfijnen is de toename in kritiek verval in de regel groter dan bij neerwaarts verfijnen.
- Het vergroten van de doorlatendheid van de deklaag in het voor- en achterland leidt tot een afname in kritiek verval. Hetzelfde geldt voor het vergroten van de doorlatendheid van de deklaag in enkel het voorland. De gevoeligheid van het aanpassen van de doorlatendheid in enkel het achterland is kleiner dan die van het aanpassen van de doorlatendheid in enkel het voorland. De gevoeligheid is grootst bij het aanpassen van de doorlatendheid in het voor- en achterland.
- Het toepassen van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de doorlatendheid (in plaats van het toepassen van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de doorlatendheid) leidt tot een aanzienlijke toename in kritiek verval.
- Het aannemen van een enkellaags watervoerend pakket in D-Geo Flow leidt tot een afname in kritiek verval. Detaillering van de grondlagen in het watervoerend pakket in de schematisatie in D-Geo Flow levert profijt op bij het toetsen van de veiligheid tegen piping.
- Het vergroten van de verticale doorlatendheid van de grondlagen in het watervoerend pakket met een factor 3 leidt niet in alle gevallen tot een afname in kritiek verval. Voor de profielen bij dp 72 en dp 75, waar de initiële doorlatendheid als gevolg van de aanwezigheid van grindlagen in het watervoerend pakket reeds relatief groot is, wordt een toename in kritiek verval berekend.
- Het opkisten van een wel in het achterland (in D-Geo Flow geschematiseerd door het opvoeren van de heave randvoorwaarde in het achterland) heeft geen effect op het resulterende kritieke verval. De toename in kritieke buitenwaterstand is recht evenredig met de toename in hoogte van de opkisting.

De kritieke vervallen voor de D-Geo Flow berekeningen zijn ter vergelijking tevens analytisch berekend met toetsregel Sellmeijer 2. Voor de specifieke doorlatendheid is hierbij de gewogen gemiddelde waarde van de doorlatendheid van het zandpakket gehanteerd.

Op basis van de resultaten van de analytische controleberekeningen voor de profielen bij dp 72, dp 75 en dp 147 kan het volgende worden geconcludeerd:

- Voor de beschouwde profielen geldt dat het verschil tussen het kritiek verval volgens D-Geo Flow en het kritiek verval volgens de analytische berekening veelal beperkt is tot 0.3 m, zowel voor berekeningen met een enkellaags watervoerend pakket in D-Geo Flow als voor

berekeningen met een meerlaags watervoerend pakket in D-Geo Flow. Dit duidt erop dat het effect van een meerlaags watervoerend pakket redelijkerwijs kan worden meegenomen in analytische berekeningen door het toepassen van de gewogen gemiddelde waarde van de doorlatendheid van het zandpakket.

- Het rivierwaarts verplaatsen van het intredepunt neigt tot onderschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow. Het landwaarts verplaatsen van het intredepunt neigt tot overschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow.
- Het rekenen met een equivalente dikte van het zandpakket (berekend als de dikte van het zandpakket gedeeld door de wortel van de anisotropiefactor) leidt voor bepaalde profielen tot een overschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow. Dit duidt erop dat het effect van anisotropie van de grondlagen in het watervoerend pakket niet met deze methode kan worden verwerkt in analytische berekeningen.

Analytische berekeningen met fictieve lengte voorland

Aanvullend op de bovengenoemde analytische berekeningen zijn berekeningen uitgevoerd waarbij de fictieve lengte van het voorland in rekening is gebracht (Stap 7). De doorlatendheid van de deklaag in het voorland is ontleend aan beschikbare grondwatermodellen voor de locaties Lobith (dp 72), Pannerden (dp 150) en Westervoort (dp 230). Na kalibratie van grondwatermodellen aan de hand van peilbuismetingen tijdens het hoogwater van januari 2018 zijn voor de locatie Lobith (dp 72) en de locatie Westervoort (dp 230) intreeweerstand van respectievelijk 2-8 dagen en 1.5-3 dagen voorgesteld. De lengte van het voorland en de dikte van de deklaag zijn bepaald op basis van de beschikbare boringen en sonderingen, de zandbanenkaart en de resultaten van het geofysisch onderzoek. De aanwezige kwelweglengte is gelijkgesteld aan de dijkbasis (horizontale afstand tussen buitenteen en uitredepunt) plus de fictieve lengte van het voorland, mits niet langer dan twee maal de dijkbasis.

Het kritieke verval is berekend met de toetsregel Sellmeijer 2, zowel met karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige zandlaag (Stap 7A) als met gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige zandlaag (Stap 7B). De berekende kritieke buitenwaterstanden zijn vergeleken met voorspelde en in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden.

Op basis van de resultaten van de analytische berekeningen waarbij de fictieve lengte van het voorland in rekening is gebracht kan het volgende worden geconcludeerd:

- Bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7B) is de berekende kritieke buitenwaterstand significant hoger dan bij toepassing van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7A).
- Bij toepassing van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7A) zou de kritieke buitenwaterstanden exclusief veiligheid voor meerdere profielen zijn overschreden tijdens de hoogwaters van december 1993, januari/februari 1995, oktober/november 1998 en januari 2011, in sommige gevallen ook voor dijkvakken waar volgens de wellenkaart geen wellen zijn opgetreden.
- Bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7B) is de kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid voor (bijna) alle profielen niet overschreden tijdens de hoogwaters van december 1993, januari/februari 1995, oktober/november 1998 en januari 2011. Dit komt overeen met de tijdens de hoogwaters getoonde prestaties van de dijkvakken.

Bij het beoordelen van de resultaten van de berekeningen moet worden opgemerkt dat de wellenkaart incompleet lijkt en soms onverklaarbaar is, dat rekening moet worden gehouden met

onzekerheden in (op basis van betrekkinglijnen afgeleide) lokale hoogwaterstanden en dat de kritieke buitenwaterstand voor bepaalde profielen mogelijk is onderschat door onderschatting van de aanwezige kwelweglengte (omdat de breedte van de strook voorland waar geofysisch onderzoek heeft plaatsgevonden beperkt is).

Algemeen

Opgemerkt moet worden dat de conclusies uit deze proefvoetsing alleen van toepassing zijn op de trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia. Het is niet mogelijk om deze conclusies zonder een aanvullende analyse toe te passen op locaties met eigenschappen die afwijken van die op de trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia.

2 Inleiding

2.1 Aanleiding

In het kader van de Project Overstijgende Verkenning Piping (POVP) worden verschillende proeftoetsingen uitgevoerd. In deze proeftoetsing wordt de nieuwe werkwijze piping uitgetoetst op de trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia binnen het dijkkringtraject 48-1 (Figuur 1). Het betreft een proeftoetsing, en derhalve niet een complete WBI-beoordeling van de dijktrajecten.

2.2 Achtergrond

De POVP heeft verkenningen specifiek gericht op een grondiger beschouwing vanuit verschillende invalshoeken [2]:

- Systeemkennis van de opbouw en de eigenschappen van de ondergrond, alsmede het gedrag van grond en grondwater onder invloed van stijgend buitenwater.
- Reken- en onderzoekstechnieken om op betrouwbare wijze het systeemgedrag te kwantificeren en de weerstand tegen piping te bepalen.
- Oplossingen, traditionele en nieuwe technieken om piping te voorkomen gericht op de daadwerkelijke fysieke ruimte voor de oplossing, de effectiviteit van een oplossing in het grotere systeem of zelfs de tijdelijkheid van toepassing, waarbij kostenoverwegingen uiteraard ook een rol spelen.
- Het proces waarin maatregelen tegen piping tot stand komen speelt vaak een dominante rol naast bovenstaande, vooral technisch-inhoudelijke benadering.

Traditioneel wordt het verschijnsel opbarsten, heave en piping in een strak tweedimensionaal geotechnisch schema beoordeeld. Een aanpak die het hele grond(water)systeem beschouwt biedt een realistischer beeld van de situatie ten aanzien van het pipingverschijnsel. Het optreden van een geconcentreerde waterspanning nabij een mogelijk uittredepunt voor zand is ook sterk afhankelijk van het grondwatergedrag onder invloed van hoge buitenwaterstanden op grotere schaal, waarbij geologische/geomorfolologische formaties, (in)homogeniteit en tijd een rol spelen. Andere disciplines zijn nodig om hierover betrouwbaar te adviseren: geologen, fysisch geografen en geohydrologen [2].

De standaardaanpak voor het pipingprobleem richtte zich sterk op de rekenregels van Bligh c.q. Sellmeijer. Met de aanpassing van de regel van Sellmeijer (2013) is de regel van Bligh voor dijken verlaten. In veel gevallen leveren de uitkomsten van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer problemen op voor inpassing van kwelwegverlengende maatregelen. Dit heeft niet geleid tot nieuwe rekentechnieken, terwijl er wordt geadviseerd om in voorkomende gevallen een ontwerp te maken dat onafhankelijk is van de kwelweg, en zo het gebruik van de regel te vermijden [2].

De nieuwe werkwijze piping kenmerkt zich in hoofdlijnen door de volgende aspecten [2]:

- Inzet van alle relevante specialismen
- Beschouwing van het systeem als geheel
- Beschouwing van de dijk in zijn omgeving
- Meting en monitoring
- Gevoeligheidsberekeningen om het systeem te doorgronden
- Tijdige afweging van nader onderzoek en keuze voor een type verbetermaatregel

Het samenbrengen van de inzichten van de “geodriehoek” (geotechnicus/adviseur waterkeringen, geoloog/fysisch geograaf en geohydroloog) zorgt ervoor dat er een doelgericht onderzoek uitgevoerd kan worden waarbij nut en noodzaak vroegtijdig onderscheiden worden [2].

2.3 Samenstelling projectteam

Kenmerkend voor de nieuwe werkwijze piping is dat kennis vanuit verschillende kennisgebieden en/of specialismen worden samengebracht. Voor deze proeftoetsing is een globale verdeling te maken in drie verschillende kennisgebieden. Per kennisgebied is een marktpartij geselecteerd.

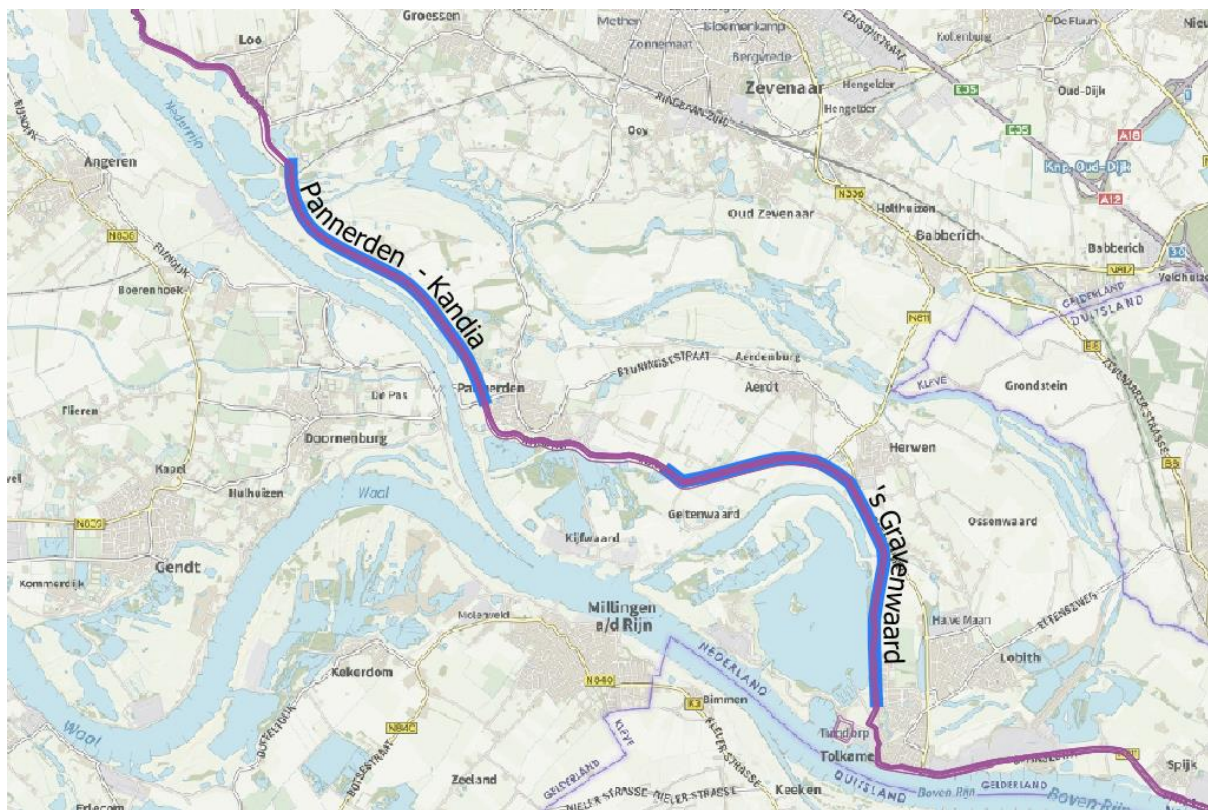
Tabel 1: Verdeling van kennisgebieden

Kennisgebied	Marktpartij
Geotechniek	LievensCSO
Geohydrologie	Witteveen + Bos
Geografische Informatie Systeem (GIS)	Antea

2.4 Locaties

In deze proeftoetsing worden de trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia binnen het dijkkringtraject 48-1 onder beheer van het Waterschap Rijn en IJssel beschouwd. Het traject 's Gravenwaard is gelegen nabij Lobith, en bevindt zich tussen dp 75 en dp 107. Het traject Pannerden-Kandia is gelegen tussen Pannerden en het Gemaal Kandia te Groessen, en bevindt zich tussen dp 135 en dp 174 (Figuur 1). Voor beide trajecten gelden signalerings- en ondergrenswaarden van respectievelijk 1/30000 per jaar en 1/10000 per jaar (Tabel 2).

De trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia zijn interessant vanwege de heterogene opbouw van de ondergrond door een verleden van vlechtende rivieren. Daarnaast zijn er in het verleden meerdere wellen waargenomen. Er is specifiek voor deze trajecten gekozen omdat er veel informatie beschikbaar is vanuit nieuwe en eerdere onderzoeken. Deze informatie is aangeleverd door het Waterschap Rijn en IJssel.



Figuur 1: Trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia

Tabel 2: Overzicht trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia

Traject	Dijkring- traject	Begin traject	Einde traject	Signalering	Ondergrens	Beheerder
's Gravenwaard	48-1	57+000	107+000	1/30000	1/10000	WRIJ
Pannerden-Kandia	48-1	135+030	174+060	1/30000	1/10000	WRIJ

2.5 Leeswijzer

De opbouw van dit rapport volgt grotendeels het in [2] beschreven proces van de pipinganalyse. In de navolgende hoofdstukken worden de volgende aspecten behandeld:

- In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de bureaustudie. Hierin is alle beschikbare informatie bij elkaar gebracht in een Geografisch Informatie Systeem (GIS) voor het schematiseren van de waterkering en ondergrond ten behoeve van de berekeningen en analyse.
- In hoofdstuk 4 wordt per relevante parameter een beknopt overzicht van de beschikbare informatie gegeven.
- In hoofdstuk 5 wordt de uiteindelijke vakindeling beschreven. Daarnaast worden per vak de maatgevende en representatieve profielen bepaald.
- In hoofdstuk 6 worden de resultaten van analytische berekeningen gegeven. Om inzicht in de consequenties van de aanpassing van de rekenregel van Sellmeijer (2013) en in de invloed van nieuw vergaarde informatie te verkrijgen is per vak in opeenvolgende stappen de kritieke kwelweglengte berekend.
- In hoofdstuk 7 zijn de resultaten van D-Geo Flow berekeningen gegeven. Hierin zijn voor verschillende profielen de gevoeligheden van de kwelweglengte, de gelaagdheid van de grondopbouw, de anisotropie van de grondlagen in het watervoerend pakket, de doorlatendheid van de bovenste grondlagen in het watervoerend pakket en de doorlatendheid van de deklaag in het voor- en achterland onderzocht. Tevens is een vergelijking met het analytisch berekende kritieke verval opgenomen.
- In hoofdstuk 8 worden de resultaten van analytische berekeningen waarbij de fictieve lengte van het voorland in rekening is gebracht gegeven. De berekende kritieke buitenwaterstanden worden vergeleken met in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden.
- In hoofdstuk 9 worden de conclusies van deze proefvoetsing samengevat.

3 Bureaustudie

3.1 Inventariseren gegevens

De volgende informatiebronnen zijn gebruikt voor de bureaustudie:

- Topografische kaart
- Dijkpalen en kenmerkende profiellijnen waterkering
- Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)
- Hoogtegegevens Waterschap Rijn en IJssel (Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) aangevuld met lokale hoogtemetingen)
- Leidingvakken Waterschap Rijn en IJssel
- Basisregistratie Grootchalige Topografie
- Historisch kaartmateriaal
- Satellietbeelden en luchtfoto's
- Bestekstekeningen en oude rapporten
- Stochastische Ondergrond Schematisatie (SOS)
- Geotechnisch onderzoek (boor- en sondeerstaten, en laboratoriumbepalingen op monsters)
- Geofysisch onderzoek
- Hydrogeologisch model REGIS
- Detaillering bovenste lagen met GeoTOP
- Zandbanenkaart
- Wellenkaart
- Resultaten derde toetsronde
- Toetspeil Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR 2006)
- Ondergrens- en signaleringswaarden
- Peilbuismetingen

Veel van bovenstaande informatie is geografisch gepositioneerd. Bij het ordenen en over elkaar leggen van informatiebronnen is een Geografisch Informatie Systeem (GIS) gebruikt.

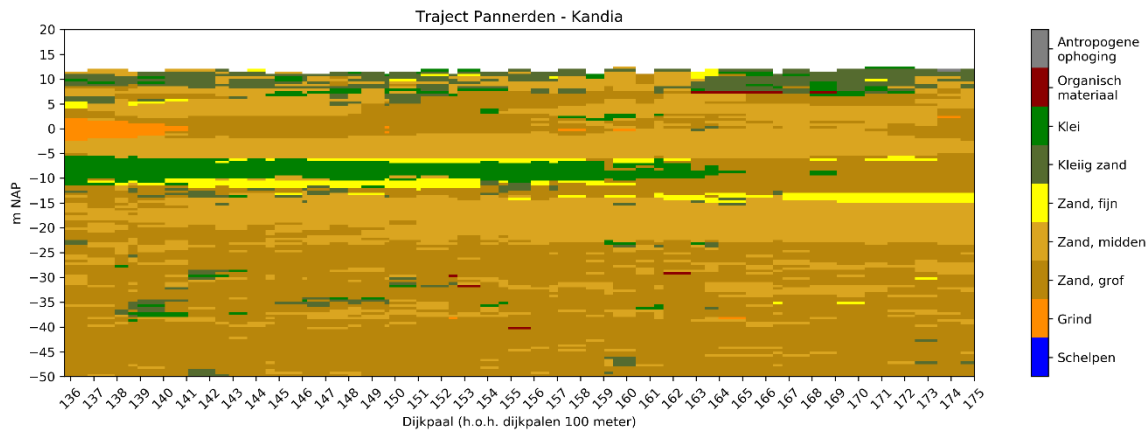
Historische kaarten (bron: topotijdreis.nl) zijn opgenomen in Bijlage 1. Belangrijke veranderingen die tussen de verschillende kaarten zichtbaar zijn, zijn samengevat in Tabel 3.

Tabel 3: Veranderingen zichtbaar in historisch kaartmateriaal

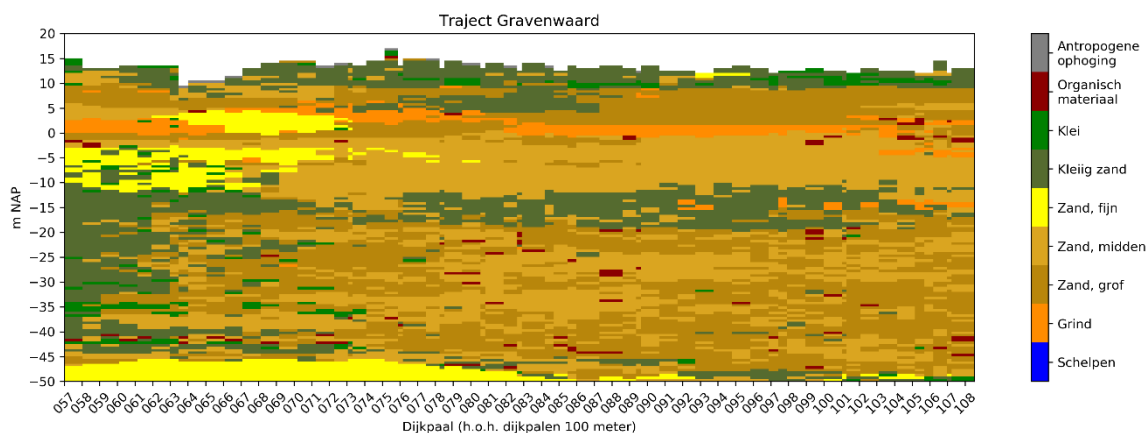
Periode		Veranderingen zichtbaar in kaartmateriaal
Van	Tot	
1850	1868	Oude Waal afgenomen.
1868	1895	Oude Waal afgesloten.
1923	1931	Rijbaan aangelegd in Lobberdensche Waard.
1931	1957	Pannerdensche Kop verlengd.
1957	1966	Bocht in Pannerdensch Kanaal afgesneden. Afgravingen in Bijlandsche Waard (De Bijland) nabij Tolkamer.
1966	1972	Dijk tussen Pannerden en Kandia verlegd.
1972	1977	Afgravingen in Lobberdensche Waard nabij Pannerden.
1977	1985	Oude Rijn afgesloten nabij Kandia. Afgravingen in Lobberdensche Waard nabij Pannerden.
1995	2006	Afgravingen in Lobberdensche Waard nabij Pannerden. Afgravingen in Loowaard nabij Kandia.
2006	2011	Tunnel Pannerdensch Kanaal (spoortunnel Betuweroute) aangelegd nabij Kandia.

3.2 Karakteriseren ondergrondopbouw

Met behulp van de database van GeoTOP (3) zijn doorsnedes gemaakt over het dijklichaam van het dijktraject. Een inzicht wordt gekregen in de bodemopbouw op het dijktraject. De GeoTOP doorsnedes presenteren de meest waarschijnlijke lithoklasse. In Figuur 5 wordt een langdoorsnede gegeven van REGISII. De lengtedoorsnedes van GeoTOP zijn gegeven in Figuur 2 en Figuur 3. Naast de lengtedoorsnedes zijn op de benodigde locaties dwarsdoorsnedes gemaakt op de dijk. Deze zijn gegeven in Bijlage 2.



Figuur 2: Lengtedoorsnede over het dijklichaam bij Pannerden – Kandia



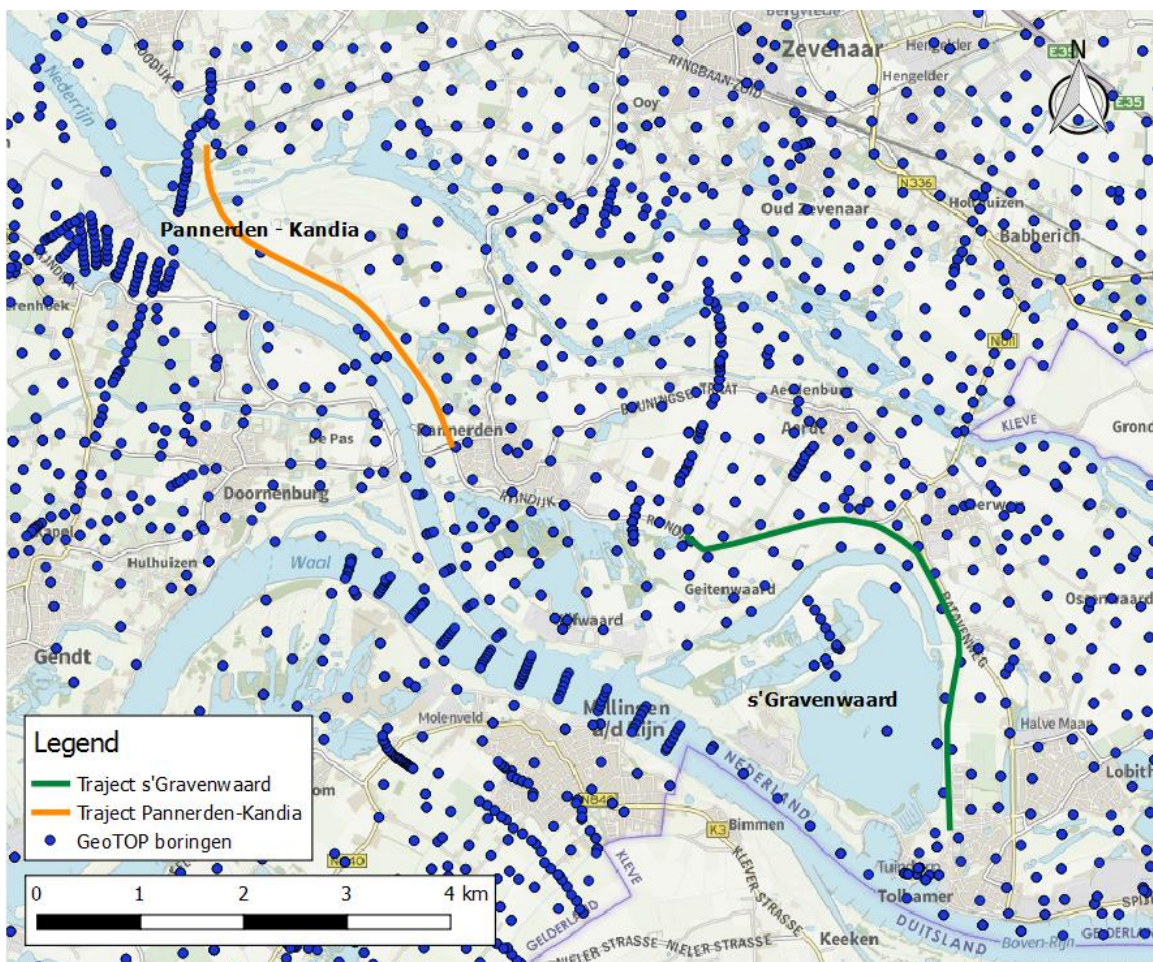
Figuur 3: Lengtedoorsnede over het dijklichaam bij 's Gravenwaard

Op het traject Pannerden-Kandia beschrijft REGISII de bodem startend met een holocene complexe eenheid. Dit bestaat volgens GeoTOP voornamelijk uit een kleiige afzetting. Onder deze deklaag bevindt zich de zandige formatie van Kreftenheye. In het noorden van het traject liggen onder deze formatie opeenvolgend de zandige formaties van Drenthe en Peize en Waalre. In GeoTOP wordt binnen deze formaties ook grind gevonden. Dit wordt gevolgd door de vlakdekkende kleiige formatie van Oosterhout. In het zuiden beschrijft REGISII een dikke kleiige formatie van Kreftenheye. Ook GeoTOP toont deze kleiige afzetting, maar geeft een dunne kleilaag weer. Dit wordt gevolgd door de zandige formatie van Peize en Waalre. Dit is over het gehele traject Pannerden-Kandia de kleiige formatie van Oosterhout.

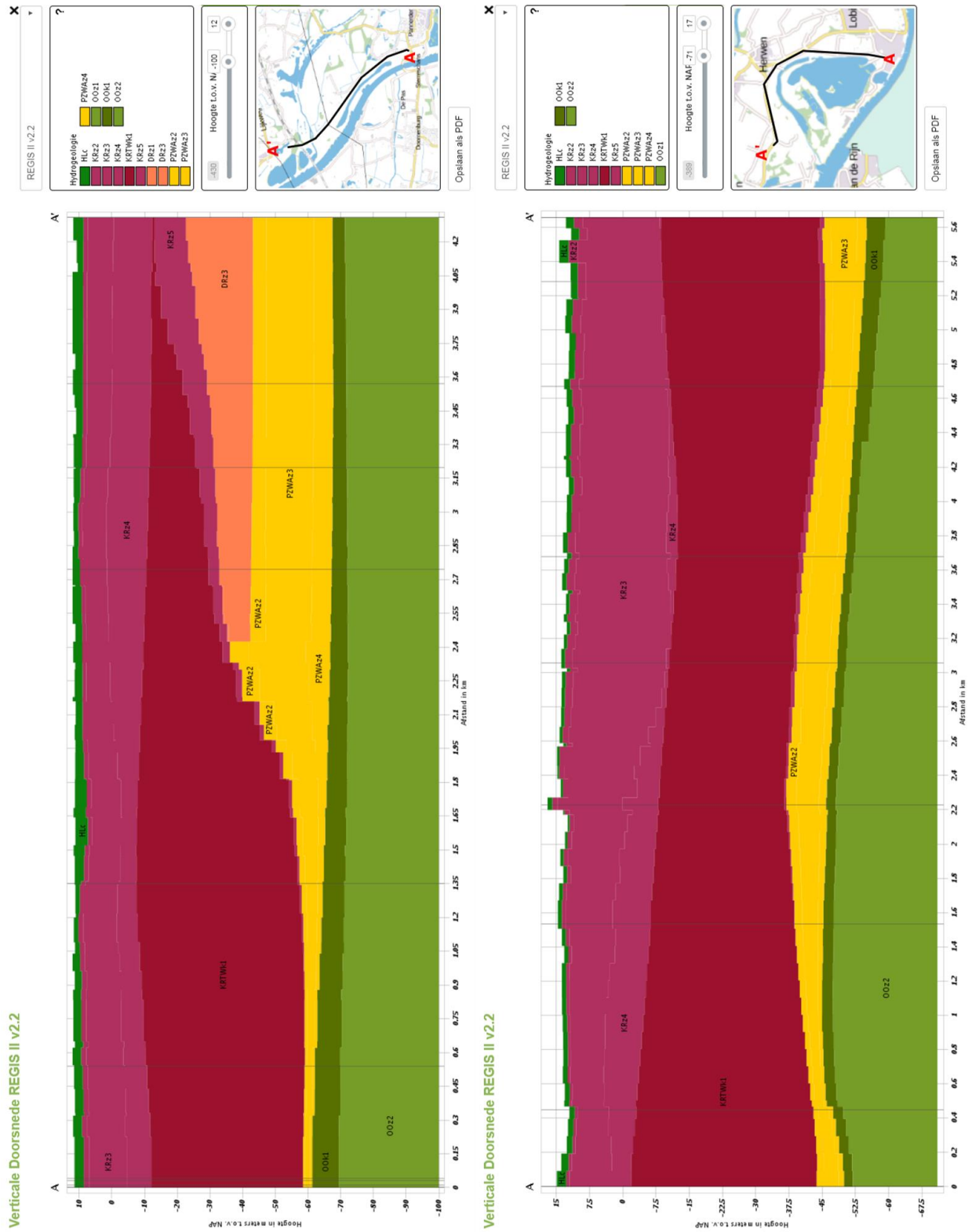
Het traject 's Gravenwaard bevat wederom een holocene complexe afzetting als deklaag. GeoTOP beschrijft deze als een kleilaag. Daaronder bevindt zich een zandige en enige grindige afzettingen. Deze vallen onder de Formatie van Kreftenheye. Onder de zandige afzettingen wordt de kleiige afzetting van de formatie van Kreftenheye teruggevonden. Deze valt terug te zien in GeoTOP, maar

over een minder grote dikte. De zandige en kleiige formaties van Kreftenheye worden gevolgd door de zandige formatie van Peize en Waalre en de vlakdekkende kleiige formatie van Oosterhout. GeoTOP geeft een fijn zand voor de formatie van Peize en Waalre.

Het is van belang om rekening te houden met de schaal waarop GeoTOP werkt. Er wordt gebruik gemaakt van een grid met cellen van 100 bij 100 bij 0,5 meter. Door deze grid grootte is de dijk niet altijd zichtbaar in de GeoTOP doorsnedes, aangezien gebruik gemaakt wordt van een gemiddeld maaiveld in de grid cel. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van interpolatiemethodes om in elke cel een waarde toe te kennen en is de betrouwbaarheid afhankelijk van de hoeveelheid boringen langs het traject. In Figuur 4 zijn de boringen gegeven die hebben bijgedragen tot het in kaart brengen van de ondergrond. Er kan direct opgemerkt worden dat voor het traject Pannerden-Kandia ter hoogte van het midden een beperkt aantal boringen aanwezig is. Door de eigenschappen van de GeoTOP is het belangrijk om met lokaal grondonderzoek inzichten te krijgen in de bodemopbouw op kleine schaal in en rondom de dijk. In het Hoofdstuk 4 van het rapport wordt verder ingegaan op de detaillering en specificering van de ondergrondopbouw.



Figuur 4: Overzicht GeoTOP boringen rond beide trajecten



Figuur 5: REGISII langsdoorsnedes; Pannerden-Kandia (links) en 's Gravenwaard (rechts)

3.3 Karakteriseren geohydrologisch systeem

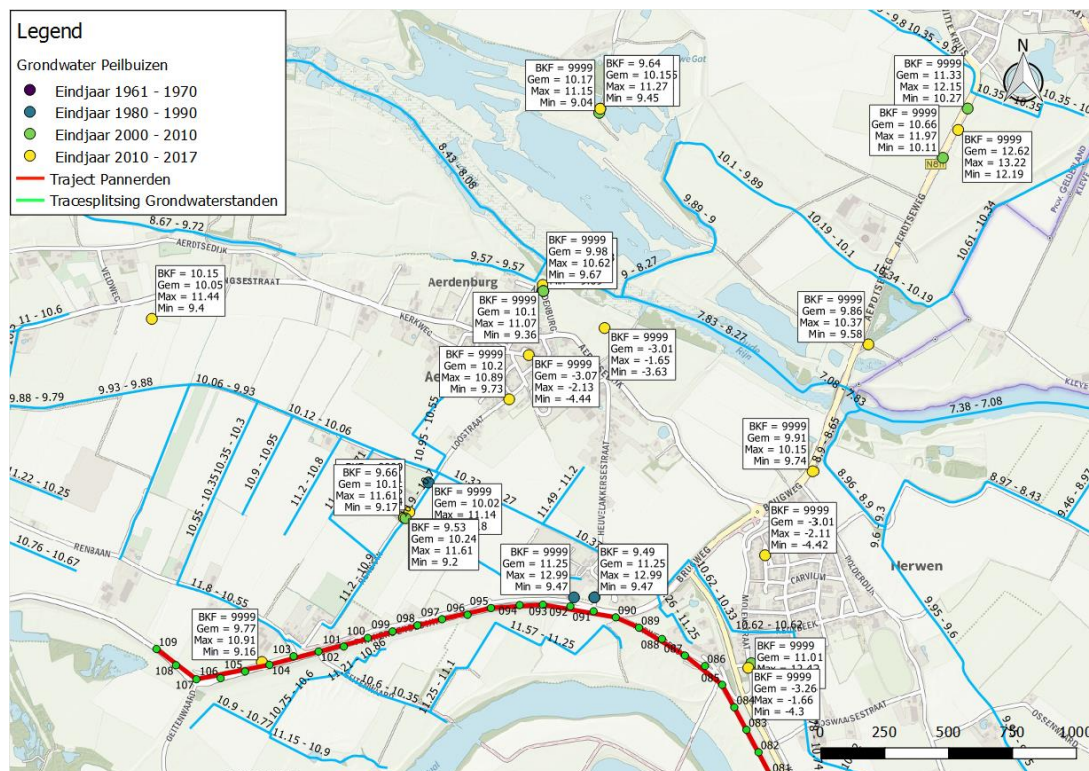
Het gebied rondom het Pannerdensch en Bijlandsch kanaal is vrij afwaterend. Dit betekent dat er geen peilvakken aanwezig zijn in het achterland rondom de trajecten. In de berekeningen zal voor het achterland de maaiveldhoogte als potentiaal ten plaatse van het uitredepunt aangehouden worden. (1)

Ten behoeve van de grondwaterstanden zijn twee bronnen geraadpleegd. TNO [3] en Waterschap Rijn en IJssel [6] bevatten beiden gegevens van peilbuizen met grondwaterstanden. Voor veel peilbuizen ontbreekt een filterstelling. In Figuur 9, Figuur 6 en Figuur 7 is de grondwaterdata voor de trajecten gegeven. Een 9999 aanduiding bij de filterstelling doelt op het ontbreken van deze data. Waterschap Rijn en IJssel [6] bevat ook data van de watergangen langs de trajecten. Deze zijn gegeven in Figuur 10 en Figuur 8.

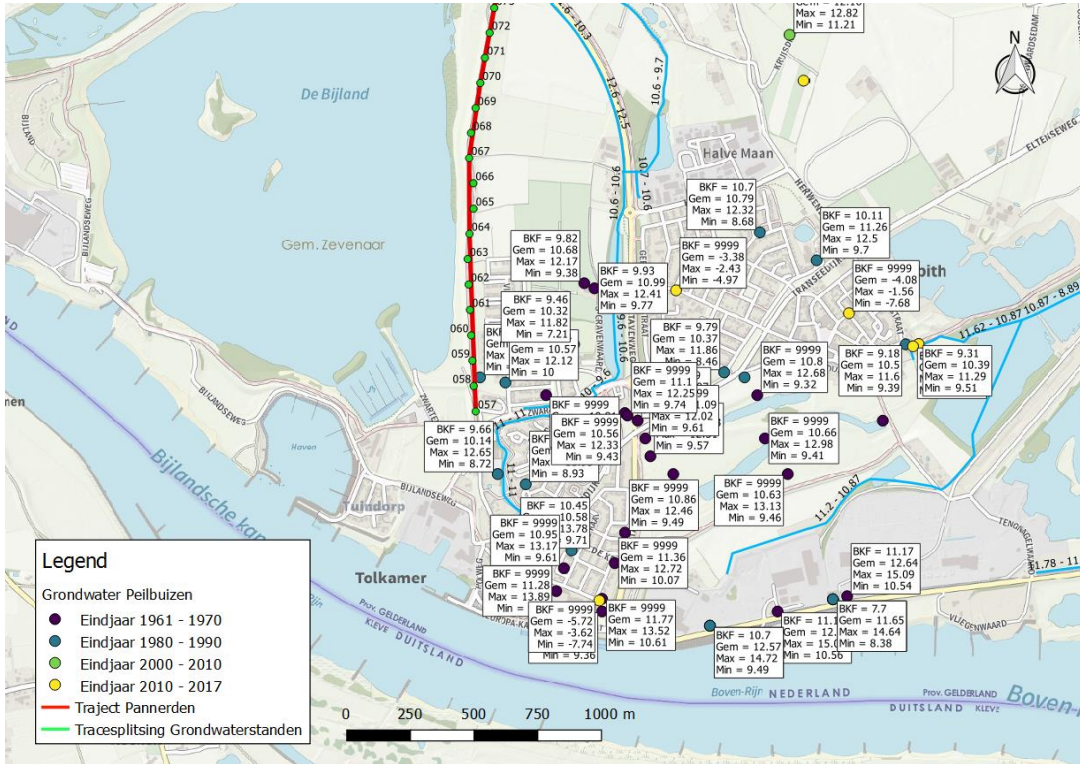
's Gravenwaard

Grondwatergegevens voor het traject 's Gravenwaard zijn gegeven in Figuur 6 en Figuur 7. Er zijn uitgebreid metingen uitgevoerd in Tolkamer. Hier worden nabij het dijktraject stijghoogtes van circa NAP 9,5 meter gevonden. In het noorden zijn het achterland grondwaterstandsmetingen aanwezig. Nabij het dijktraject wordt een freatische grondwaterstand gemeten van NAP 9,0 à 9,5 meter. Naarmate verder richting dijkpaal 100 verplaatst wordt daalt de stijghoogte in het freatisch grondwater richting de NAP 9,0 meter.

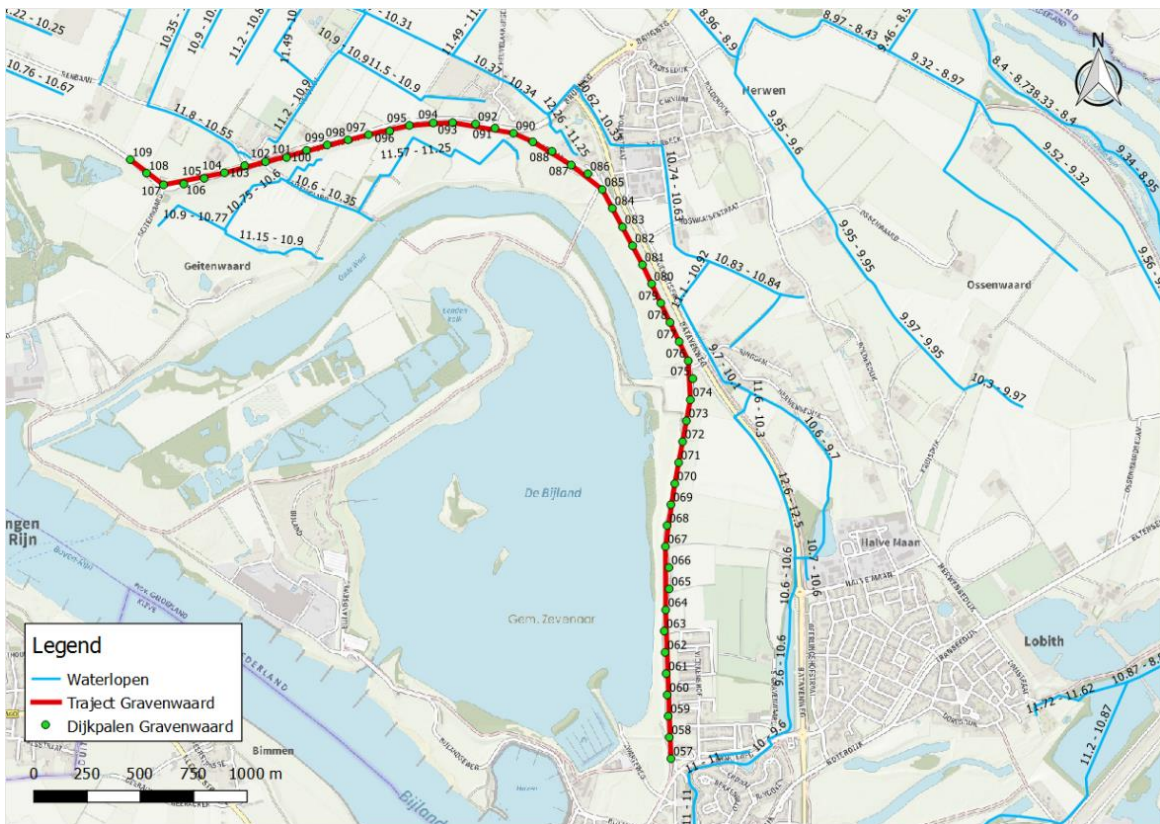
In tegenstelling tot bij het traject Pannerden-Kandia is er een grote hoeveelheid waterlopen aanwezig in zowel voorland als achterland. Dit is gepresenteerd in Figuur 8. Van dijkpaal 80 tot 109 liggen de waterlopen nabij het dijktraject in zowel voor- als achterland. Rond Tolkamer ligt de waterloop op ruime afstand in het achterland. De waterlopen verplaatsen het oppervlakte water richting het Westen.



Figuur 6: Grondwaterstand data noordelijk deeltraject 's Gravenwaard



Figuur 7: Grondwaterstand data zuidelijk van traject 's Gravenwaard

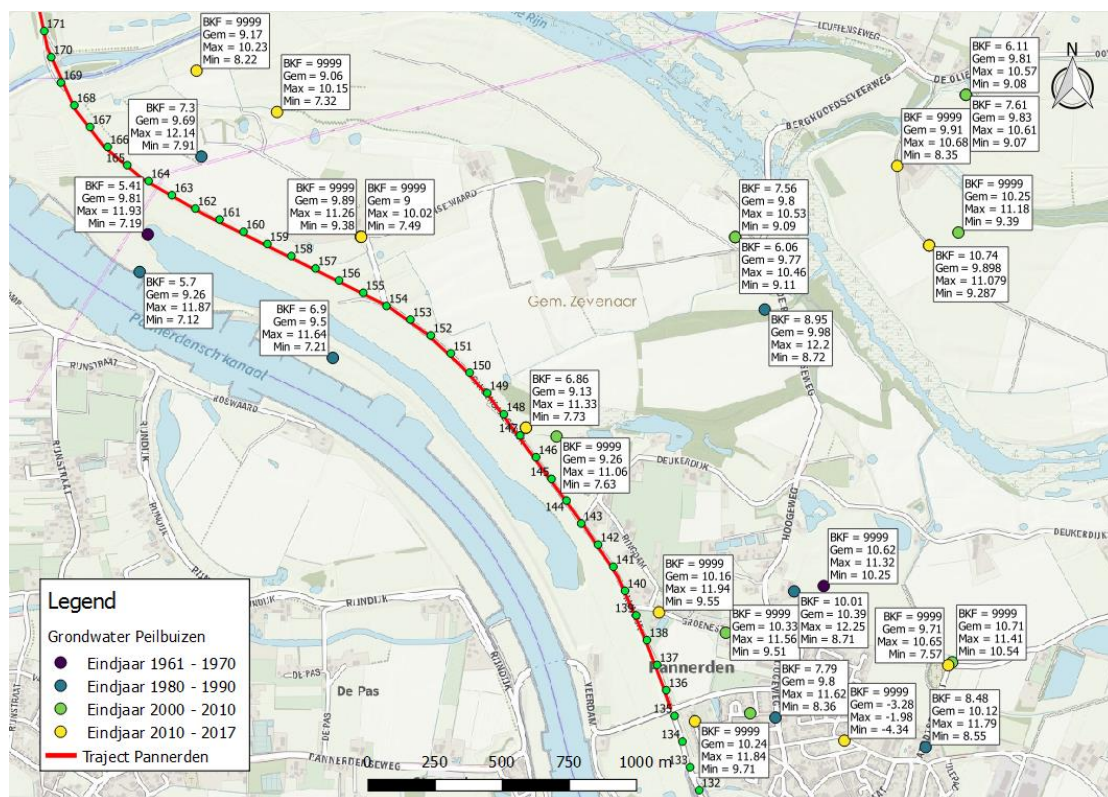


Figuur 8: Waterlopen traject 's Gravenwaard

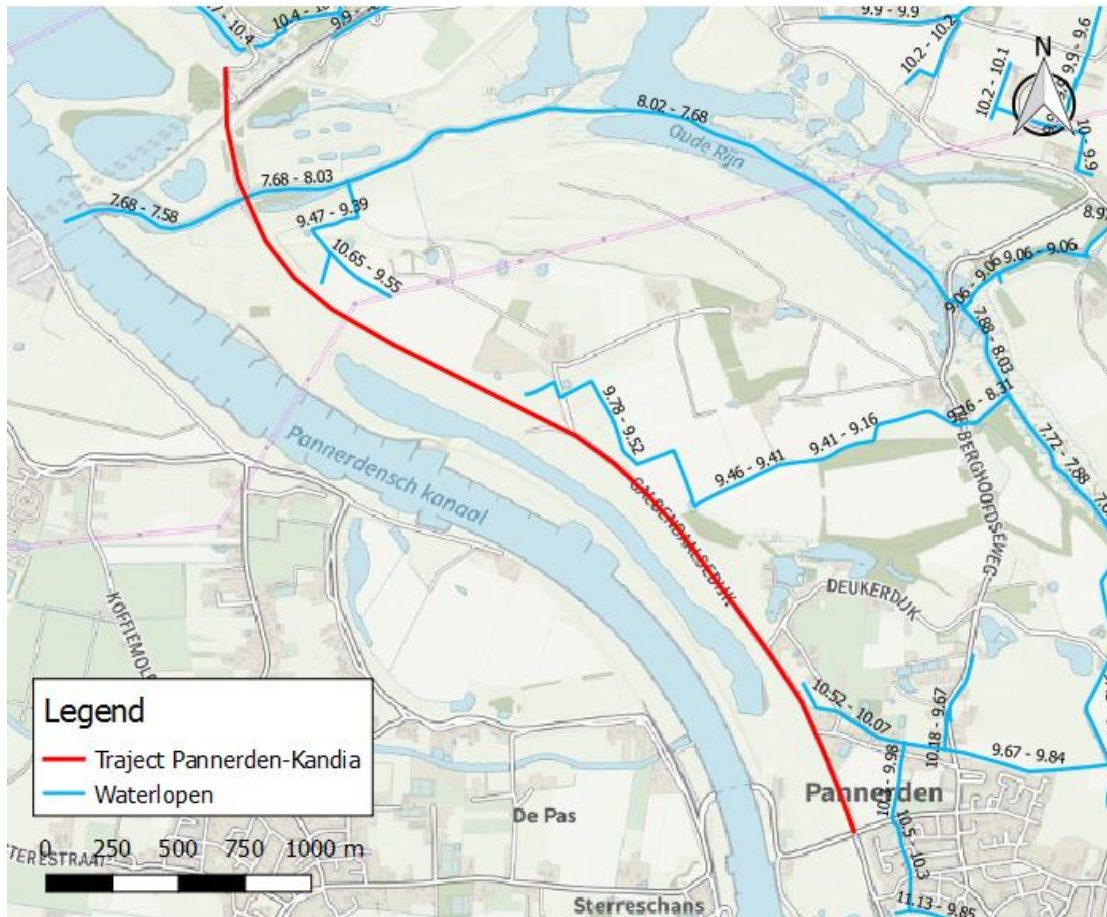
Pannerden-Kandia

In Figuur 9 wordt de beschikbare grondwaterdata voor het traject Pannerden-Kandia weergegeven. Er zijn groepen grondwaterpeilbuizen langs het traject, in het voorland en vooral in Pannerden te vinden. Deze peilbuizen zijn voornamelijk freatisch en geven in de verschillende gebieden vergelijkbare stijghoogten. In Pannerden wordt een stijghoogte van circa NAP 11,5 á 12,0 meter gevonden. Ten noorden van Pannerden en in het achterland liggen deze stijghoogtes een meter lager. Rond dijkspaal 164 worden binnendijks stijghoogten van circa NAP 10,0 á 10,5 meter gevonden. Buitendijks liggen deze stijghoogten tussen de NAP 11,5 en 12,0 meter.

Achter een beperkt aantal kilometers van het dijktraject ligt een waterloop op een enigszins korte afstand. Figuur 10 presenteert de aanwezige waterlopen. Dit betreffen veelal kleine waterlopen. Waterlopen zijn te vinden bij het snijden van de Oude Rijn met het dijktraject, in het midden van het traject en ter hoogte van Pannerden. De bodemdieptes geven een verloop van afvoer richting de Oude Rijn weer.



Figuur 9: Grondwaterdata traject Pannerden-Kandia



Figuur 10: Waterlopen traject Pannerden-Kandia

4 Parameters

4.1 Hoogte maaiveld

Met betrekking tot de hoogte van het maaiveld zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Actueel Hoogtebestand Nederland
- Hoogtegegevens Waterschap Rijn en IJssel (gegevens uit het Actueel Hoogtebestand Nederland aangevuld met gegevens uit lokale hoogtemetingen)
- Satellietbeelden en luchtfoto's

De hoogtegegevens van het Waterschap Rijn en IJssel zijn ingeladen in een Geografisch Informatie Systeem (GIS). Voor zowel het traject 's Gravenwaard als het traject Pannerden-Kandia zijn vervolgens dwarsprofielen gegenereerd met een interval tussen de dwarsprofielen van 20 m en een interval tussen de punten in het dwarsprofiel van 0.5 m. De hoogte van het maaiveld in het achterland is berekend als de gemiddelde waarde van de hoogte van het maaiveld op 20-200 m binnendijs, gecorrigeerd voor de aanwezigheid van antropogene ophogingen (baanlichamen).

's Gravenwaard

De hoogte van het maaiveld op basis van Actueel Hoogtebestand Nederland is gegeven in Figuur 12. De 's Gravenwaardsedijk en de Pannerdensedijk hebben verschillende op- en afritten. Tussen dp 75 en dp 86 bevindt het baanlichaam van de Batavenweg (N811) zich dicht bij het dijklichaam. De hoogte van het maaiveld op basis van de hoogtegegevens Waterschap Rijn en IJssel is gegeven in Figuur 13. In het achterland ligt het maaiveld globaal tussen NAP +12.0 m en NAP +14.9 m.

Pannerden-Kandia

De hoogte van het maaiveld op basis van Actueel Hoogtebestand Nederland is gegeven in Figuur 15. De Rijndijk, de Pannerdense Waard en de Kandiadijk hebben verschillende op- en afritten. Met name de aansluitende baanlichamen van de Deukerdijk, de Rijnstrangenweg zijn hooggelegen. De leikade aan de oever van het Pannerdensch Kanaal is duidelijk zichtbaar, evenals de diepe toerit van de Tunnel Pannerdensch Kanaal nabij Kandia. De hoogte van het maaiveld op basis van de hoogtegegevens Waterschap Rijn en IJssel is gegeven in Figuur 16. In het achterland ligt het maaiveld globaal tussen NAP +10.1 m en NAP +12.5 m.

4.2 Onderkant deklaag

Met betrekking tot de onderkant van de deklaag zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Stochastische Ondergrond Schematisatie (SOS)
- Geotechnisch onderzoek
- Geofysisch onderzoek
- Detaillering bovenste lagen met GeoTOP
- Zandbanenkaart

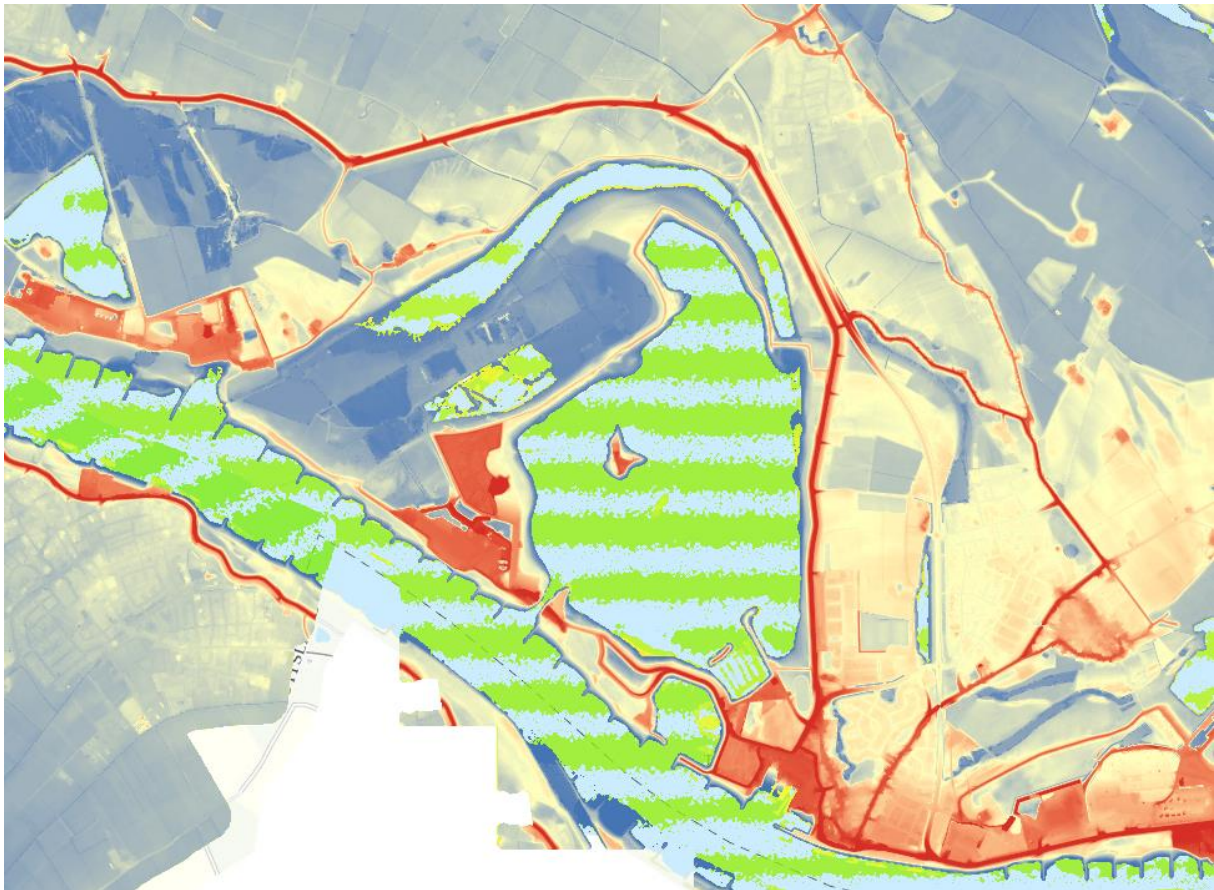
's Gravenwaard

De onderkant van de deklaag op basis van de boringen en sonderingen is gegeven in Figuur 17. Voor het traject 's Gravenwaard varieert de onderkant van de deklaag in het achterland globaal tussen NAP +7.4 m en NAP +14.6 m.

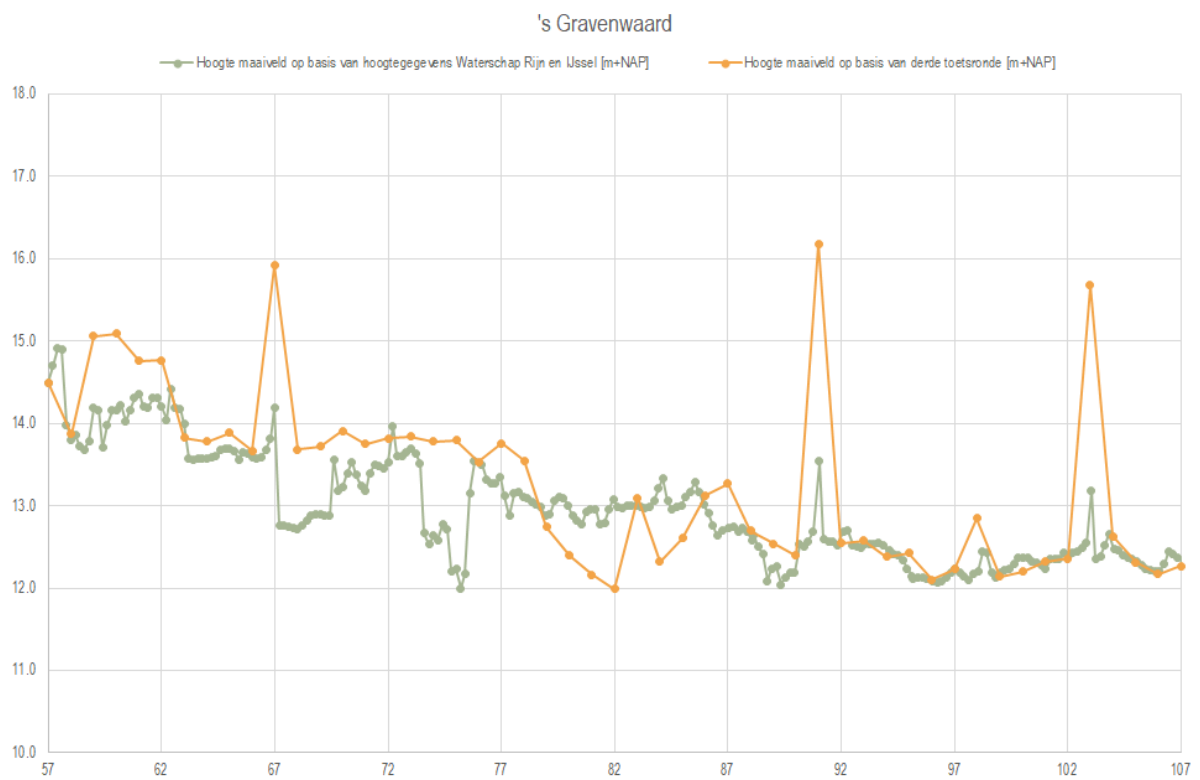
De bodemopbouw op basis van de SOS segmenten is gegeven in Figuur 23. Voor het traject 's Gravenwaard is het SOS segment 48011 van toepassing. Volgens scenario 48011_1D1 ligt de onderkant van de deklaag gemiddeld op NAP +11 m (maximaal: NAP +12 m; minimaal: NAP +10.5 m). Volgens scenario 48011_1D2 ligt de onderkant van de deklaag gemiddeld op NAP +9 m (maximaal: NAP +10 m; minimaal: NAP +7 m).



Figuur 11: Overzicht terrein (bron: Google Earth); 's Gravenwaard



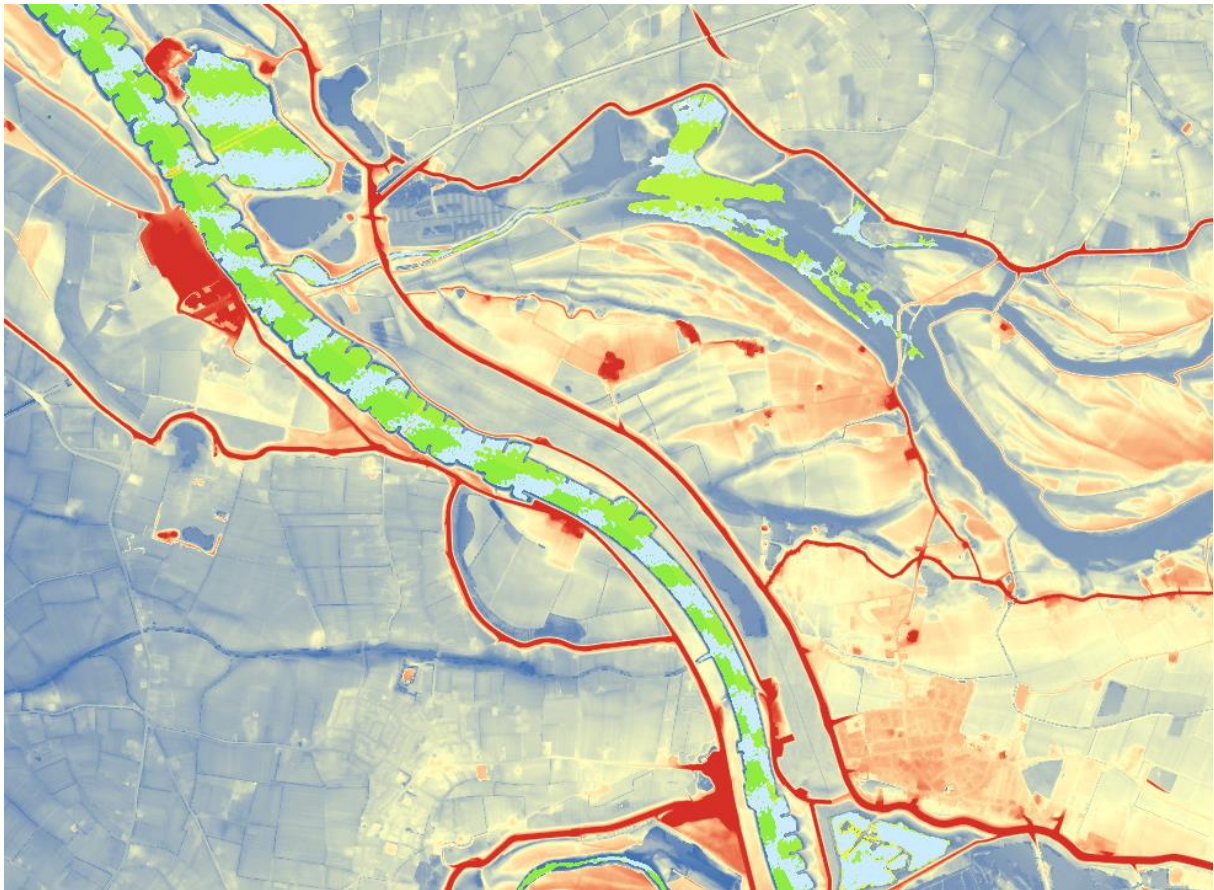
Figuur 12: AHN maaierveld (blauw: laag; rood: hoog); 's Gravenwaard



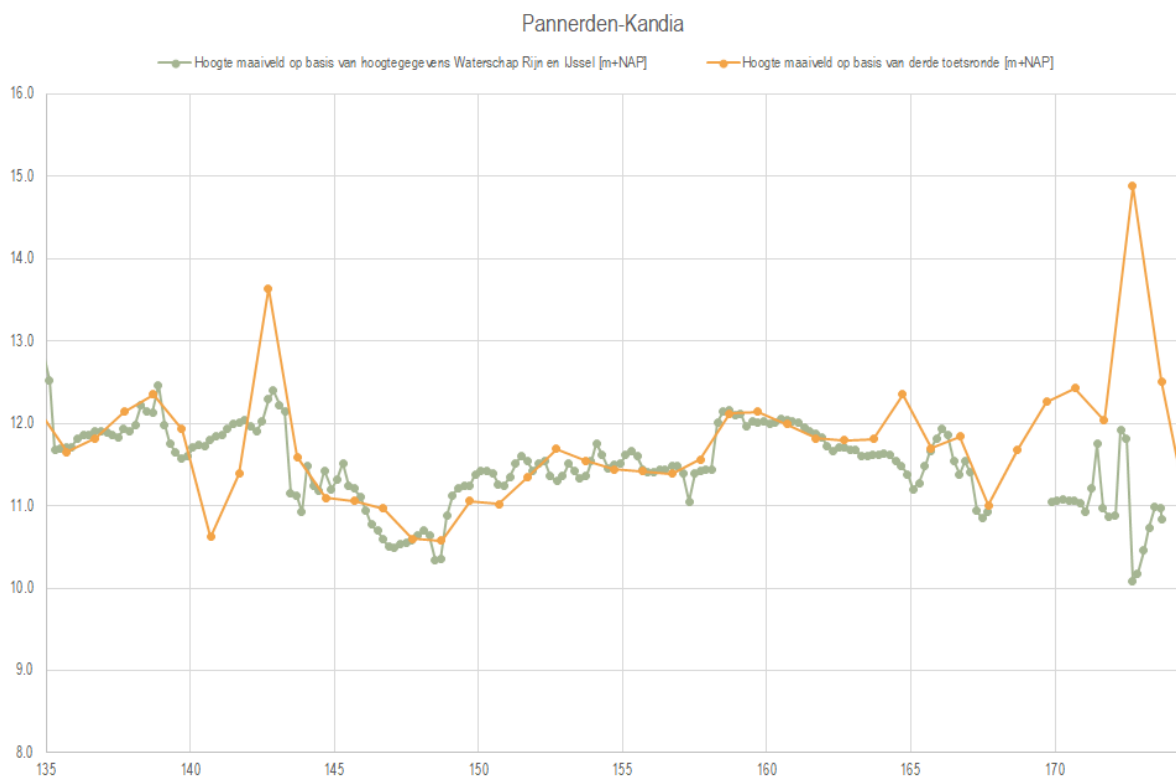
Figuur 13: Hoogte maaierveld op basis van hoogtegegevens Waterschap Rijn en IJssel versus hoogte maaierveld op basis van derde toetsronde; 's Gravenwaard



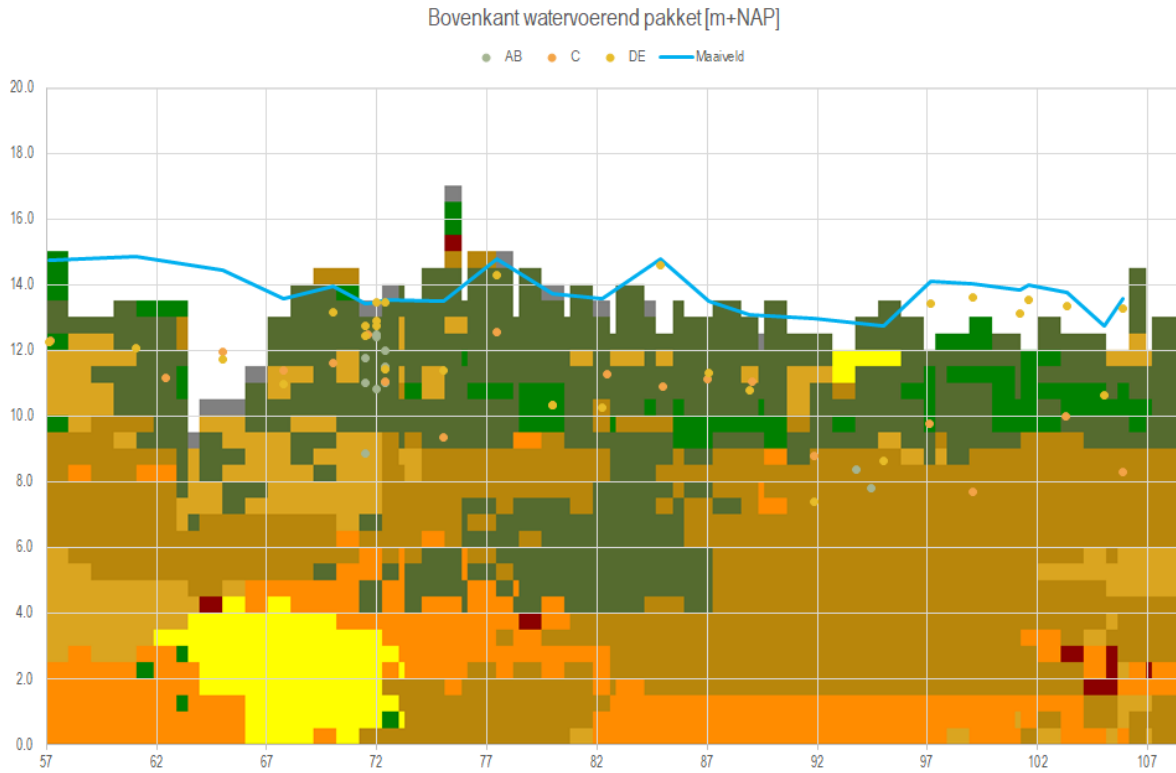
Figuur 14: Overzicht terrein (bron: Google Earth); Pannerden-Kandia



Figuur 15: AHN maaierveld (blauw: laag; rood: hoog); Pannerden-Kandia



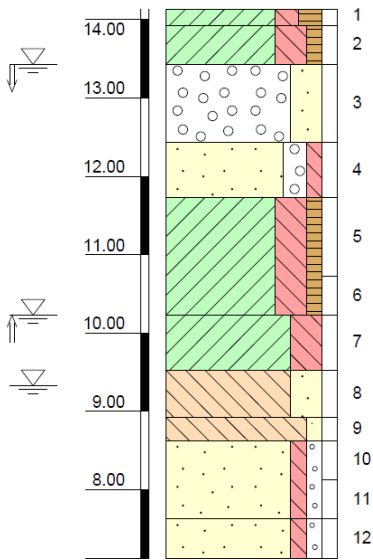
Figuur 16: Hoogte maaierveld op basis van hoogtegegevens Waterschap Rijn en IJssel versus hoogte maaierveld op basis van derde toetsronde; Pannerden-Kandia



Figuur 17: Bovenkant watervoerend pakket op basis van boringen en sonderingen versus bodemopbouw op basis van GeoTOP; 's Gravenwaard

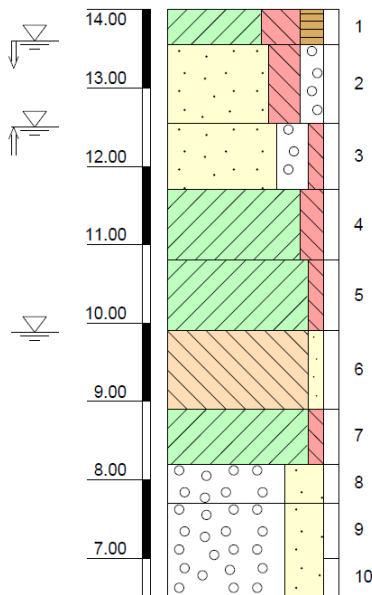
Boring: B_48_097+015_D

Referentie (m tov NAP)



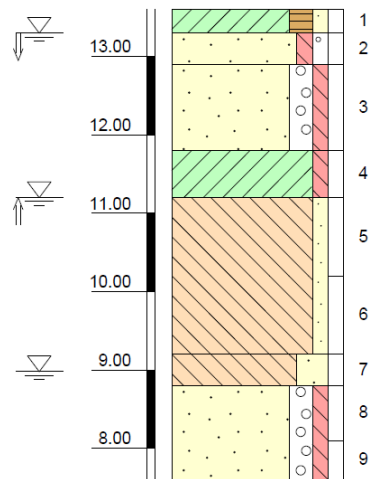
Boring: B_48_101+060_D

Referentie (m tov NAP)



Boring: B_48_105+085_D

Referentie (m tov NAP)

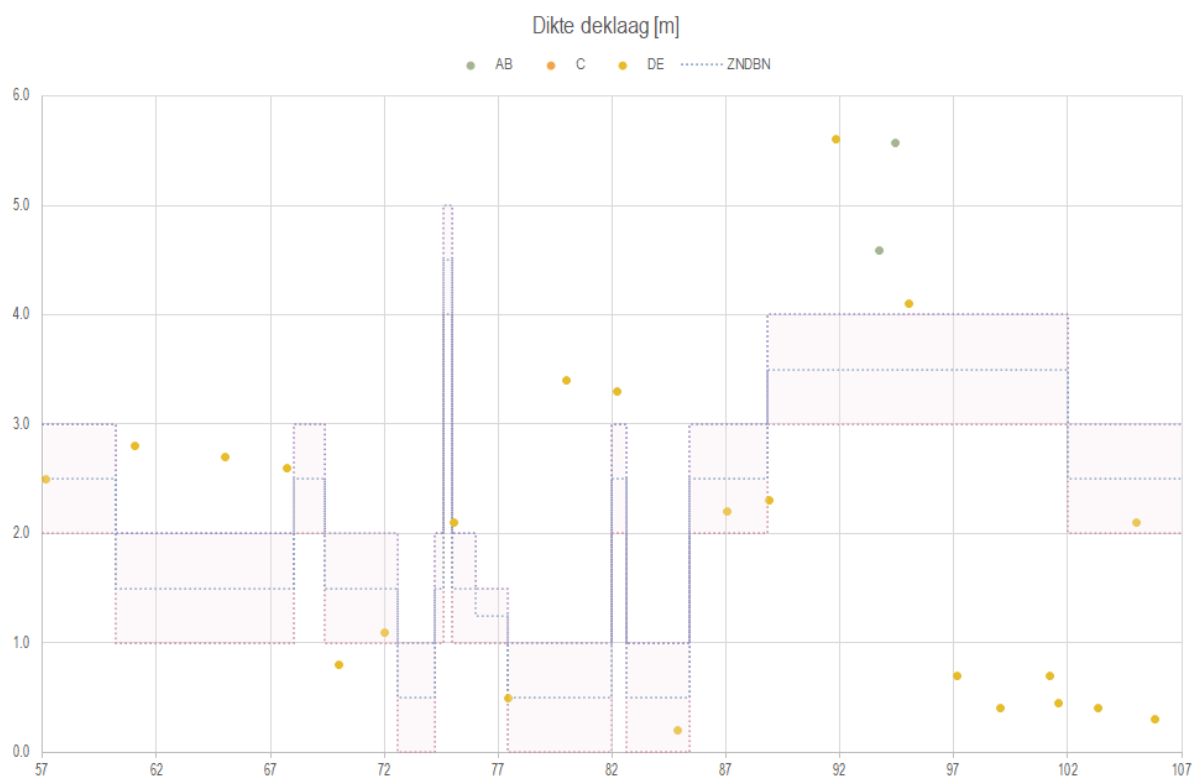


Figuur 18: Boorstaten boringen B_48_097+015_D, B_48_101+060_D en B_48_105+085_D

De bodemopbouw ter plaatse van de waterkering op basis van GeoTOP is gegeven in Figuur 24. Een vergelijking tussen de onderkant van de deklaag op basis van de boringen en sonderingen en de onderkant van de deklaag op basis van GeoTOP is gegeven in Figuur 17.

De zanddiepte op basis van de zandbanenkaart is gegeven in Figuur 25. Voor het traject 's Gravenwaard varieert de zanddiepte in het achterland tussen 0 m en 5 m. Ter plaatse van dp 75 kruist de waterkering een voormalige uitloper van de Oude Waal (later de Lobitsche Scheidingsgraaf). Volgens de zandbanenkaart bedraagt de zanddiepte plaatselijk 4.0-5.0 m.

Een vergelijking tussen de dikte van de deklaag op basis van de boringen en sonderingen en de dikte van de deklaag op basis van de zandbanenkaart is gegeven in Figuur 19. In het algemeen is de overeenkomst redelijk. Echter, ten westen van dp 97 is (grindig) zand aangetroffen binnen 1 m beneden maaiveld. Op basis de beschikbare boringen en sonderingen kan niet worden uitgesloten dat de betrokken tussenzandlaag pipinggevoelig is (Figuur 18).



Figuur 19: Dikte deklaag op basis van boringen en sonderingen (AB: voorland; DE: achterland) versus dikte deklaag op basis van zandbanenkaart; 's Gravenwaard

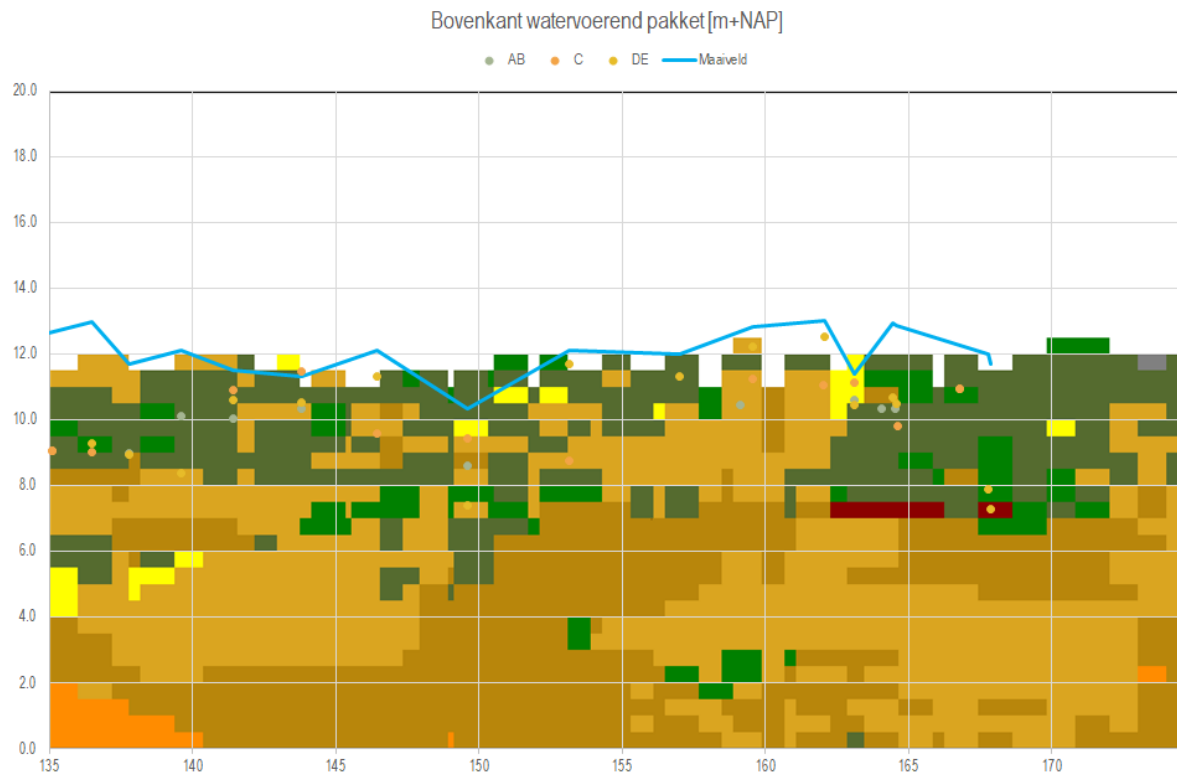
Pannerden-Kandia

De onderkant van de deklaag op basis van de boringen en sonderingen is gegeven in Figuur 20. Voor het traject Pannerden-Kandia varieert de onderkant van de deklaag in het achterland globaal tussen NAP +7.3 m en NAP +12.5 m.

De bodemopbouw op basis van de SOS segmenten is gegeven in Figuur 23. Voor het traject Pannerden-Kandia zijn de SOS segment 48008, 48009 en 48010 van toepassing. Volgens scenario's 48008_1D1, 48008_1D4, 48009_1D1, 48009_1D3 en 48010_1D1 ligt de onderkant van de deklaag gemiddeld op NAP +9 m (maximaal: NAP +10 m; minimaal: NAP +8 m). Volgens scenario's 48008_1D3, 48008_1D6, 48009_1D2, 48009_1D4 en 48010_1D3 ligt de onderkant van de deklaag

gemiddeld op NAP +6.5 m (maximaal: NAP +7.5 m; minimaal: NAP +5.5 m). Volgens scenario 48010_1D2 ligt de onderkant van de deklaag gemiddeld op NAP +11.5 m (maximaal: NAP +11.5 m; minimaal NAP +11.5 m).¹

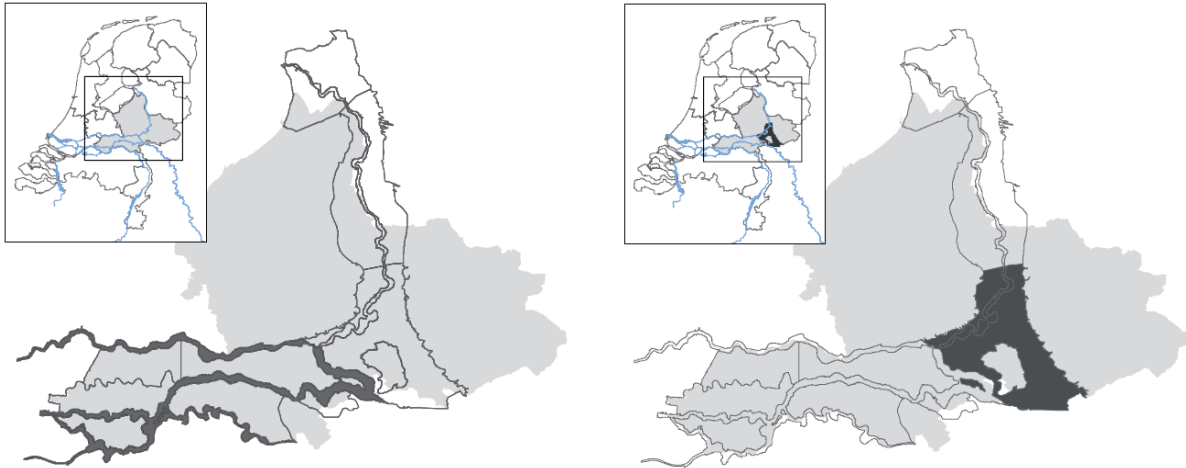
De bodemopbouw ter plaatse van de waterkering op basis van GeoTOP is gegeven in Figuur 26. Een vergelijking tussen de onderkant van de deklaag op basis van de boringen en sonderingen en de onderkant van de deklaag op basis van GeoTOP is gegeven in Figuur 20.



Figuur 20: Bovenkant watervoerend pakket op basis van boringen en sonderingen versus bodemopbouw op basis van GeoTOP; Pannerden-Kandia

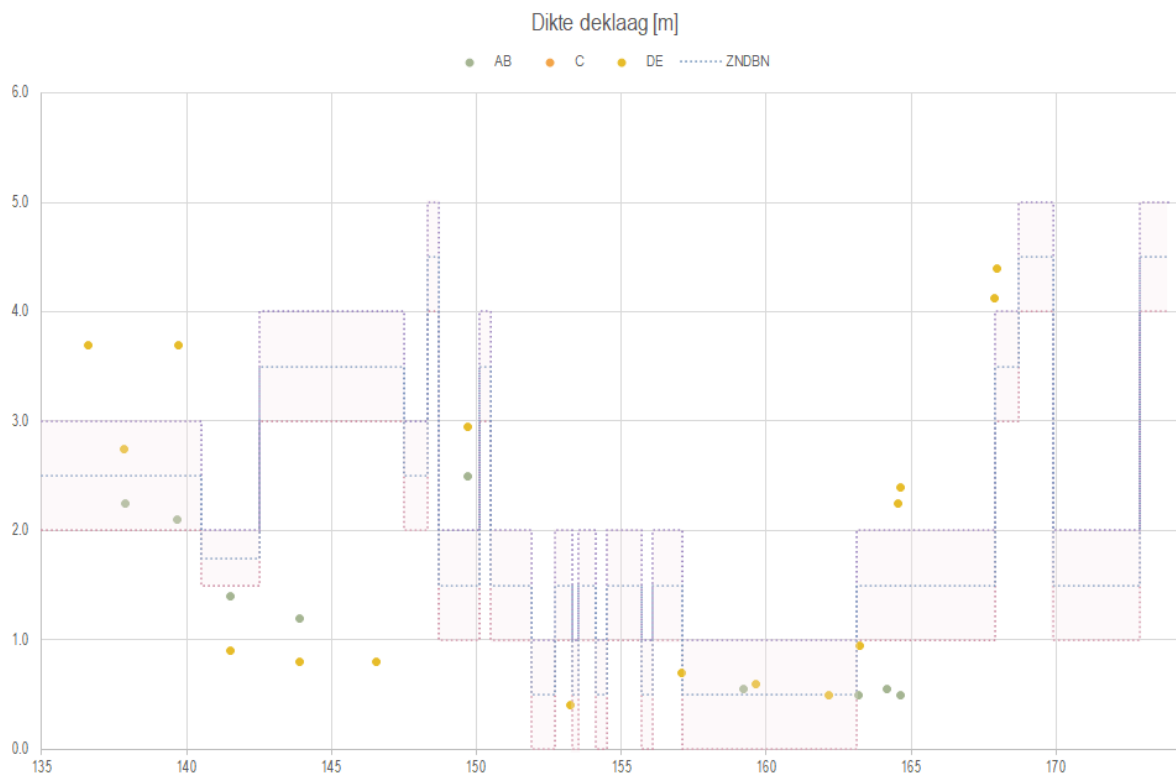
De zanddiepte op basis van de zandbanenkaart is gegeven in Figuur 27. Voor het traject Pannerden-Kandia varieert de zanddiepte in het achterland tussen 0 m en 5 m. Op het deeltraject tussen globaal dp 140 en dp 174 kruist de waterkering het Rijnstrangengebied (Figuur 21), dat met de aanleg van het Pannerdensch Kanaal in 1707 een overlaatgebied werd, afgesneden van de hoofdloop omwille van een verbeterde en controleerbare afvoerverdeling van Rijnwater over de Waal, de Nederrijn en de IJssel. De uiterwaarden in het Rijnstrangengebied bestaan uit een afwisseling van ruggen en geulen die kenmerkend is voor kronkelwaarden. De zanddiepte in de kronkelwaarden is gemiddeld 1-2 m. De zanddiepte in de Liemers (Figuur 21) is doorgaans gering. In het grootste deel van het gebied worden pleistocene rivierafzettingen van vlechtende rivieren (grof, zeer doorlatend materiaal) aangetroffen op een diepte van 1-2 m beneden maaiveld. In het westen en noordwesten van het gebied (en ten zuiden van dp 140) bedraagt de zanddiepte 2-3 m [9].

¹ Volgens scenario's 48008_1D2 en 48008_1D3 is een matig doorlatende kleiige zandlaag aanwezig boven een dunne kleiige veenlaag rond NAP +6 m. Deze slecht doorlatende grondlaag is evenwel niet zichtbaar in de bodemopbouw op basis van GeoTOP.

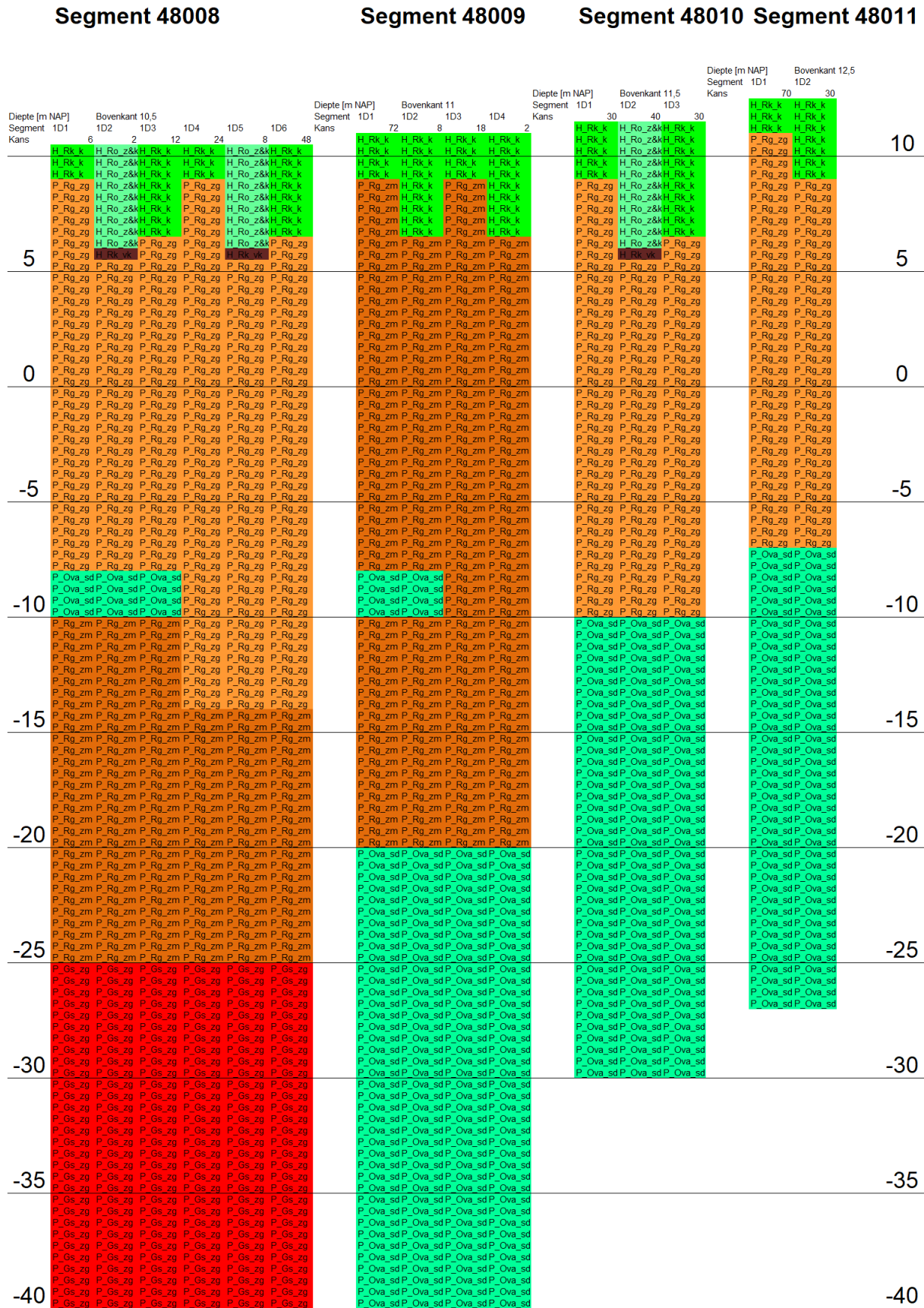


Figuur 21: Boven-Rijn, Pannerdensch Kanaal en Rijnstrangengebied (links) en Liemers, Oude IJssel en Gelderse IJssel ten zuiden van Zutphen (rechts) [9]

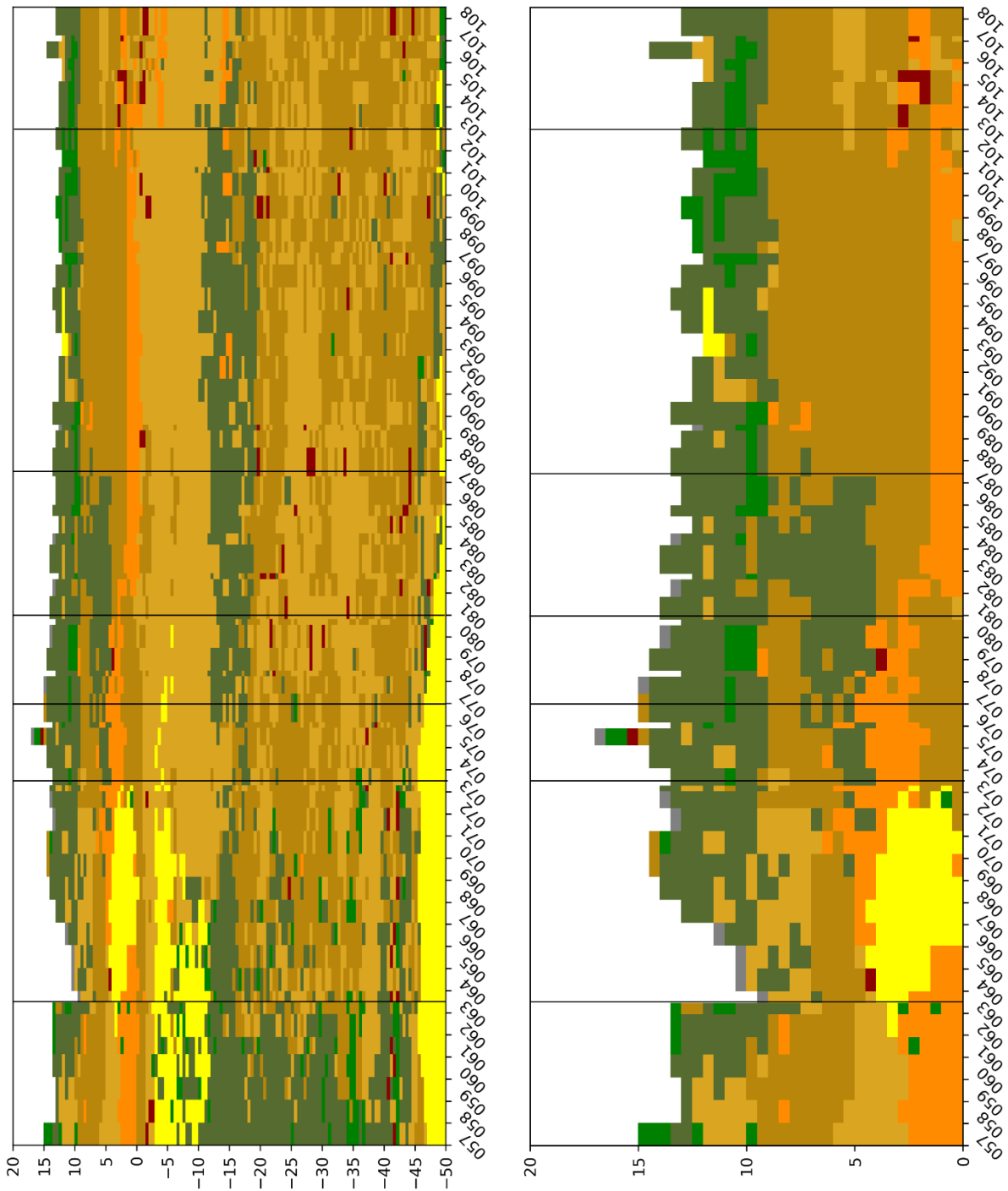
Een vergelijking tussen de dikte van de deklaag op basis van de boringen en sonderingen en de dikte van de deklaag op basis van de zandbanenkaart is gegeven in Figuur 22. In het algemeen is de overeenkomst redelijk. Echter, met name tussen dp 143 en dp 148 wordt een beduidend dunnere deklaag aangetroffen.



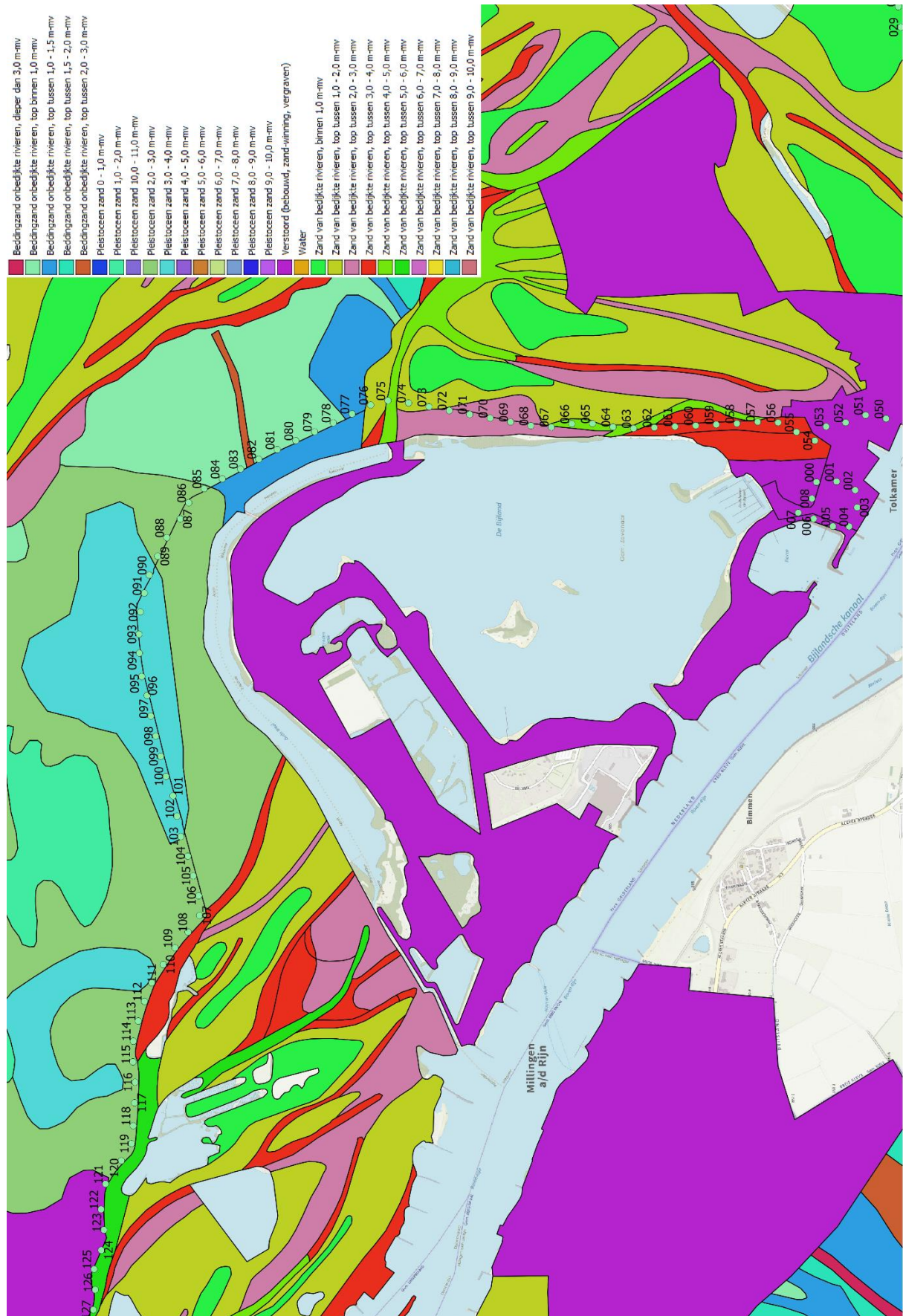
Figuur 22: Dikte deklaag op basis van boringen en sonderingen (AB: voorland; DE: achterland) versus dikte deklaag op basis van zandbanenkaart; Pannerden-Kandia



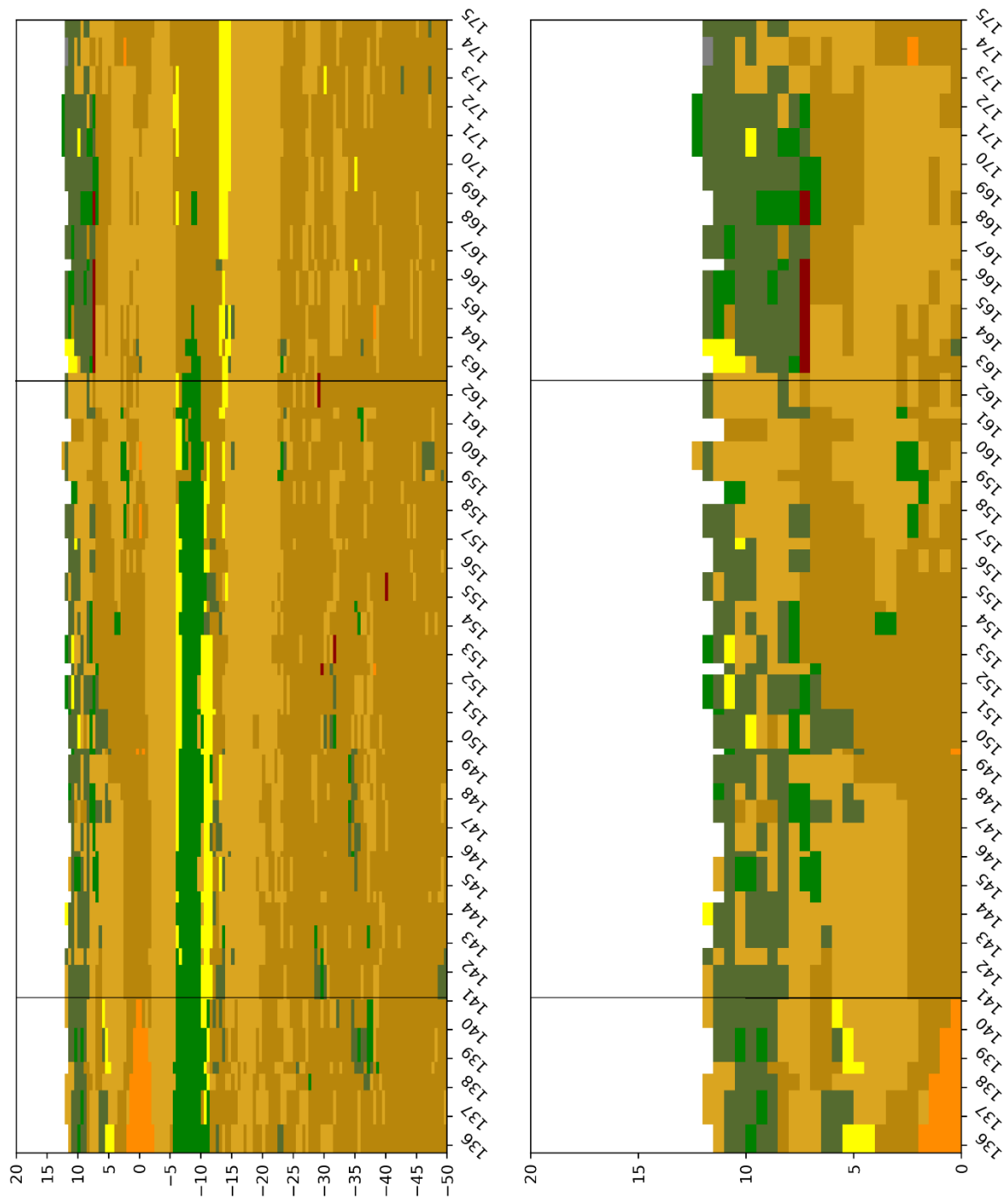
Figuur 23: Bodemopbouw op basis van SOS segmenten



Figuur 24: Bodemopbouw ter plaatse van waterkering op basis van GeoTOP (paars: organisch materiaal; groen: klei; donkergroen: kleilig zand; geel: zand fijn; bruin: zand midden; donkerbruin: zand grof; oranje: grind); 's Gravenwaard



Figuur 25: Zanddiepte op basis van zandbanenkaart; 's Gravenwaard



Figuur 26: Bodemopbouw ter plaatse van waterkering op basis van GeoTOP (paars: organisch materiaal; groen: klei; donkergroen: kleilig zand; geel: zand fijn; bruin: zand midden; donkerbruin: zand grof; oranje: grind); Pannerden-Kandia



Figuur 27: Zanddiepte op basis van zandbanekaart; Pannerden-Kandia

4.3 Buitenwaterstand

Met betrekking tot de buitenwaterstand zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Toetspeil Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR 2006)
- Ondergrens- en signaleringswaarden

In het bovenrivierengebied houden de hoge waterstanden relatief lang aan. In het algemeen treedt één langdurig hoogwater op. De hele hoogwatergolf kan ongeveer twee weken duren. Voor maatgevende omstandigheden in het bovenrivierengebied speelt tijdsafhankelijkheid derhalve nauwelijks een rol, en kan stationair worden gerekend.

In de derde toetsronde zijn de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR 2006) aangehouden. Echter, in deze proeftoetsing wordt voor het niveau van de buitenwaterstand de ondergrenswaarde aangehouden. De ondergrenswaarde - en signaleringswaarden zijn bepaald met Ringtoets. Hierbij zijn de statistische onzekerheden en modelonzekerheden conform WBI 2017 in rekening gebracht.

's Gravenwaard

De ondergrenswaarde is gegeven in Figuur 35. Voor het traject 's Gravenwaard varieert de ondergrenswaarde tussen NAP +17.02 m en NAP +16.90 m.

Pannerden-Kandia

De ondergrenswaarde is gegeven in Figuur 39. Voor het traject Pannerden-Kandia varieert de ondergrenswaarde tussen NAP +16.14 m en NAP +15.31 m.

4.4 Freatisch niveau bij uittredepunt

De binnendijkse waterstand is gelijk aan de hoogte van het maaiveld ter plaatse van het uittredepunt indien geen open water voorkomt. Daar waar open water voorkomt is het freatisch niveau bij het uittredepunt gelijk aan de waterstand tijdens hoogwater in de binnendijkse waterpartij (slootpeil).

De binnendijkse gebieden zijn vrij afwaterend; er zijn geen peilbesluiten van kracht. In deze proeftoetsing wordt (evenals in de derde toetsronde) voor het freatisch niveau bij het uittredepunt in alle gevallen de hoogte van het maaiveld aangehouden. Voor informatie met betrekking tot de hoogte van het maaiveld wordt verwezen naar Sectie 4.1.

4.5 Intredepunt

Met betrekking tot het intredepunt zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Leidingvakken Waterschap Rijn en IJssel
- Basisregistratie Grootchalige Topografie
- Geotechnisch grondonderzoek
- Geofysisch onderzoek²
- Bestekstekeningen en oude rapporten

Bij het inspecteren van de leidingvakken Waterschap Rijn en IJssel is gebleken dat de shapefile niet alle waterlopen in het voor- en achterland bevat. Daarom is ook de Basisregistratie Grootchalige Topografie ingeladen.

Om inzicht te krijgen in de dikte en diepte van de deklaag in het voorland is in januari-maart 2018 geofysisch onderzoek uitgevoerd binnen dijkkringtraject 48-1. Hierbij zijn een grondradarsysteem

² Het betreft de resultaten van het geofysisch onderzoek met gecorrigeerde database, ontvangen van Leo van Nieuwenhuijzen op 19 juni 2018.

(300 MHz antenne), een EM-systeem en een gammaspectrometer ingezet. Het onderzoeksgebied omvat grofweg een strook van ongeveer 50 m langs de buitenteen van de dijk. De zichtdiepte van de grondradar is sterk afhankelijk van de samenstelling van de bodem. De maximale zichtdiepte van de meetsystemen is ongeveer 6.0 m beneden maaiveld. Voor de ijking van de geofysische metingen zijn handboringen uitgevoerd. De resultaten van het geofysisch onderzoek geven aan dat er onder de eerste afdekkende kleilaag meerdere zandlagen voorkomen, soms gescheiden door een kleilaag. De dikte van de eerste afdekkende kleilaag kan ruimtelijk gezien sterk verschillen.

's Gravenwaard

Het voorland wordt begrensd door de insteek van De Bijland en de Oude Waal, en is tussen dp 60 en dp 70 zeer kort van lengte. In het voorland zijn verschillende sloten en greppels aanwezig (Figuur 36).

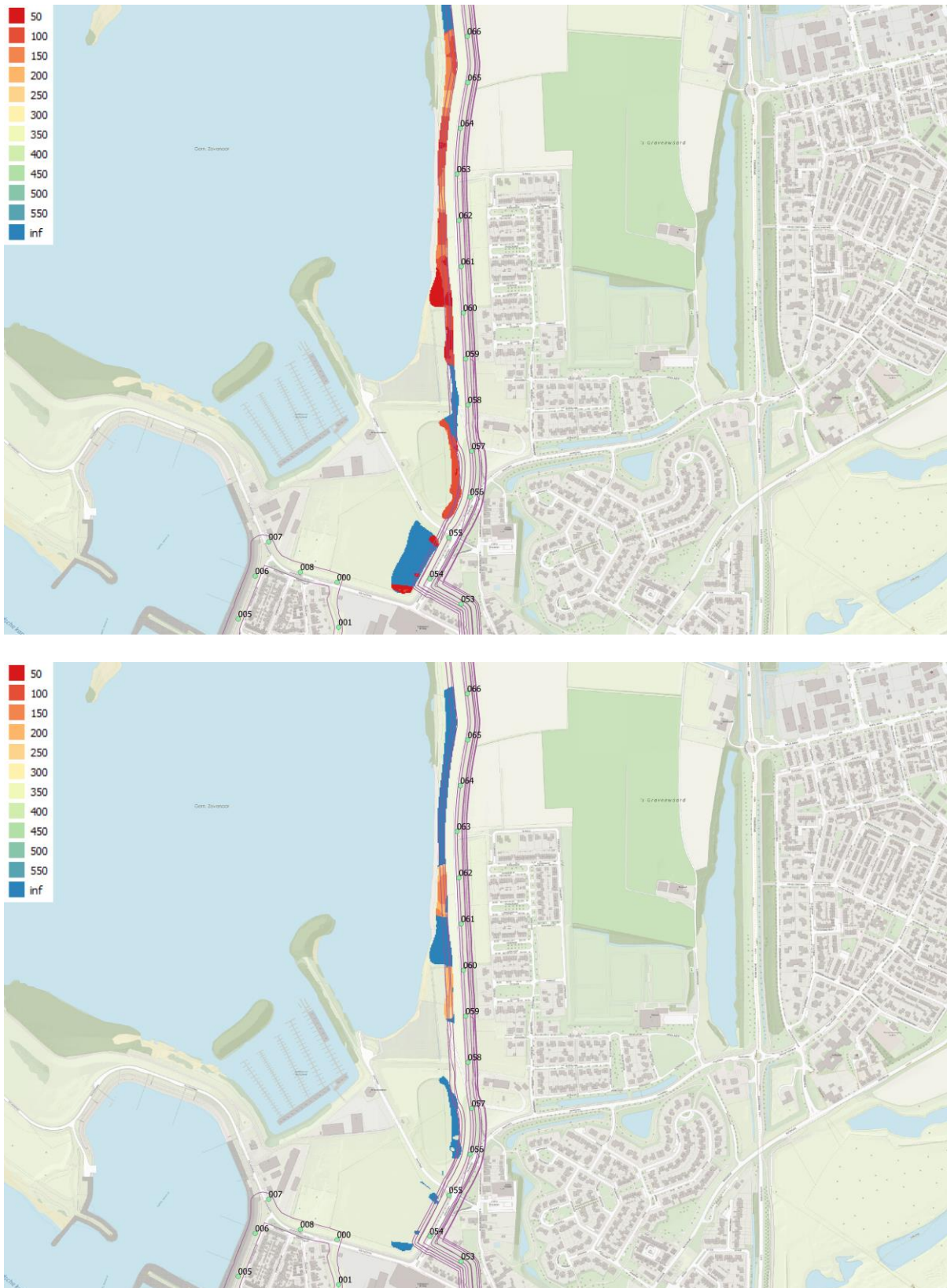
De onderkant van de eerste kleilaag en de onderkant van de tweede kleilaag op basis van de resultaten van het geofysisch onderzoek zijn gegeven in Figuur 28 t/m Figuur 31.

Pannerden-Kandia

Het voorland wordt begrensd door de insteek van het Pannerdensch Kanaal. In het voorland zijn verschillende sloten en greppels aanwezig (Figuur 40). In oktober 2015 is de Groene Rivier Pannerden aan de rechteroever van het Pannerdensch Kanaal opgeleverd. Bij waterstanden van de Boven-Rijn bij Lobith boven NAP +15 m stroomt het water vanuit de Lobberdensche Waard over de Pannerdensche Overlaat, en stroomt het door de Groene Rivier mee. In de Loowaard nabij Kandia hebben afgravingen plaatsgevonden.

De locaties van voorlandverbeteringen in het kader van dijkversterking 1985/1986 zijn gegeven in Figuur 41. Het ontwerp verbeteringsplan voorzag in het gescheiden ontgraven van de aanwezige specie tussen dp 141 en dp 165 over een breedte van 10-35 m, gemeten vanaf de buitenteen, en tot een diepte van 1.50 m. In deze ontgraving zou vervolgens een ten minste 1.00 m dikke kleilaag worden aanbracht. De kleilaag zou vervolgens worden afgedekt met de ontgraven bovengrond. De uitvoering van het verbeteringswerk stond gepland voor de jaren 1985/1986. Het is niet duidelijk of het ontwerp verbeteringsplan zoals beschreven in [12] uiteindelijk ook volledig is uitgevoerd.

De onderkant van de eerste kleilaag en de onderkant van de tweede kleilaag op basis van de resultaten van het geofysisch onderzoek zijn gegeven in Figuur 32 t/m Figuur 34.



Figuur 28: Onderkant eerste kleilaag (boven) en onderkant tweede kleilaag (onder) in [cm-MV] op basis van geofysisch onderzoek; 's Gravenwaard (1)



Figuur 29: Onderkant eerste kleilaag (boven) en onderkant tweede kleilaag (onder) in [cm-MV] op basis van geofysisch onderzoek; 's Gravenwaard (2)



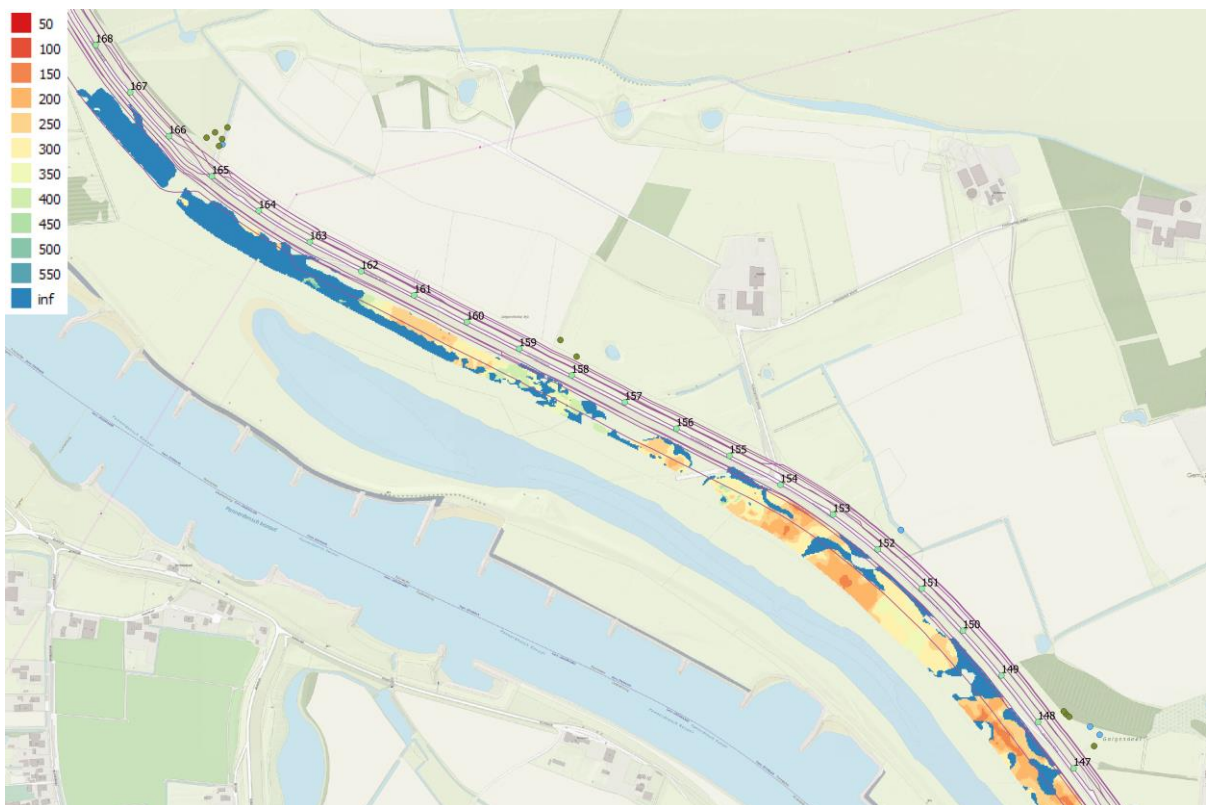
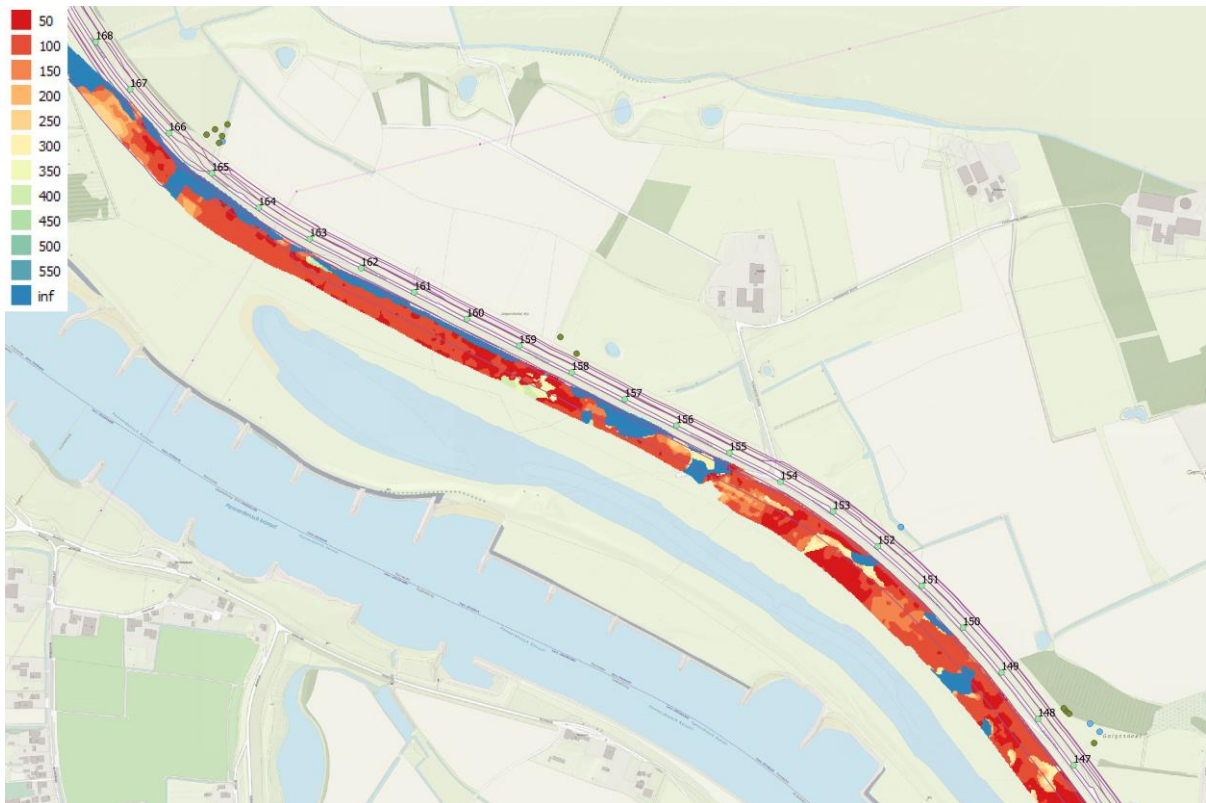
Figuur 30: Onderkant eerste kleilaag (boven) en onderkant tweede kleilaag (onder) in [cm-MV] op basis van geofysisch onderzoek; 's Gravenwaard (3)



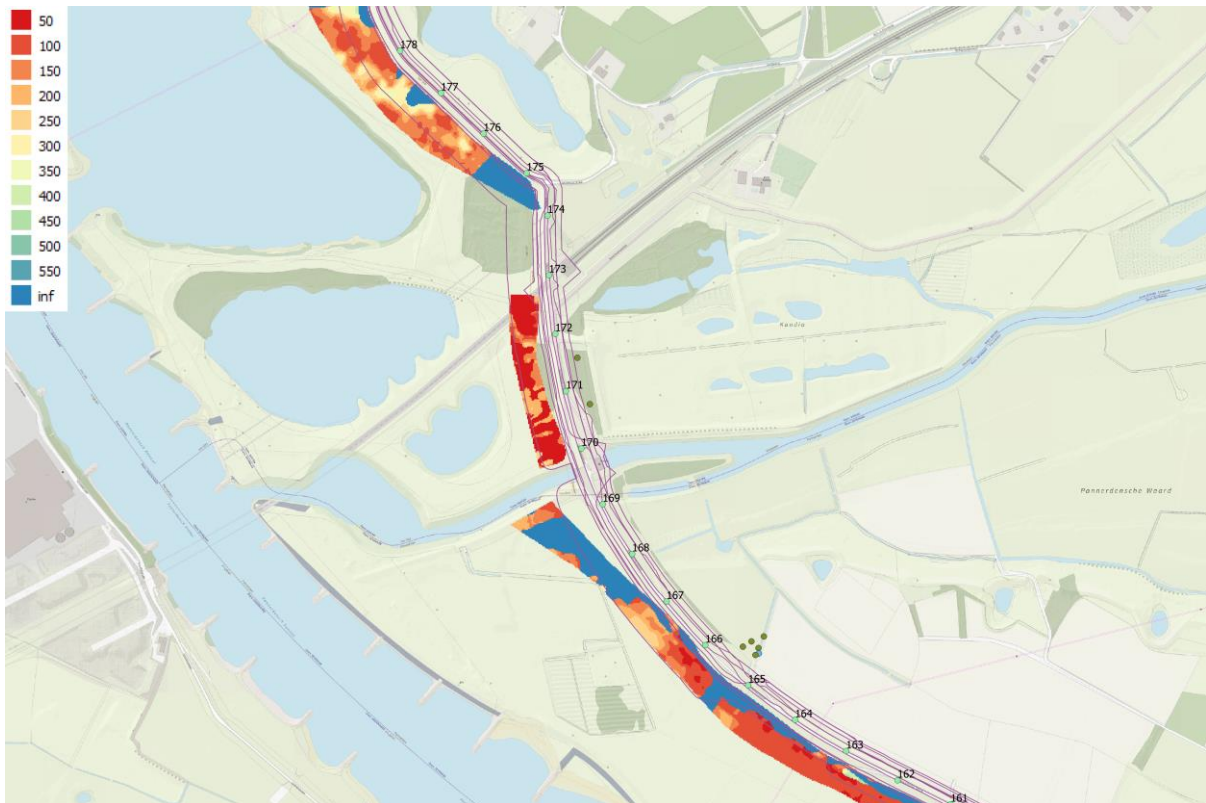
Figuur 31: Onderkant eerste kleilaag (boven) en onderkant tweede kleilaag (onder) in [cm-MV] op basis van geofysisch onderzoek; 's Gravenwaard (4)



Figuur 32: Onderkant eerste kleilaag (boven) en onderkant tweede kleilaag (onder) in [cm-MV] op basis van geofysisch onderzoek; Pannerden-Kandia (1)



Figuur 33: Onderkant eerste kleilaag (boven) en onderkant tweede kleilaag (onder) in [cm-MV] op basis van geofysisch onderzoek; Pannerden-Kandia (2)



Figuur 34: Onderkant eerste kleilaag (boven) en onderkant tweede kleilaag (onder) in [cm-MV] op basis van geofysisch onderzoek; Pannerden-Kandia (3)

4.6 Uittredepunt

Met betrekking tot het uittredepunt zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)
- Hoogtegegevens Waterschap Rijn en IJssel (Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) aangevuld met lokale hoogtemetingen)
- Leidingvakken Waterschap Rijn en IJssel
- Basisregistratie Grootchalige Topografie
- Wellenkaart

Het maatgevende uittredepunt ligt in het algemeen bij de binnenteen, maar kan bij aanwezigheid van een sloot of open water ook verder binnendijs liggen.

Bij het inspecteren van de leidingvakken Waterschap Rijn en IJssel is gebleken dat de shapefile niet alle waterlopen in het voor- en achterland bevat. Daarom is ook de Basisregistratie Grootchalige Topografie ingeladen.

's Gravenwaard

In het achterland zijn verschillende sloten en greppels aanwezig (Figuur 36). Er wordt nadrukkelijk gewezen op de aanwezigheid van kopsloten; omdat de toetsregel Sellmeijer gebaseerd is op de grondwaterstroming bij een doorgaande watergang en niet op die bij een kopsloot is controle op piping met de toetsregel Sellmeijer voor situaties met een kopsloot in principe incorrect.

De locaties van wellen op basis van de wellenkaart zijn gegeven in Figuur 37 en Figuur 38. De wellen zijn opgetreden tijdens de hoogwatergolven van december 1995, februari 1995 en januari 2011 (Tabel 4).

Tabel 4: Wellen; 's Gravenwaard

Locatie	Type	Afstand binnendijs [m]	Object ID	Datum	Waterstand Boven-Rijn bij Lobith [m+NAP]
74+020	Sloot	130	68	20/12/1993	12.88
			24	01/02/1995	16.66
74+095	Sloot	100	71	20/12/1993	12.88
			27	01/02/1995	16.66
75+020	Sloot	95	69	20/12/1993	12.88
			25	01/02/1995	16.66
			37	01/11/1998	14.89
75+080	Sloot	70	70	20/12/1993	12.88
			26	01/02/1995	16.66
88+090	Sloot	150	75	20/12/1993	12.88
			44	05/01/2011	10.04

Pannerden-Kandia

In het achterland zijn verschillende sloten en greppels aanwezig. Daarnaast zijn in het achterland tussen dp 143+060 en dp 144+080, tussen dp 148+070 en dp 149+020, tussen dp 157+040 en dp 157+080 en tussen dp 172+020 en dp 172+080 open wateren aanwezig (Figuur 40). De bodemhoogte van deze waterpartijen is niet nauwkeurig bekend.

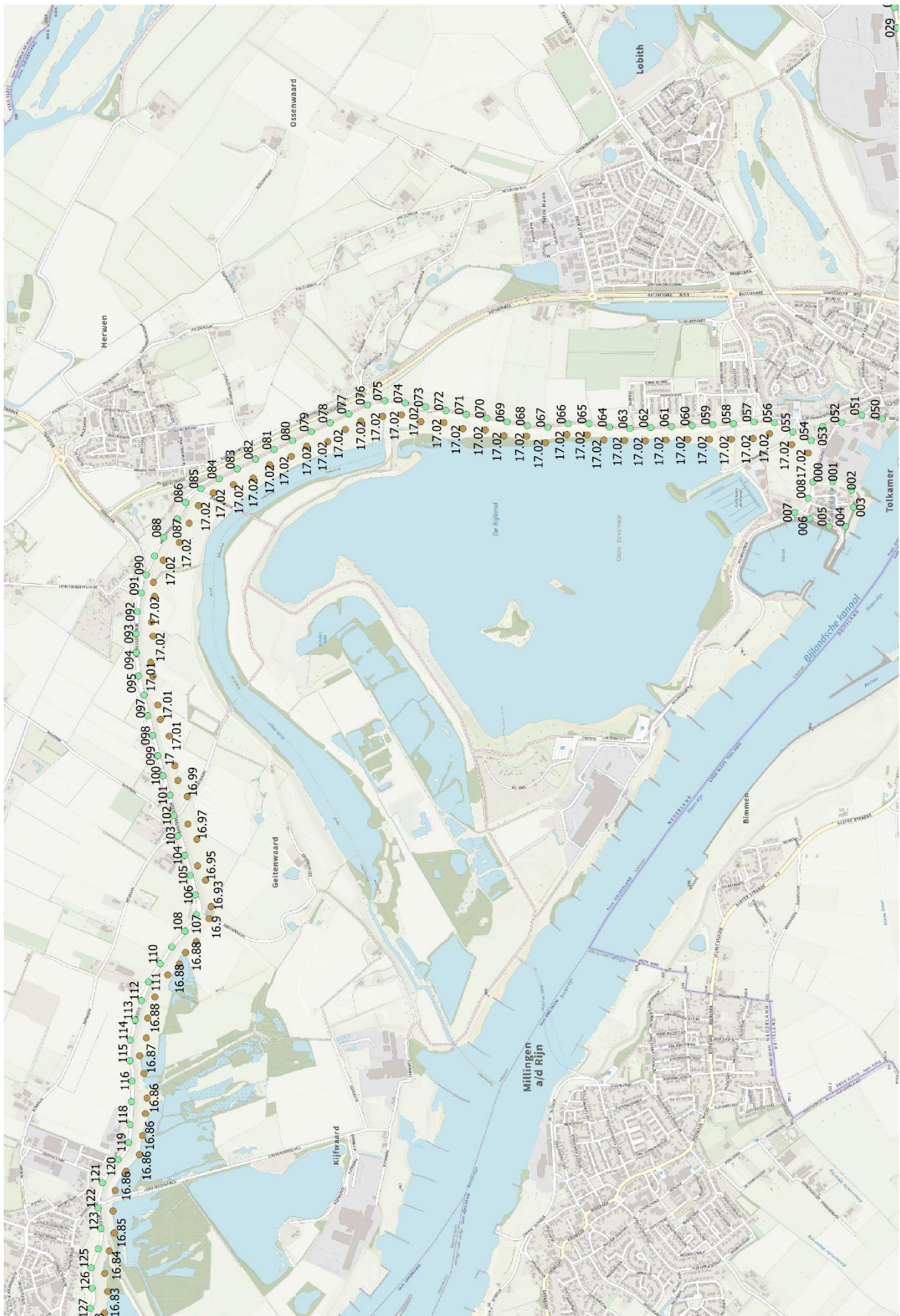
Er wordt nadrukkelijk gewezen op de aanwezigheid van kopsloten; omdat de toetsregel Sellmeijer gebaseerd is op de grondwaterstroming bij een doorgaande watergang en niet op die bij een

kopsloot is controle op piping met de toetsregel Sellmeijer voor situaties met een kopsloot in principe incorrect.

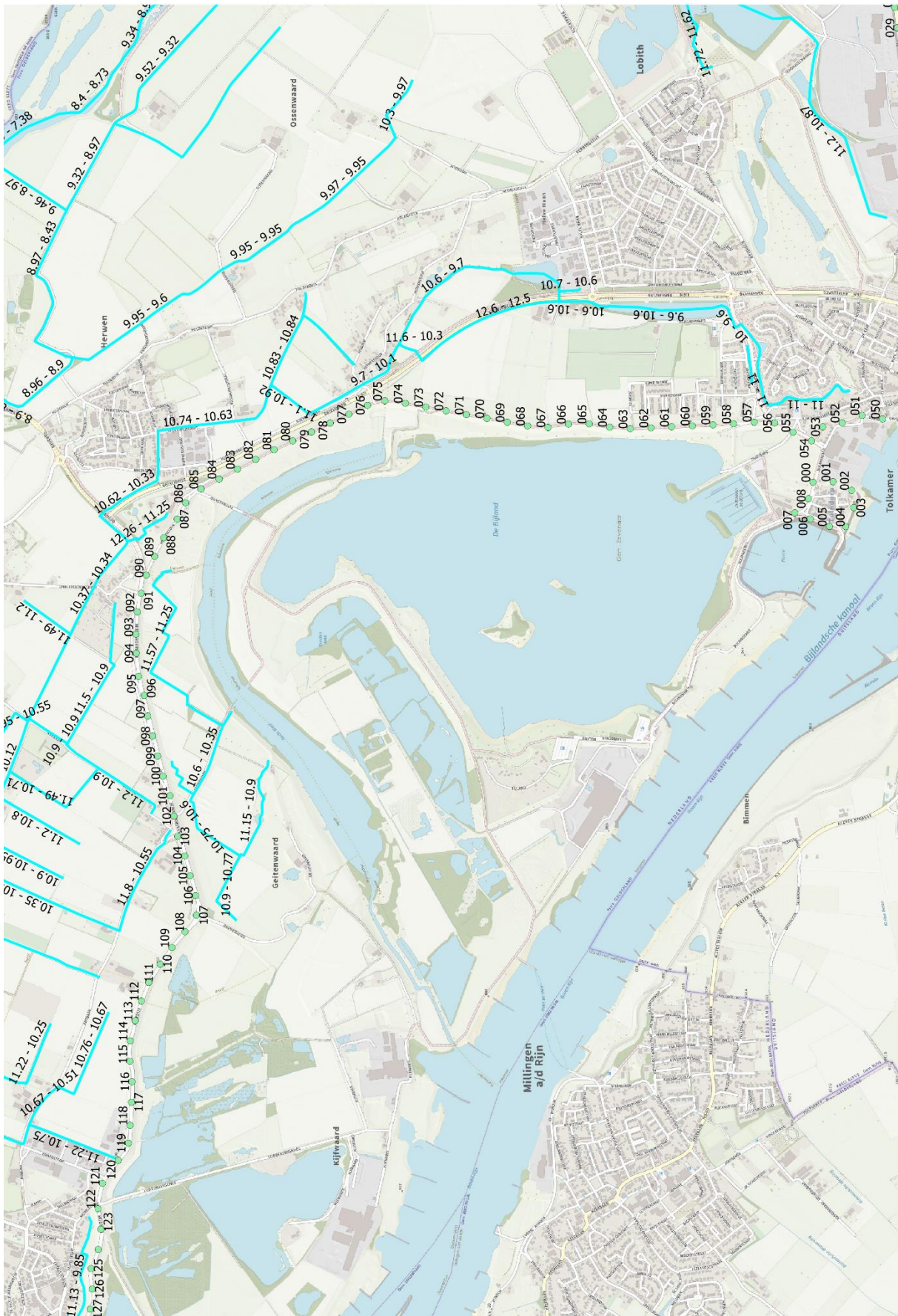
De locaties van wellen op basis van de wellenkaart zijn gegeven in Figuur 42 t/m Figuur 46. De wellen zijn opgetreden tijdens de hoogwatergolven van december 1995, februari 1995, november 1998 en januari 2011 (Tabel 5).

Tabel 5: Wellen; Pannerden-Kandia

Locatie	Type	Afstand binnendijks [m]	Object ID	Datum	Waterstand Boven-Rijn bij Lobith [m+NAP]
143+085	Wiel	80	284	20/12/1993	12.88
			390	15/01/2011	14.98
147+010	Peilbuis	55	200	20/12/1993	12.88
			285	01/02/1995	16.66
			369	01/11/1998	14.89
147+020	Sloot	75	46	20/12/1993	12.88
			2	01/02/1995	16.66
147+040	Slenk	70	47	20/12/1993	12.88
			3	01/02/1995	16.66
147+080	Maaiveld	55	201	20/12/1993	12.88
			202	20/12/1993	12.88
			203	20/12/1993	12.88
			286	01/02/1995	16.66
			287	01/02/1995	16.66
			288	01/02/1995	16.66
			370	01/11/1998	14.89
151+090	Sloot	55	48	20/12/1993	12.88
			4	01/02/1995	16.66
			29	01/11/1998	14.89
158+010	Maaiveld	40	204	20/12/1993	12.88
			289	01/02/1995	16.66
158+045	Maaiveld	50	205	20/12/1993	12.88
			290	01/02/1995	16.66
165+020	Kopsloot	50-60	49	20/12/1993	12.88
			209	20/12/1993	12.88
			207	20/12/1993	12.88
			5	01/02/1995	16.66
			294	01/02/1995	16.66
			292	01/02/1995	16.66
			30	01/11/1998	14.89
165+040	Sloot	80	206	20/12/1993	12.88
			291	01/02/1995	16.66
165+050	Maaiveld	45-60	208	20/12/1993	12.88
			210	20/12/1993	12.88
			293	01/02/1995	16.66
			295	01/02/1995	16.66
			372	01/11/1998	14.89
170+070	Maaiveld	40	211	20/12/1993	12.88
			297	01/02/1995	16.66
171+055	Maaiveld	35	212	20/12/1993	12.88
			297	01/02/1995	16.66



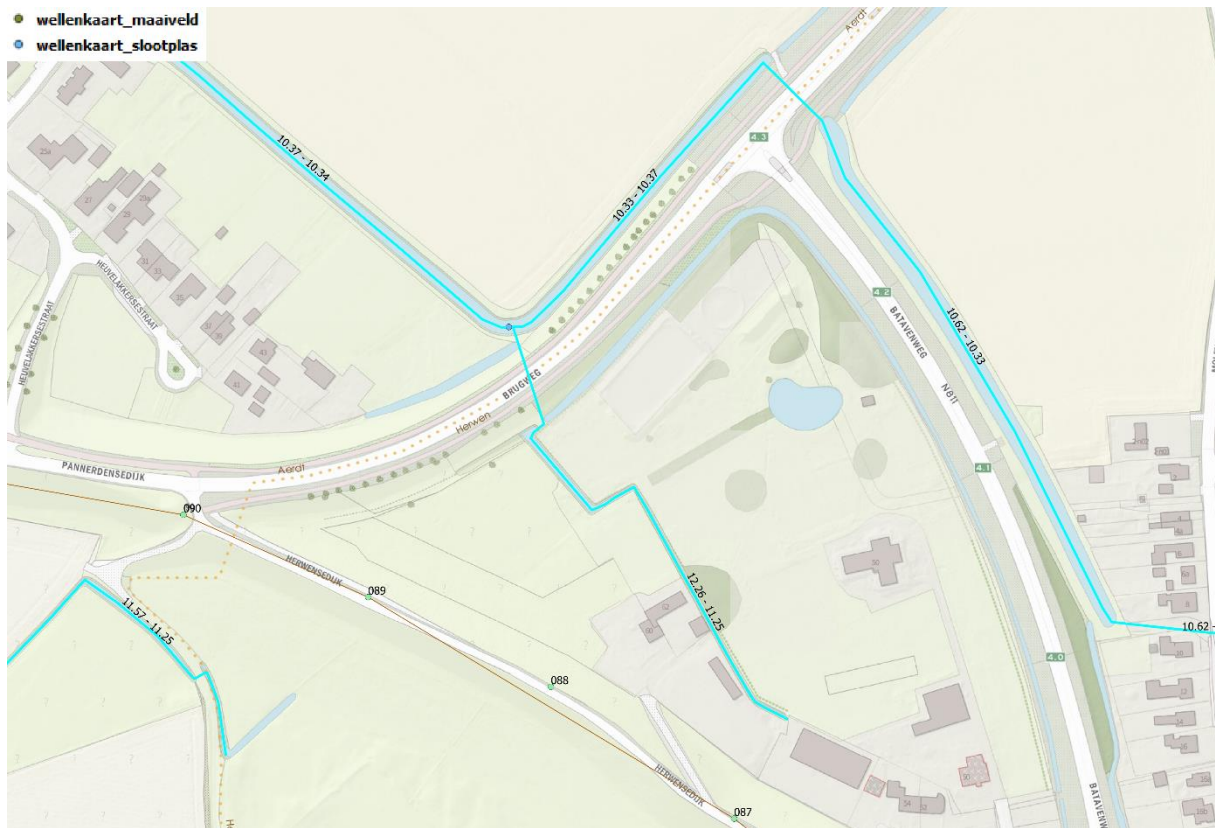
Figuur 35: Ondergrenswaarde; 's Gravenwaard



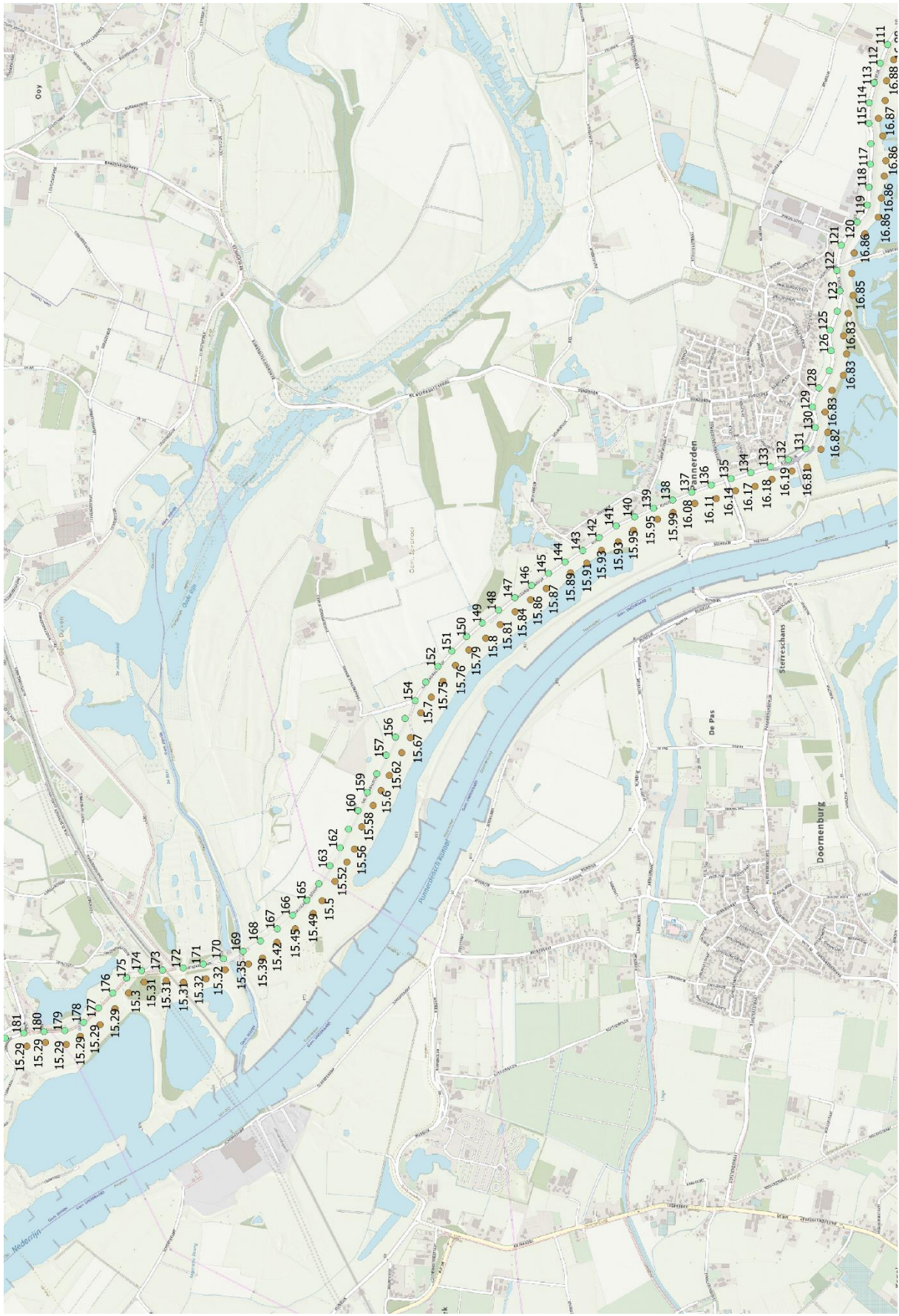
Figuur 36: Leidingvakken met bodemhoogte; 's Gravenwaard



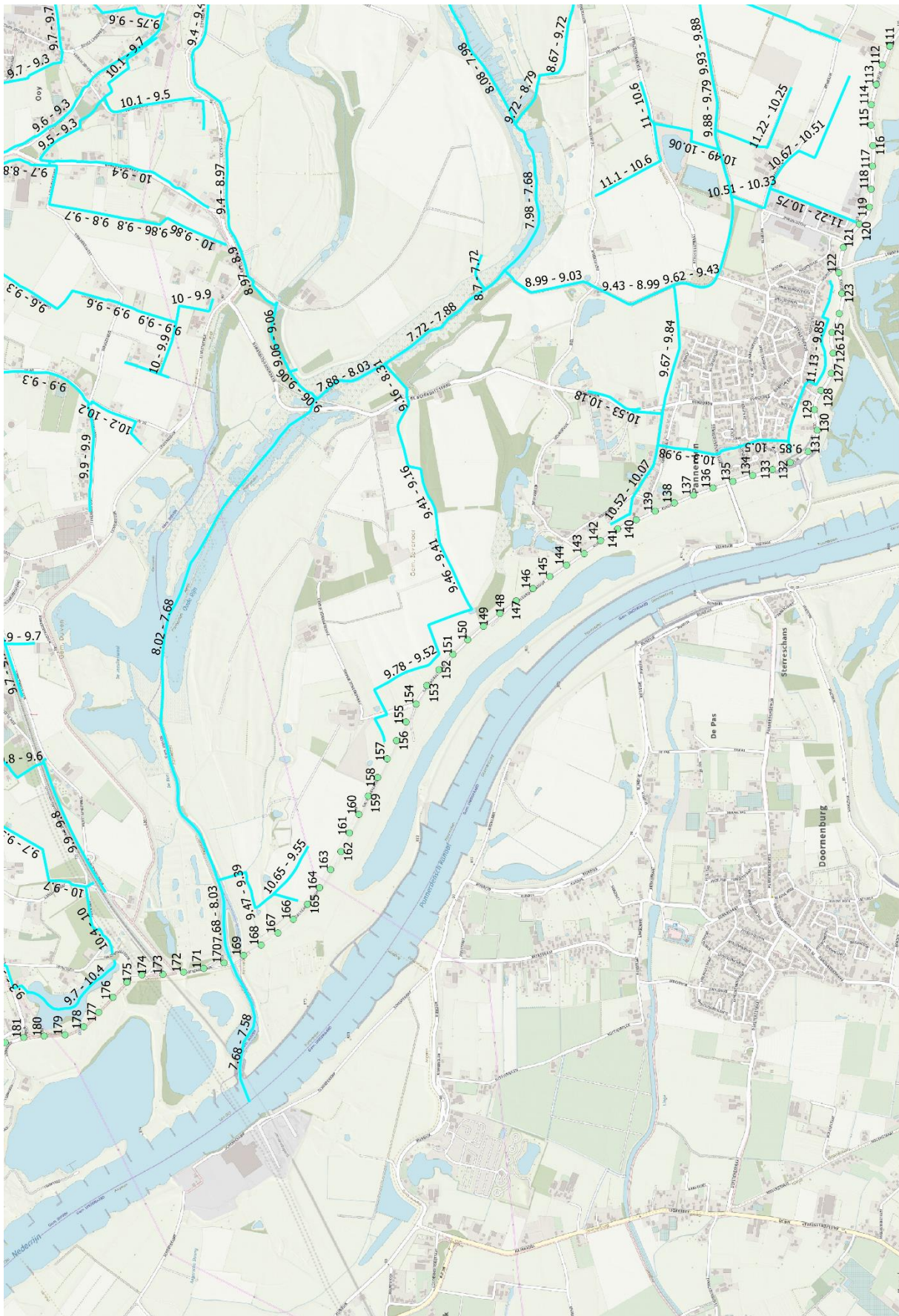
Figuur 37: Locatie wellen; 's Gravenwaard (1)



Figuur 38: Locatie wellen; 's Gravenwaard (2)



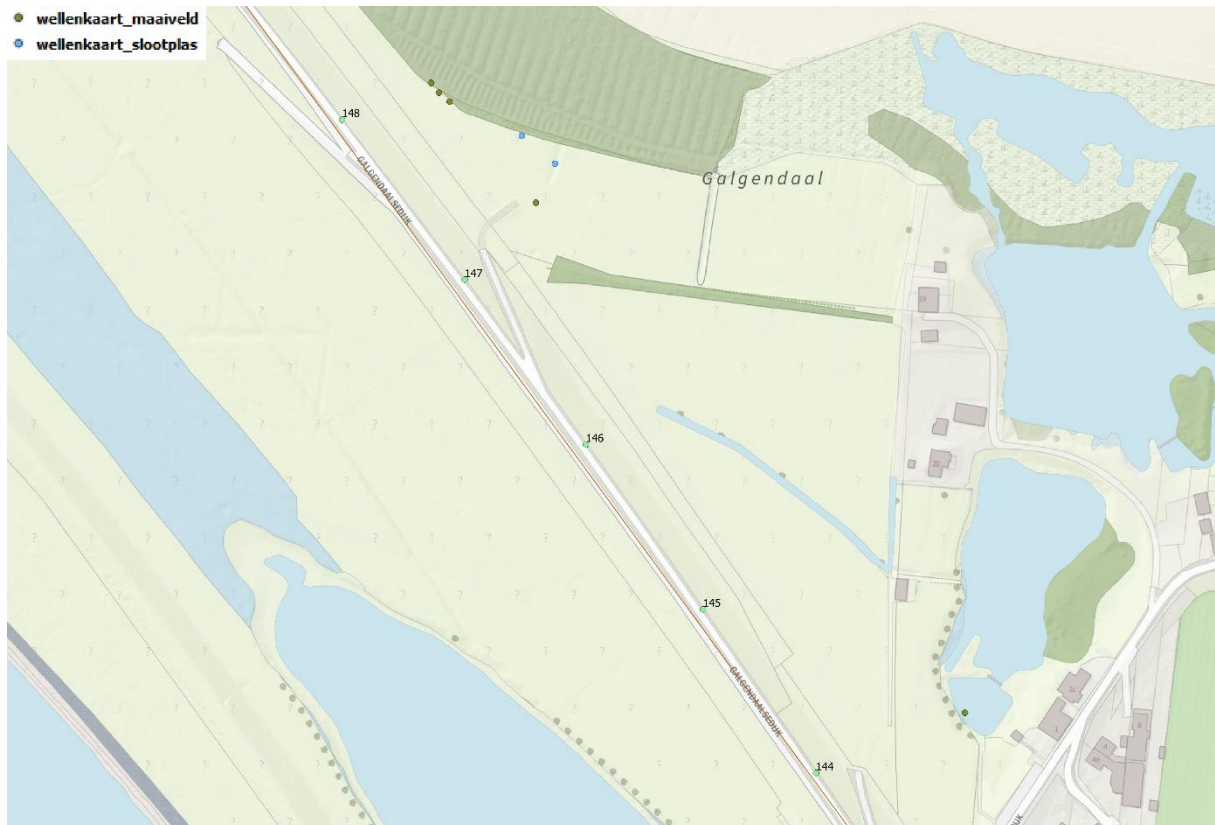
Figuur 39: Ondergrenswaarde; Pannerden-Kandia



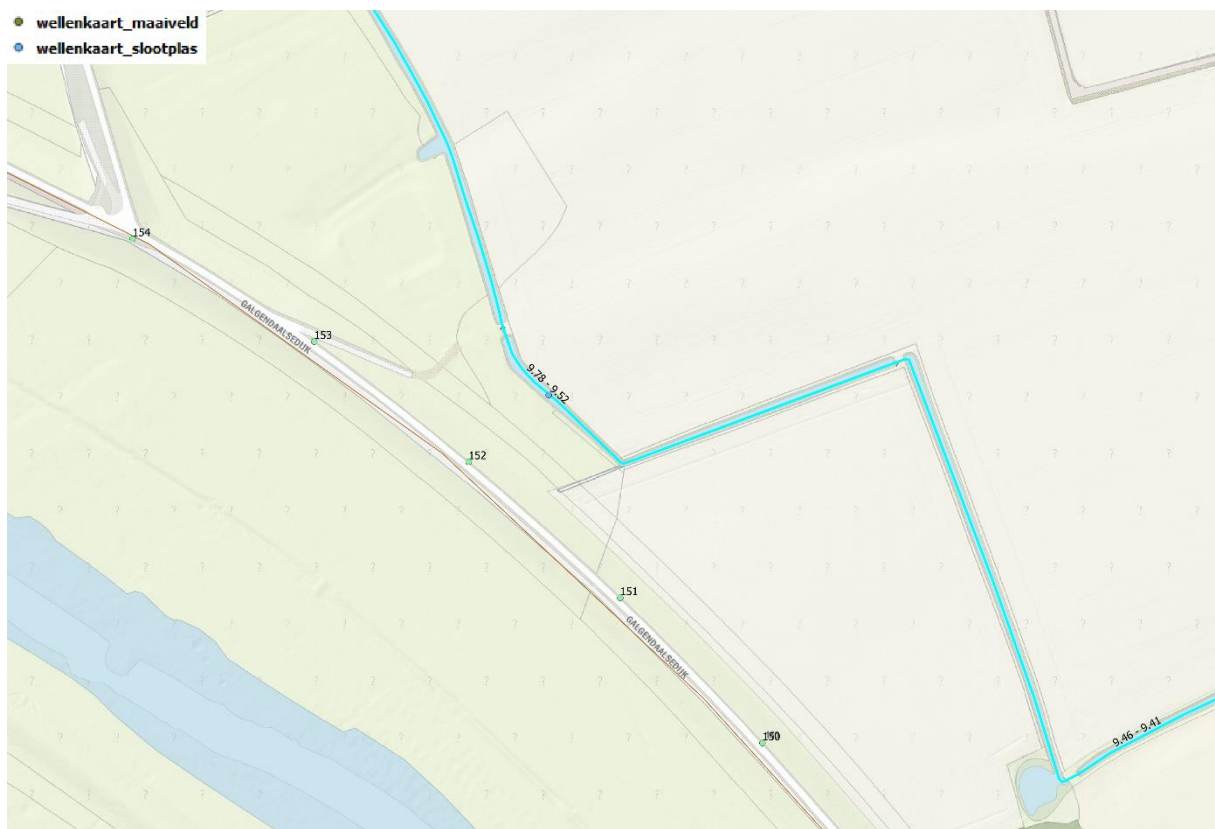
Figuur 40: Leidingvakken met bodemhoogte; Pannerden-Kandia



Figuur 41: Locatie voorlandverbeteringen in het kader van dijkversterking 1985/1986; Pannerden-Kandia



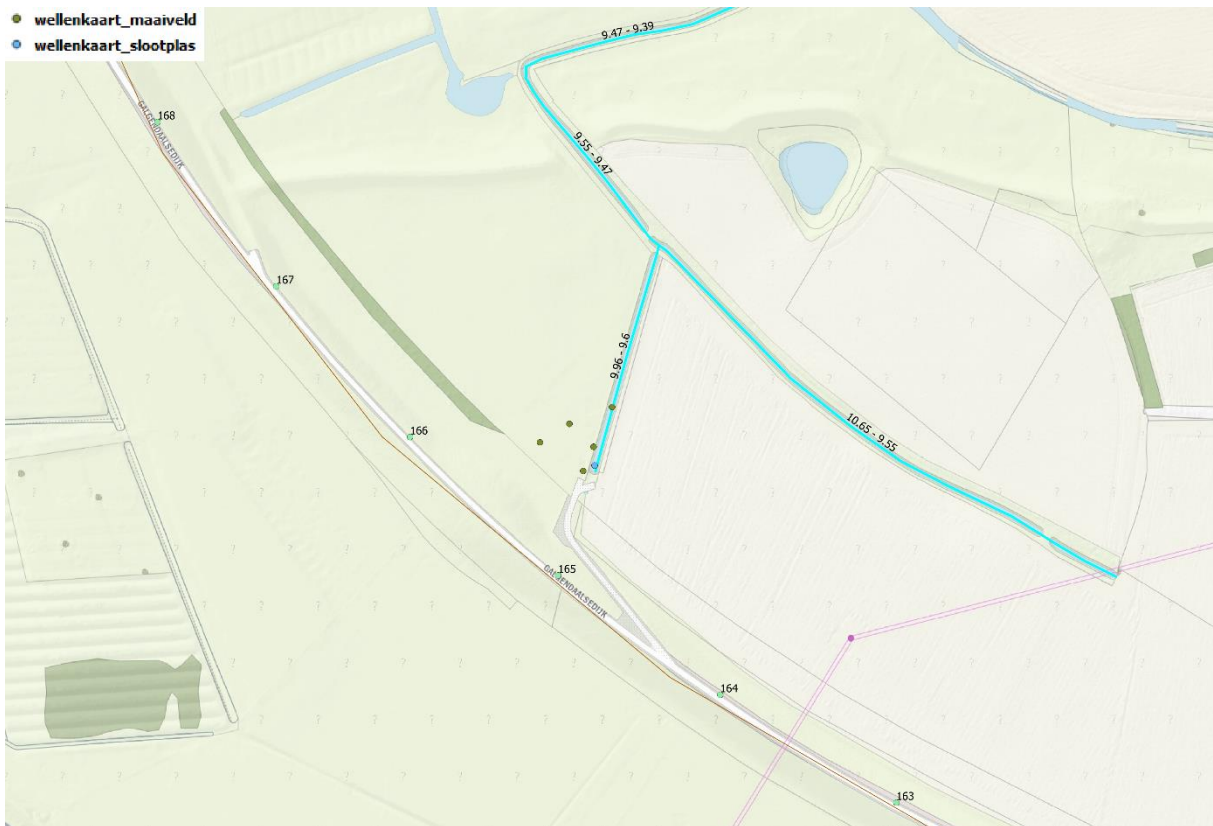
Figuur 42: Locatie wellen; Pannerden-Kandia (1)



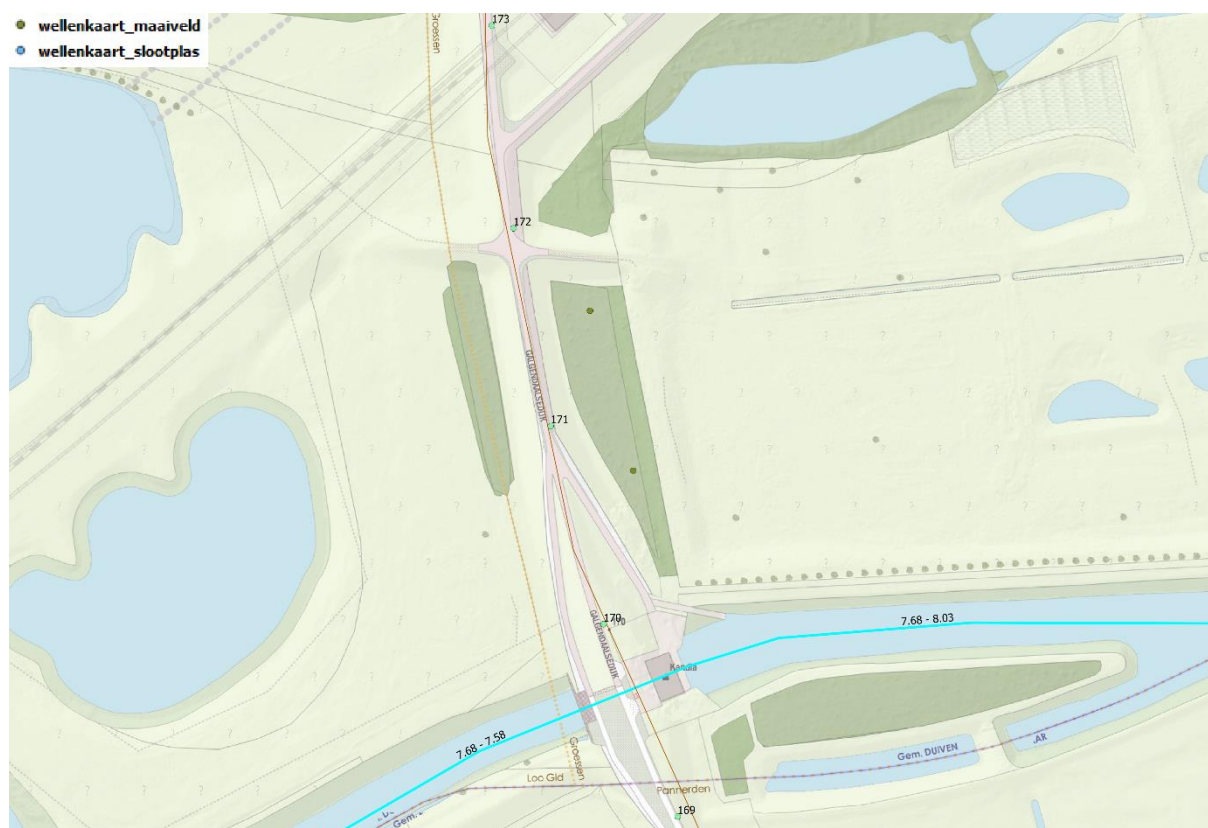
Figuur 43: Locatie wellen; Pannerden-Kandia (2)



Figuur 44: Locatie wellen; Pannerden-Kandia (3)



Figuur 45: Locatie wellen; Pannerden-Kandia (4)



Figuur 46: Locatie wellen; Pannerden-Kandia (5)

4.7 Onderkant zandpakket

Met betrekking tot de onderkant van het zandpakket zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Stochastisch Ondergrond Schematisatie (SOS)
- Detaillering bovenste lagen met GeoTOP

De beschikbare boringen en sonderingen reiken niet tot de onderkant van het zandpakket.

's Gravenwaard

De bodemopbouw op basis van de SOS segmenten is gegeven in Figuur 23. Voor het traject 's Gravenwaard is het SOS segment 48011 van toepassing. Volgens scenario 48011_1D1 en 48011_1D2 ligt de onderkant van het zandpakket gemiddeld op NAP -7 m (maximaal: NAP +2.5 m; minimaal: NAP -10 m).

De bodemopbouw ter plaatse van de waterkering op basis van GeoTOP is gegeven in Figuur 26. Voor het deeltraject tussen globaal dp 72 en dp 83 en het deeltraject ten westen van globaal dp 103 ligt de onderkant van het zandpakket op NAP -12.5 m. Voor de overige deeltrajecten ligt de onderkant van het zandpakket op NAP -11.5 m.

Pannerden-Kandia

De bodemopbouw op basis van de SOS segmenten is gegeven in Figuur 23. Voor het traject Pannerden-Kandia zijn de SOS segment 48008, 48009 en 48010 van toepassing. Volgens scenario's 48008_1D1, 48008_1D2, 48008_1D3, 48009_1D1 en 48009_1D2 ligt de onderkant van het zandpakket gemiddeld op NAP -8 m (maximaal: NAP -7 m; minimaal: NAP -9 m).³ Volgens scenario's 48010_1D1 en 48010_1D3 ligt de onderkant van het zandpakket gemiddeld op NAP -10 m (maximaal: NAP -8 m; minimaal: NAP -12 m). Volgens scenario's 48008_1D4, 48008_1D5 en 48008_1D6 ligt de onderkant van het zandpakket gemiddeld op NAP -19.8 m.⁴ Volgens scenario's 48009_1D3 en 48009_1D4 ligt de onderkant van het zandpakket gemiddeld op NAP -20 m (maximaal: NAP -18 m; minimaal: NAP -22 m). Volgens scenario 48010_1D2 ligt de onderkant van het zandpakket gemiddeld op NAP +6 m (maximaal: NAP +6.5 m; minimaal: NAP +5.5 m).

De bodemopbouw ter plaatse van de waterkering op basis van GeoTOP is gegeven in Figuur 26. Voor het deeltraject ten zuiden van globaal dp 162 ligt de onderkant van het zandpakket op NAP -6 m. Voor het deeltraject ten noorden van globaal dp 162, waar in de bodemopbouw de kleilaag beneden NAP -6 m praktisch ontbreekt, ligt de onderkant van het zandpakket op NAP -13 m. Daarnaast kan voor het deeltraject ten zuiden van globaal dp 141 sprake zijn van de aanwezigheid van een slecht doorlatende kleilaag beneden NAP +6 m (lokaal scenario). Tenslotte moet er voor het deeltraject ten noorden van globaal dp 162 rekening mee worden gehouden dat de onderkant van het zandpakket niet op NAP -13 m, maar op NAP -23 m ligt (lokaal scenario).

4.8 Korreldiameter D_{70}

Met betrekking tot de korreldiameter D_{70} zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Stochastisch Ondergrond Schematisatie (SOS)
- Geotechnisch grondonderzoek

³ Volgens scenario's 48008_1D2 en 48008_1D3 is een matig doorlatende kleiige zandlaag aanwezig boven een dunne kleiige veenlaag rond NAP +6 m. Deze slecht doorlatende grondlaag is evenwel niet zichtbaar in de bodemopbouw op basis van GeoTOP.

⁴ Volgens scenario's 48008_1D4, 48008_1D5 en 48008_1D6 is een matig doorlatende zandlaag aanwezig beneden NAP -19.8 m. In deze proefvoetsing worden de zandlagen beneden NAP -19.8 m als slecht doorlatend beschouwd.

- Bestekstekeningen en oude rapporten

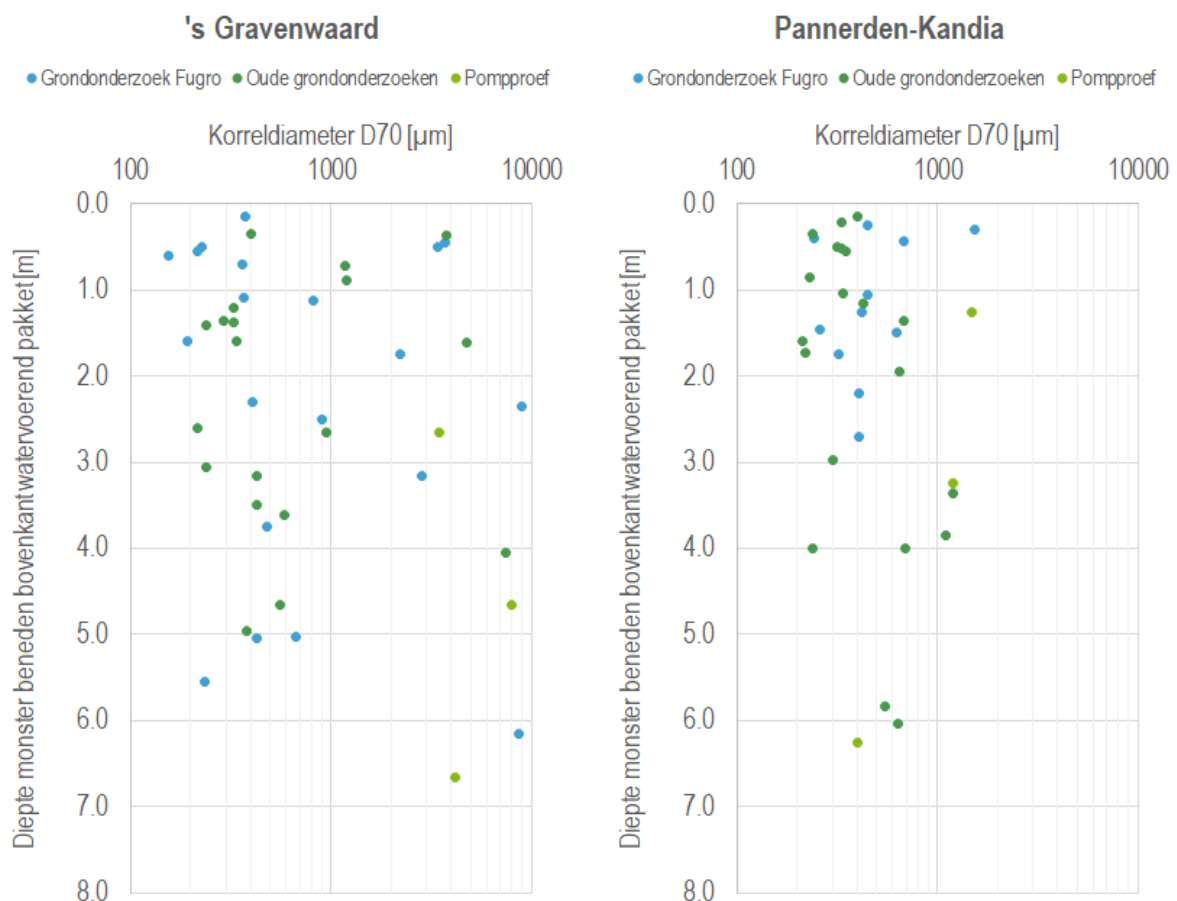
's Gravenwaard

De korreldiameter D_{70} op basis van de SOS segmenten is gegeven in Figuur 47. Voor het traject 's Gravenwaard is SOS segment 48011 van toepassing. Volgens segment 48011 geldt voor zand boven NAP + 9 m een korreldiameter D_{70} van 460 μm .

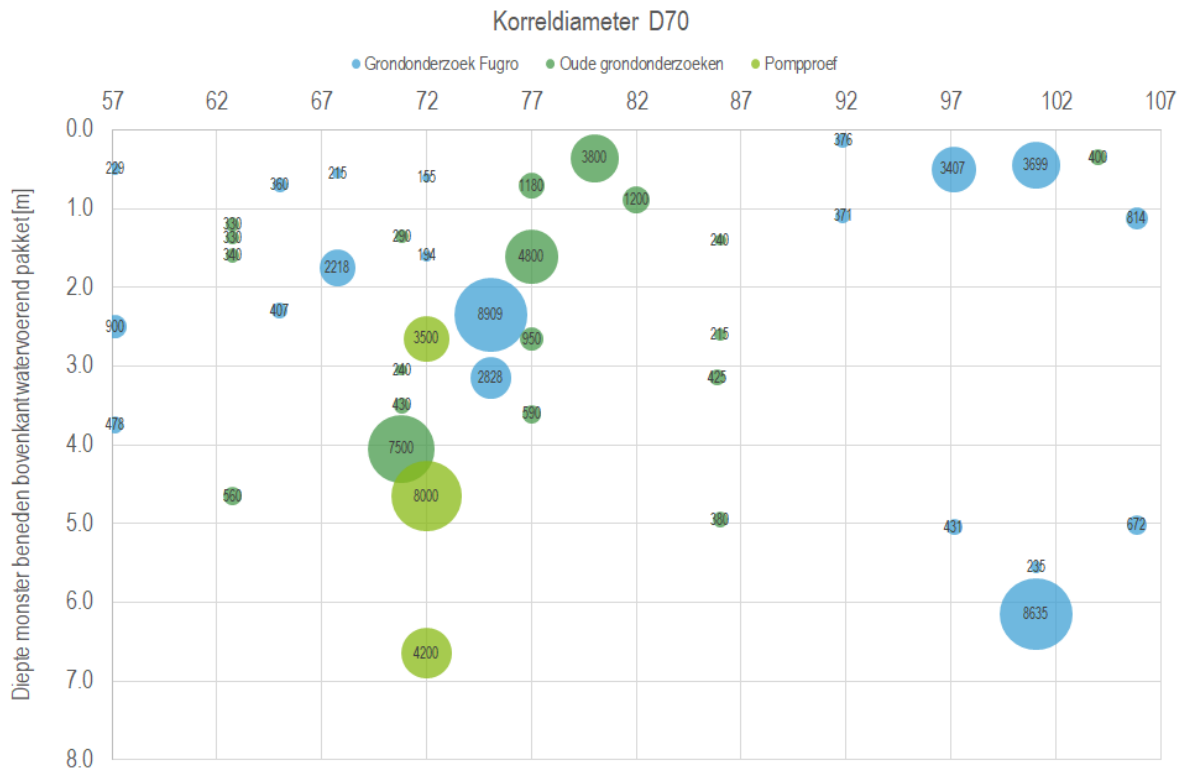
WTI-segme	WTI-scenar	WTI-mv	D70_gem	Fm1	d1	D70_gem	Fm2	d2
48011	1D1	12.5	460	EC	12.4	460	EC	9
48011	1D2	12.5	460	EC	12.4	460	EC	9

Figuur 47: Korreldiameter D_{70} op basis van SOS segmenten; 's Gravenwaard

De korreldiameter D_{70} op basis van korrelgrootteverdelingen, uitgezet tegen de diepte van het monster beneden de onderkant van de deklaag, is gegeven in Figuur 48. De ruimtelijke spreiding van de korreldiameter D_{70} is gegeven in Figuur 49. Voor het traject 's Gravenwaard varieert de korreldiameter D_{70} in de pipinggevoelige zandlaag tot 2 m beneden de onderkant van de deklaag tussen 155 μm en 4800 μm . Hierbij moet worden opgemerkt dat de meest extreme waarden van de korreldiameter D_{70} in de regel betrekking hebben op de (grindige) tussenzandlaag ten westen van dp 97 (zie ook Sectie 4.2 en Figuur 18).



Figuur 48: Korreldiameter D_{70} op basis van korrelgrootteverdelingen versus gemiddelde diepte monster beneden bovenkant watervoerend pakket



Figuur 49: Ruimtelijke spreiding van korreldiameter D₇₀ op basis van korrelgrootteverdelingen versus gemiddelde diepte monster beneden bovenkant watervoerend pakket; 's Gravenwaard

Pannerden-Kandia

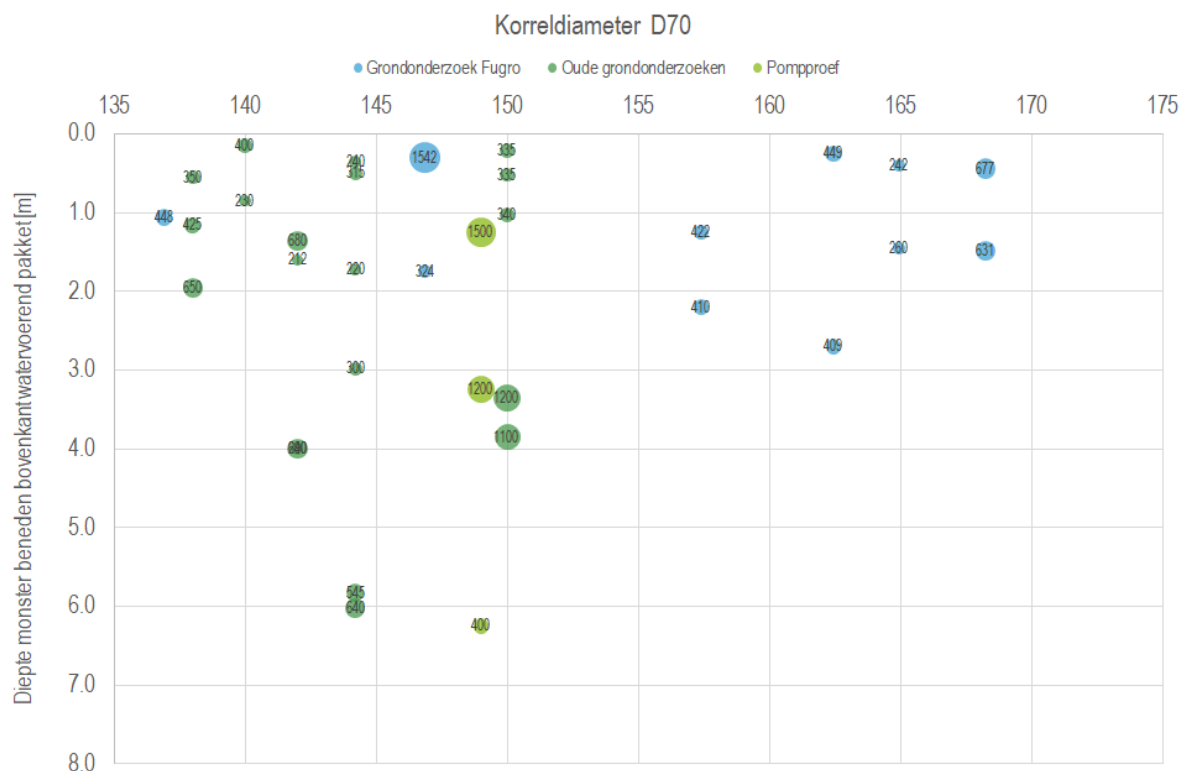
De korreldiameter D₇₀ op basis van de SOS segmenten is gegeven in Figuur 50. Voor het traject Pannerden-Kandia zijn de SOS segment 48008, 48009 en 48010 van toepassing. Volgens segment 48008 geldt voor zand boven NAP + 9 m een korreldiameter D₇₀ van 420 µm. Volgens segment 48009 geldt voor zand boven NAP + 8 m een korreldiameter D₇₀ van 420-460 µm. Volgens segment 48010 geldt voor zand boven NAP + 9 m een korreldiameter D₇₀ van 460 µm.

WTI-segme	WTI-scenar	WTI-mv	D70_gem*	Fm1	d1	D70_gem	Fm2	d2
48008	1D1	10.5	420	EC	11	420	EC	7.8
48008	1D2	10.5	420	EC	11	420	EC	7.8
48008	1D3	10.5	420	EC	11	420	EC	7.8
48008	1D4	10.5	420	EC	11	420	EC	7.8
48008	1D5	10.5	420	EC	11	420	EC	7.8
48008	1D6	10.5	420	EC	11	420	EC	7.8
48009	1D1	11	420	EC	11	420	EC	7.8
48009	1D1	11	460	EC	12.4	460	EC	9
48009	1D2	11	420	EC	11	420	EC	7.8
48009	1D2	11	460	EC	12.4	460	EC	9
48009	1D3	11	420	EC	11	420	EC	7.8
48009	1D3	11	460	EC	12.4	460	EC	9
48009	1D4	11	420	EC	11	420	EC	7.8
48009	1D4	11	460	EC	12.4	460	EC	9
48010	1D1	11.5	460	EC	12.4	460	EC	9
48010	1D2	11.5	460	EC	12.4	460	EC	9
48010	1D3	11.5	460	EC	12.4	460	EC	9

Figuur 50: Korreldiameter D₇₀ op basis van SOS segmenten; Pannerden-Kandia

De korreldiameter D₇₀ op basis van korrelgrootteverdelingen, uitgezet tegen de diepte van het monster beneden de onderkant van de deklaag, is gegeven in Figuur 48. De ruimtelijke spreiding van

de korreldiameter D_{70} is gegeven in Figuur 51. Voor het traject Pannerden-Kandia varieert de korreldiameter D_{70} in de pipinggevoelige zandlaag tot 2 m beneden de onderkant van de deklaag tussen 212 μm en 1542 μm .



Figuur 51: Ruimtelijke spreiding van korreldiameter D_{70} op basis van korrelgrootteverdelingen versus gemiddelde diepte monster beneden bovenkant watervoerend pakket; Pannerden-Kandia

4.9 Doorlatendheid zandlaag

Met betrekking tot de doorlatendheid van de zandlaag zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Stochastisch Ondergrond Schematisatie (SOS)
- HPT-sonderingen, MPT-minipompproeven en pompproeven

HPT-MPT sonderingen worden toegepast bij doorlatendheden van 0.05 m/d tot ca. 150 m/d. De nauwkeurigheid is in de orde van grootte van 10% van de gemeten doorlatendheid. De reikwijdte van de MPT mini-pompproeven is afhankelijk van de doorlatendheid en berging, en kan per proef verschillen. Het bereik van het meetsysteem varieert globaal tussen 0.1 m/d en 100 m/d. Boven 100 m/d kan alleen een indicatie van de verwachte doorlatendheid worden gegeven.

's Gravenwaard

De doorlatendheid van de zandlaag op basis van de SOS segmenten is gegeven in Figuur 52. Voor het traject 's Gravenwaard is het SOS segment 48011 van toepassing. Volgens scenario's 48011_1D1 en 48011_1D2 is de doorlatendheid van de zandlaag gelijk aan 100 m/d.

soilprofile_id	top_level	soil_name	max-d	min-d	k-mean
Segment_48011_1D1	12.5	11096_H_Rk_k	12.5	12.5	
Segment_48011_1D1	11	11098_P_Rg_zg	12	10.5	100
Segment_48011_1D1	-7	11099_P_Ova_sd	2.5	-10	
Segment_48011_1D2	12.5	11097_H_Rk_k	12.5	12.5	
Segment_48011_1D2	9	11098_P_Rg_zg	10	7	100
Segment_48011_1D2	-7	11099_P_Ova_sd	2.5	-10	

Figuur 52: Doorlatendheid zandlaag op basis van SOS segmenten; 's Gravenwaard

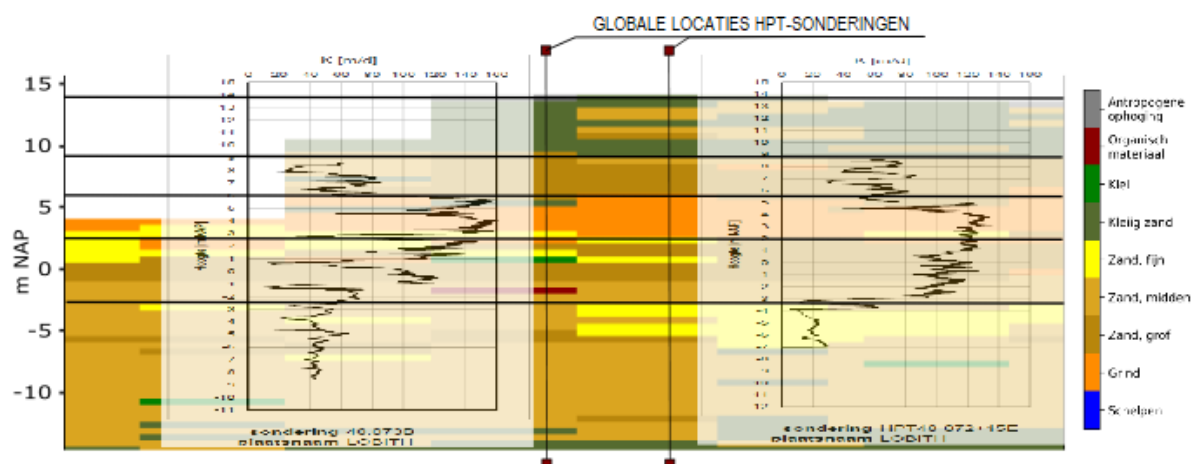
In het kader van POV piping zijn 2 HPT-sonderingen uitgevoerd: HPT48_073B ter plaatse van de buitenteen bij dp 73 en HPT48_072+15E in het achterland nabij dp 72. Bij beide sonderingen zijn MPT mini-pompproeven uitgevoerd in het holocene zand van de Formatie van Echteld (HLC) en in de overgangszone tussen de Formatie van Kreftenheye en het Lagenpakket van Twello (KT1).

De resultaten van de HPT-MPT sonderingen zijn gegeven in Figuur 58 en Figuur 59. De gegevens en resultaten van de MPT-minipompproeven zijn samengevat in Tabel 6. De doorlatendheid op basis van de HPT-MPT sonderingen en de doorlatendheid op basis van de MPT-minipompproeven zijn van vergelijkbare orde grootte, hoewel de exacte waarden wel enigszins van elkaar afwijken.

Tabel 6: Gegevens en resultaten MPT-minipompproeven; 's Gravenwaard

Locatie	Maaiveld [m+NAP]	Conuspunt [m+NAP]	Formatie	Doorlatendheid [m/d]	Opmerkingen
073B	13.61	8.01	HLC	-	Afwijkend gedrag, onbekende oorzaak
073B	13.61	-4.98	KT1	68	-
72+15E	13.55	7.95	HLC	58	-
72+15E	13.55	-4.25	KT1	19	-

In Tabel 7 zijn voor verschillende grondsoorten inschattingen gegeven van de doorlatendheid. Hiervoor zijn de resultaten van de HPT-MPT sonderingen vergeleken met de bodemopbouw op basis van GeoTOP voor dwarsprofiel dp 72+050 (Figuur 53). Daarbij is aan iedere lithoklasse een gemiddelde waarde van de op de betrokken hoogte gemeten doorlatendheid toegekend. In Figuur 53 valt een globale trend van de HPT-MPT te volgen over de lithoklassen van GeoTOP. De data lijkt grotendeels overeen te komen met de lagen en doorlatendheidsvariatie die verwacht wordt op basis van GeoTOP, alleen geeft GeoTOP grind en grof zand weer wat minder duidelijk onderscheidbaar is in de doorlatendheid uit de HPT-MPT sondering.



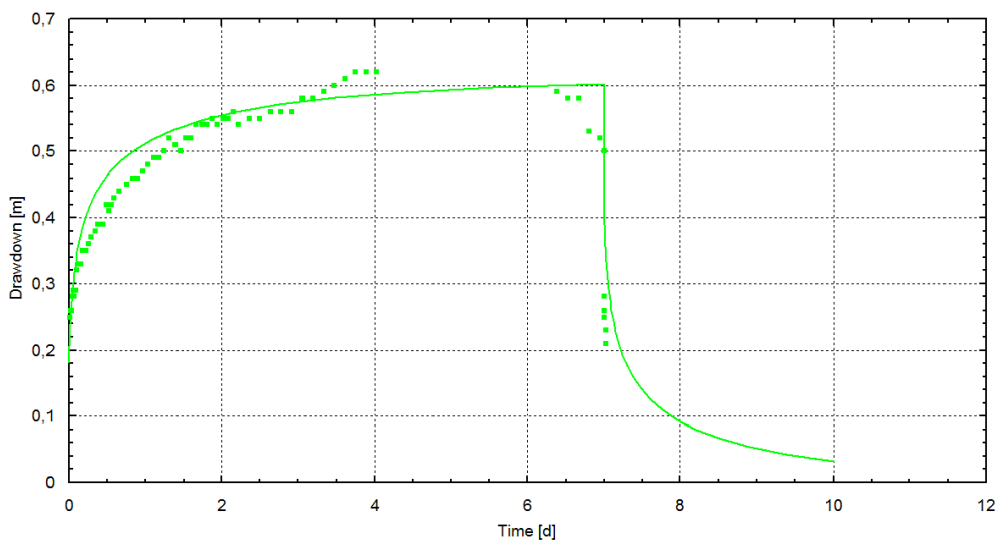
Figuur 53: Doorlatendheid op basis van HPT-MPT sonderingen versus bodemopbouw op basis van GeoTOP; 's Gravenwaard

In het kader van POV piping is een pompproef uitgevoerd ter plaatse van dp 72. De pompproef is uitgevoerd met een bronpomp in het eerste watervoerend pakket en waarnemingsbuizen op 15 m en 25 m afstand tot de bronpomp. Er is gedurende ongeveer 1 week water onttrokken. Het debiet is constant gehouden op 90 m³/h. De stijghoogten in de waarnemingsbuizen zijn met een interval van eenmaal per minuut gemeten. Ten behoeve van de analyse van de resultaten van de pompproef is voor de deklaag uitgegaan van een doorlatendheid van 0.01 m/d. Voor de onderkant van de deklaag is NAP +11 m aangehouden. Voor de onderkant van het watervoerend pakket is NAP -10 m aangehouden [13].

Waargenomen en berekende verlagingen en verhogingen van de stijghoogte in peilbuis MB03 zijn gegeven in Figuur 54. Op basis van de resultaten van de pompproef zijn in [13] de volgende conclusies getrokken:

- De doorlatendheid van de grondlagen varieert volgens de korrelgrootteverdelingen tussen ca. 75 m/d en 100 m/d.
- De verlagingen van de stijghoogte aan rivierzijde zijn groter dan die aan dijkzijde.
- Het doorlaatvermogen van het eerste watervoerend pakket is afgeleid op ca. 2100 m²/d (overeenkomend met een doorlatendheid van ca. 100 m/d). Deze waarde komt overeen met de verwachting vanuit de literatuur en de afleiding van de doorlatendheid van de grondlagen uit de korrelgrootteverdelingen.

De weerstand van de deklaag is niet gekalibreerd omdat de pompproef is bij een grondwaterstand onder de deklaag [13].



Layers		Boundary conditions								
Number of aquifers	2	<input checked="" type="checkbox"/> Top aquitard present	<input type="checkbox"/> Impervious	<input checked="" type="radio"/> Leaky						
Top layer elevation	13	<input checked="" type="checkbox"/> Bottom aquitard present	<input checked="" type="radio"/> Impervious	<input type="radio"/> Leaky						
Aquifer	Base [m]	Thickness [m]	Kh [m/d]	Code	T [m ² /d]	#	Code	S [-]	#	Name
	11	2	0,01	c1	200		S'1	0		deklaag
1	4	7	135	T1	945	a	S1	0,023938	c	WVPI
	3,99	0,01	0,01	c2	1		S'2	0		deklaag
2	-10	13,99	80	T2	1119,2	b	S2	0,00011		WVPI
	-56	46	0,0092	c3	5000		S'3	0		SDL

Figuur 54: Waargenomen en berekende verlagingen en verhogingen van stijghoogte in peilbuis MB03 [13]; 's Gravenwaard

In Tabel 7 zijn voor verschillende grondsoorten inschattingen gegeven van de horizontale en verticale doorlatendheden. De inschattingen zijn gemaakt op basis van informatie uit het Gwz2011 en de resultaten van de beschikbare HPT-MPT sonderingen en de pompproef, rekening houdend met de betrouwbaarheid van de metingen. De resultaten van de pompproef zijn gebruikt voor de verhoudingen tussen de doorlatendheden van de verschillende typen zand en grind. Voor de doorlatendheid van grind is een gemiddelde waarde voor fijn grind aangehouden.

Tabel 7: Inschattingen horizontale en verticale doorlatendheden; 's Gravenwaard

Grondsoort	Horizontale doorlatendheid volgens Gwz2011 [m/d]	Horizontale doorlatendheid op basis van HPT/MPT [m/d]	Horizontale doorlatendheid (inschatting) [m/d]	Verticale doorlatendheid (inschatting) [m/d]	Anisotropie (inschatting) [-]
Organisch	0.0001-0.01	N/A	0.001	0.001	1
Klei	0.0001-0.01	<1	0.008	0.008	1
Kleiig zand	0.05	<1	0.05	0.05	1
Zand, fijn	1-10	20	20	7	3
Zand, midden	10-30	40	40	14	3
Zand, grof	30-200	100-120	120	40	3
Grind	1000-100000	N/A	1500	500	3

Pannerden-Kandia

De doorlatendheid van de zandlaag op basis van de SOS segmenten is gegeven in Figuur 55. Voor het traject Pannerden-Kandia zijn de SOS segment 48008, 48009 en 48010 van toepassing. Volgens scenario's 48008_1D1, 48008_1D2, 48008_1D3, 48008_1D4, 48008_1D5, 48008_1D6, 48009_1D1, 48009_1D2, 48009_1D3, 48009_1D4, 48010_1D1 en 48010_1D3 is de doorlatendheid van de zandlaag gelijk aan 100 m/d.⁵ Volgens scenario 48010_1D2 is de doorlatendheid van de zandlaag gelijk aan 16 m/d.

In het kader van POV piping zijn 2 HPT-sonderingen uitgevoerd: HPT48_146+50D ter plaatse van de binnenteen nabij dp 147 en HPT48_148C in de kruin bij dp 148. Bij beide sonderingen zijn MPT mini-pompproeven uitgevoerd in het holocene zand van de Formatie van Echteld (HLC), in de Formatie van Kreftenheye (KRE) en in de overgangszone tussen de Formatie van Kreftenheye en het Lagenpakket van Twello (KT1).

Tabel 8: Gegevens en resultaten MPT-minipompproeven; Pannerden-Kandia

Locatie	Maaiveld [m+NAP]	Conuspunt [m+NAP]	Formatie	Doorlatendheid [m/d]	Opmerkingen
146+50D	12.54	6.94	HLC	69	-
146+50D	12.54	-0.05	KRE	±150	Hoge doorlatendheid, ca. 150 m/d.
146+50D	12.54	-6.06	KT1	52	-
148C	16.66	6.96	HLC	33	-
148C	16.66	-0.04	KRE	>150	Doorlatendheid groter dan 150 m/d.
148C	16.66	-6.04	KT1	-	Afwijkend gedrag, mogelijk door kleilagen.

⁵ Volgens scenari's 48008_1D4, 48008_1D5 en 48008_1D6 is een matig doorlatende zandlaag aanwezig beneden NAP -19.8 m. In deze proefvoetsing worden de zandlagen beneden NAP -19.8 m als slecht doorlatend beschouwd.

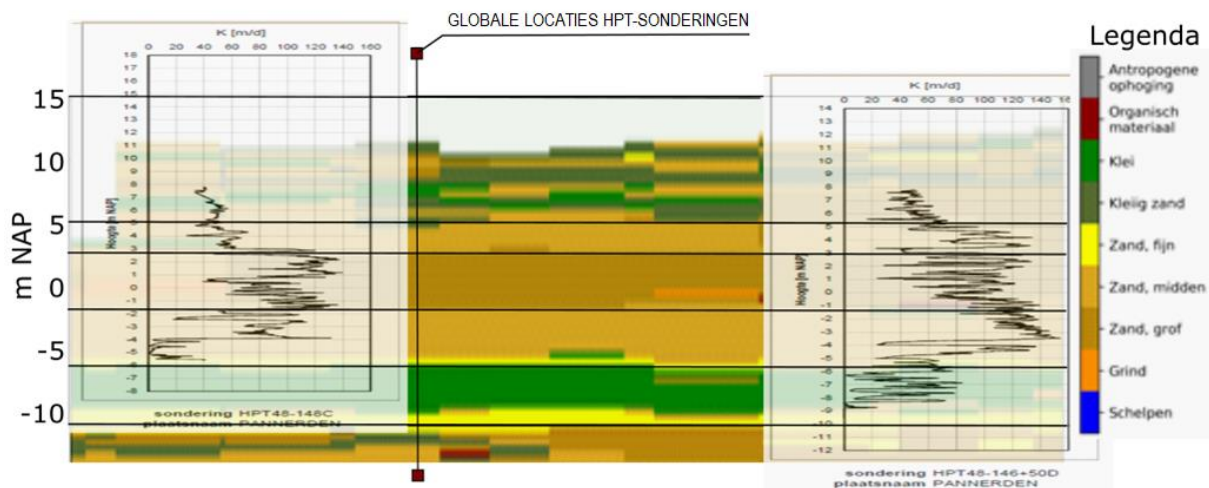
soilprofile_id	top_level	soil_name	max-d	min-d	k-mean
Segment_48008_1D1	10.5	11068_H_Rk_k	10.5	10.5	
Segment_48008_1D1	9	11072_P_Rg_zg	10	8	100
Segment_48008_1D1	-8	11073_P_Ova_sd	-7	-9	
Segment_48008_1D1	-10	11075_P_Rg_zm	-9	-11	100
Segment_48008_1D1	-19.8	11075_P_Rg_zm			10
Segment_48008_1D1	-25	11076_P_Gs_zg	-22	-28	10
Segment_48008_1D2	10.5	11069_H_Ro_z&k	10.5	10.5	16
Segment_48008_1D2	6	11070_H_Rk_vk	6.5	5.5	
Segment_48008_1D2	5.5	11072_P_Rg_zg	6	5	100
Segment_48008_1D2	-8	11073_P_Ova_sd	-7	-9	
Segment_48008_1D2	-10	11075_P_Rg_zm	-9	-11	100
Segment_48008_1D2	-19.8	11075_P_Rg_zm			10
Segment_48008_1D2	-25	11076_P_Gs_zg	-22	-28	10
Segment_48008_1D3	10.5	11071_H_Rk_k	10.5	10.5	
Segment_48008_1D3	6.5	11072_P_Rg_zg	7.5	5.5	100
Segment_48008_1D3	-8	11073_P_Ova_sd	-7	-9	
Segment_48008_1D3	-10	11075_P_Rg_zm	-9	-11	100
Segment_48008_1D3	-19.8	11075_P_Rg_zm			10
Segment_48008_1D3	-25	11076_P_Gs_zg	-22	-28	10
Segment_48008_1D4	10.5	11068_H_Rk_k	10.5	10.5	
Segment_48008_1D4	9	11074_P_Rg_zg	10	8	100
Segment_48008_1D4	-14	11075_P_Rg_zm	-12	-16	100
Segment_48008_1D4	-19.8	11075_P_Rg_zm			10
Segment_48008_1D4	-25	11076_P_Gs_zg	-22	-28	10
Segment_48008_1D5	10.5	11069_H_Ro_z&k	10.5	10.5	16
Segment_48008_1D5	6	11070_H_Rk_vk	6.5	5.5	
Segment_48008_1D5	5.5	11074_P_Rg_zg	6	5	100
Segment_48008_1D5	-14	11075_P_Rg_zm	-12	-16	100
Segment_48008_1D5	-19.8	11075_P_Rg_zm			10
Segment_48008_1D5	-25	11076_P_Gs_zg	-22	-28	10
Segment_48008_1D6	10.5	11071_H_Rk_k	10.5	10.5	
Segment_48008_1D6	6.5	11074_P_Rg_zg	7.5	5.5	100
Segment_48008_1D6	-14	11075_P_Rg_zm	-12	-16	100
Segment_48008_1D6	-19.8	11075_P_Rg_zm			10
Segment_48008_1D6	-25	11076_P_Gs_zg	-22	-28	10
Segment_48009_1D1	11	11079_H_Rk_k	11	11	
Segment_48009_1D1	9	11081_P_Rg_zm	10	8	100
Segment_48009_1D1	-8	11082_P_Ova_sd	-7	-9	
Segment_48009_1D1	-10	11083_P_Rg_zm	-9	-11	100
Segment_48009_1D1	-20	11085_P_Ova_sd	-18	-22	
Segment_48009_1D2	11	11080_H_Rk_k	11	11	
Segment_48009_1D2	6.5	11081_P_Rg_zm	7.5	5.5	100
Segment_48009_1D2	-8	11082_P_Ova_sd	-7	-9	
Segment_48009_1D2	-10	11083_P_Rg_zm	-9	-11	100
Segment_48009_1D2	-20	11085_P_Ova_sd	-18	-22	
Segment_48009_1D3	11	11079_H_Rk_k	11	11	
Segment_48009_1D3	9	11084_P_Rg_zm	10	8	100
Segment_48009_1D3	-20	11085_P_Ova_sd	-18	-22	
Segment_48009_1D4	11	11080_H_Rk_k	11	11	
Segment_48009_1D4	6.5	11084_P_Rg_zm	7.5	5.5	100
Segment_48009_1D4	-20	11085_P_Ova_sd	-18	-22	
Segment_48010_1D1	11.5	11088_H_Rk_k	11.5	11.5	
Segment_48010_1D1	9	11092_P_Rg_zg	10	8	100
Segment_48010_1D1	-10	11093_P_Ova_sd	-8	-12	
Segment_48010_1D2	11.5	11089_H_Ro_z&k	11.5	11.5	16
Segment_48010_1D2	6	11090_H_Rk_vk	6.5	5.5	
Segment_48010_1D2	5.5	11092_P_Rg_zg	6	5	100
Segment_48010_1D2	-10	11093_P_Ova_sd	-8	-12	
Segment_48010_1D3	11.5	11091_H_Rk_k	11.5	11.5	
Segment_48010_1D3	6.5	11092_P_Rg_zg	7.5	5.5	100
Segment_48010_1D3	-10	11093_P_Ova_sd	-8	-12	

Figuur 55: Doorlatendheid zandlaag op basis van SOS segmenten; Pannerden-Kandia

De resultaten van de HPT-MPT sonderingen zijn gegeven in Figuur 60 en Figuur 61. De gegevens en resultaten van de MPT-minipompproeven zijn samengevat in Tabel 8. De doorlatendheid op basis van de HPT-MPT sonderingen en de doorlatendheid op basis van de MPT-minipompproeven zijn van vergelijkbare orde grootte, hoewel de exacte waarden wel enigszins van elkaar afwijken.

Ondanks het begrensde bereik van het meetsysteem en het geringe aantal proeven kan worden geconcludeerd dat de doorlatendheid van het zand van de Formatie van Kreftenheye overwegend zeer hoog (100-150 m/d) is [14].

In Tabel 9 zijn voor verschillende grondsoorten inschattingen gegeven van de doorlatendheid. Hiervoor zijn de resultaten van de HPT-MPT sonderingen vergeleken met de bodemopbouw op basis van GeoTOP voor dwarsprofiel dp 147+000 (Figuur 56). Daarbij is aan iedere lithoklasse een gemiddelde waarde van de op de betrokken hoogte gemeten doorlatendheid toegekend. Zoals toegelicht bij Figuur 53 komen de resultaten van de HPT-MPT sonderingen grotendeels overeen met de lagen en doorlatendheidsvariatie die verwacht wordt op basis van GeoTOP.



Figuur 56: Doorlatendheid op basis van HPT-MPT sonderingen versus bodemopbouw op basis van GeoTOP; Pannerden-Kandia

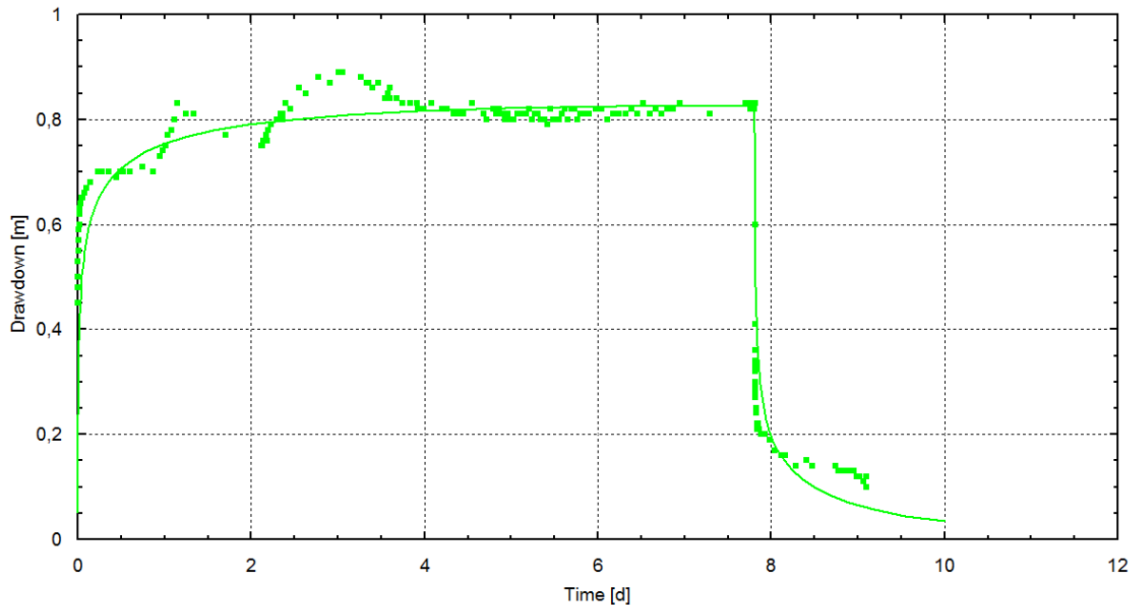
In het kader van POV piping is een pompproef uitgevoerd ter plaatse van dp 149. De pompproef is uitgevoerd met een bronpomp in het eerste watervoerend pakket en waarnemingsbuizen op 7 m en 25 m afstand tot de bronpomp. Er is gedurende ongeveer 1 week water onttrokken. Het debiet is constant gehouden op 90 m³/h. De stijghoogten in de waarnemingsbuizen zijn met een interval van eenmaal per minuut gemeten. Ten behoeve van de analyse van de resultaten van de pompproef is voor de deklaag uitgegaan van een doorlatendheid van 0.006 m/d. Voor de onderkant van de deklaag is NAP +5 m aangehouden. Voor de onderkant van het eerste watervoerend pakket is NAP -7 m aangehouden. Tussen het eerste watervoerende pakket en het tweede watervoerende pakket bevindt zich een scheidende kleilaag. Voor de dikte en doorlatendheid van de scheidende laag zijn respectievelijk 3 m en 0.03 m/d aangehouden. Voor de onderkant van het tweede watervoerend pakket is NAP -25 m aangehouden.

Waargenomen en berekende verlagingen en verhogingen van de stijghoogte in peilbuis MB02 zijn gegeven in Figuur 57. Op basis van de resultaten van de pompproef zijn in [4] de volgende conclusies getrokken:

- De doorlatendheid van de grondlagen varieert volgens de korrelgrootteverdelingen tussen ca. 50 m/d en 100 m/d.

- Het doorlaatvermogen van het eerste watervoerend pakket is afgeleid op ca. 1500 m²/d (overeenkomend met een doorlatendheid van ca. 125 m/d). Deze waarde komt overeen met de verwachting vanuit de literatuur en de afleiding van de doorlatendheid van de grondlagen uit de korrelgrootteverdelingen.

Opgemerkt moet worden dat de in berekeningen gehanteerde weerstand van de scheidende laag tussen NAP -7 m en NAP -10 m en het doorlaatvermogen van het tweede watervoerend pakket slechts inschattingen zijn, terwijl beide van invloed zijn op de bepaling van het doorlaatvermogen van het pakket waaruit is onttrokken.



Layers		Boundary conditions	
Number of aquifers	2	<input checked="" type="checkbox"/> Top aquitard present	<input type="checkbox"/> Impervious <input checked="" type="checkbox"/> Leaky
Top layer elevation	11	<input checked="" type="checkbox"/> Bottom aquitard present	<input checked="" type="checkbox"/> Impervious <input type="checkbox"/> Leaky

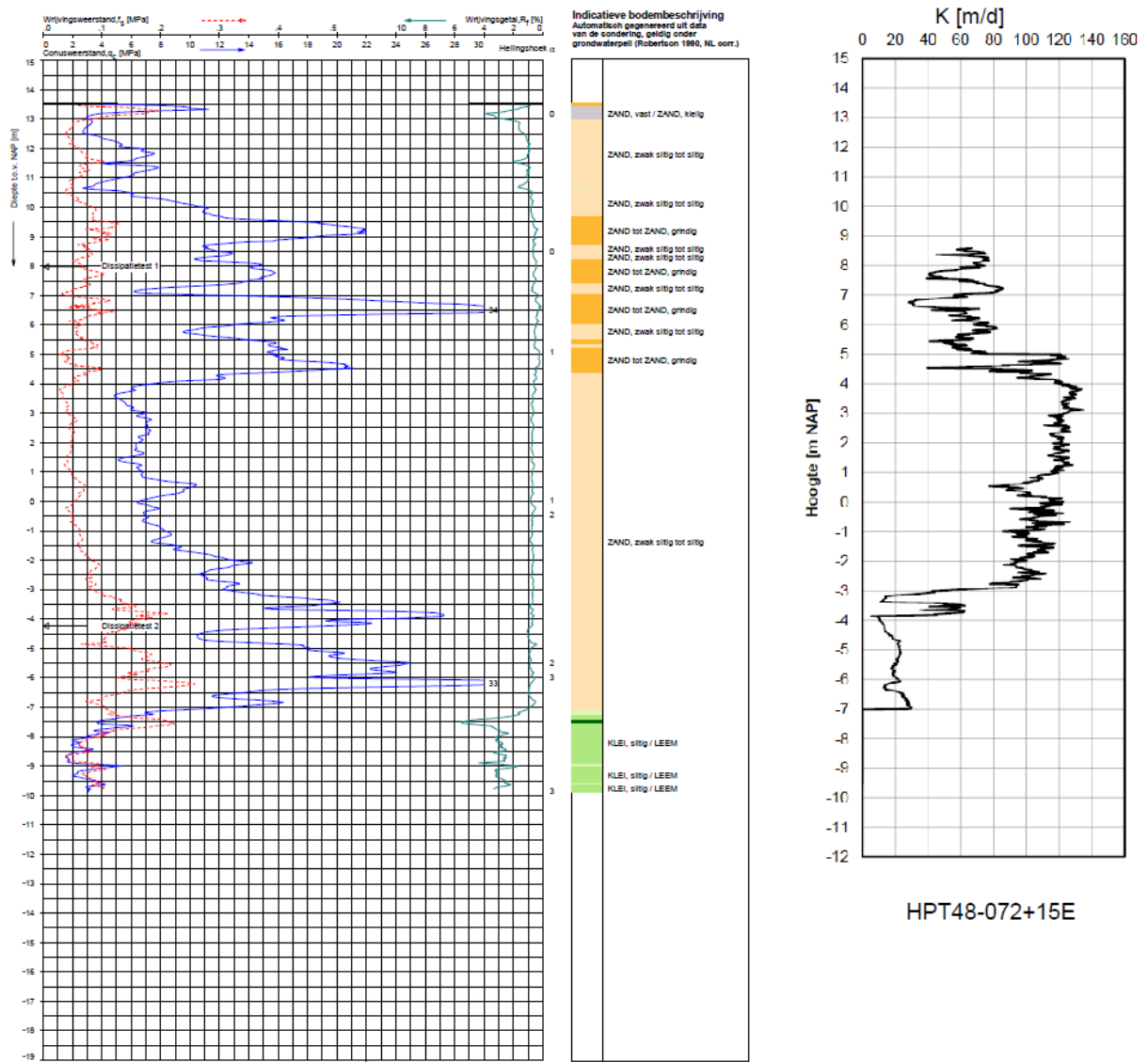
Aquifer	Base [m]	Thickness [m]	Kv [m/d]	Code	c [d]	#	Code	S' [-]	#	Name
	5	6	0,006	c1	1000		S'1	0		deklaag
1	-7	12	123,9444	T1	1487,333	a	S1	0,003055	c	WVPI
	-10	3	0,03	c2	100		S'2	0		deklaag
2	-17	7	100	T2	700		S2	0,00056		WVPI
	-25	8	0,0016	c3	5000		S'3	0		SDL

Figuur 57: Waargenomen en berekende verlagingen en verhogingen van stijghoogte in peilbuis MB02 ter plaatse van dp 149 [4]; Pannerden-Kandia

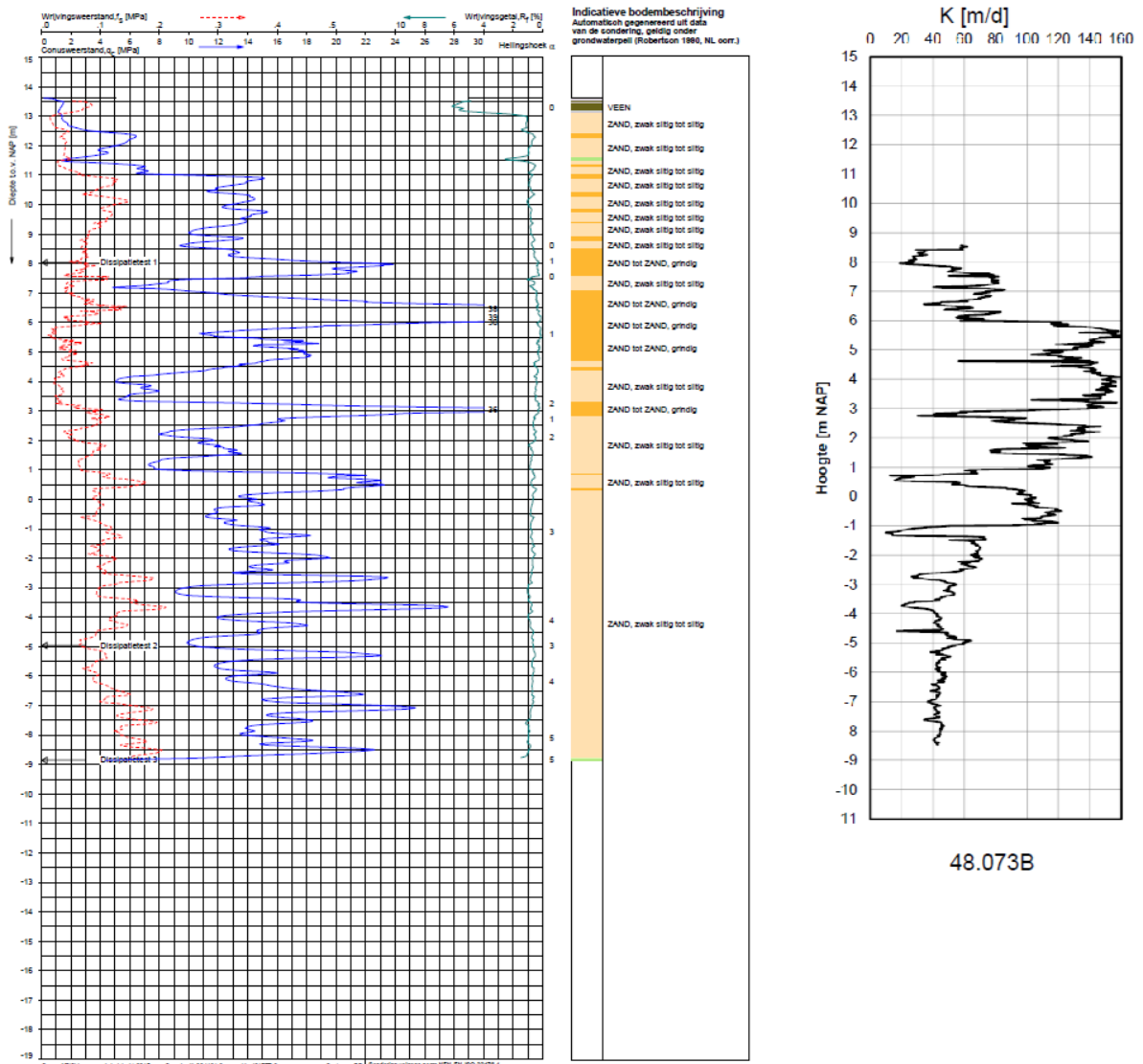
In Tabel 9 zijn voor verschillende grondsoorten inschattingen gegeven van de horizontale en verticale doorlatendheden. De inschattingen zijn gemaakt op basis van informatie uit het Gwz2011 en de resultaten van de beschikbare HPT-MPT sonderingen en de pompproef, rekening houdend met de betrouwbaarheid van de metingen. De resultaten van de pompproef zijn gebruikt voor de verhoudingen tussen de doorlatendheden van de verschillende typen zand en grind. Voor de doorlatendheid van grind is een gemiddelde waarde voor fijn grind aangehouden.

Tabel 9: Inschattingen horizontale en verticale doorlatendheden; Pannerden-Kandia

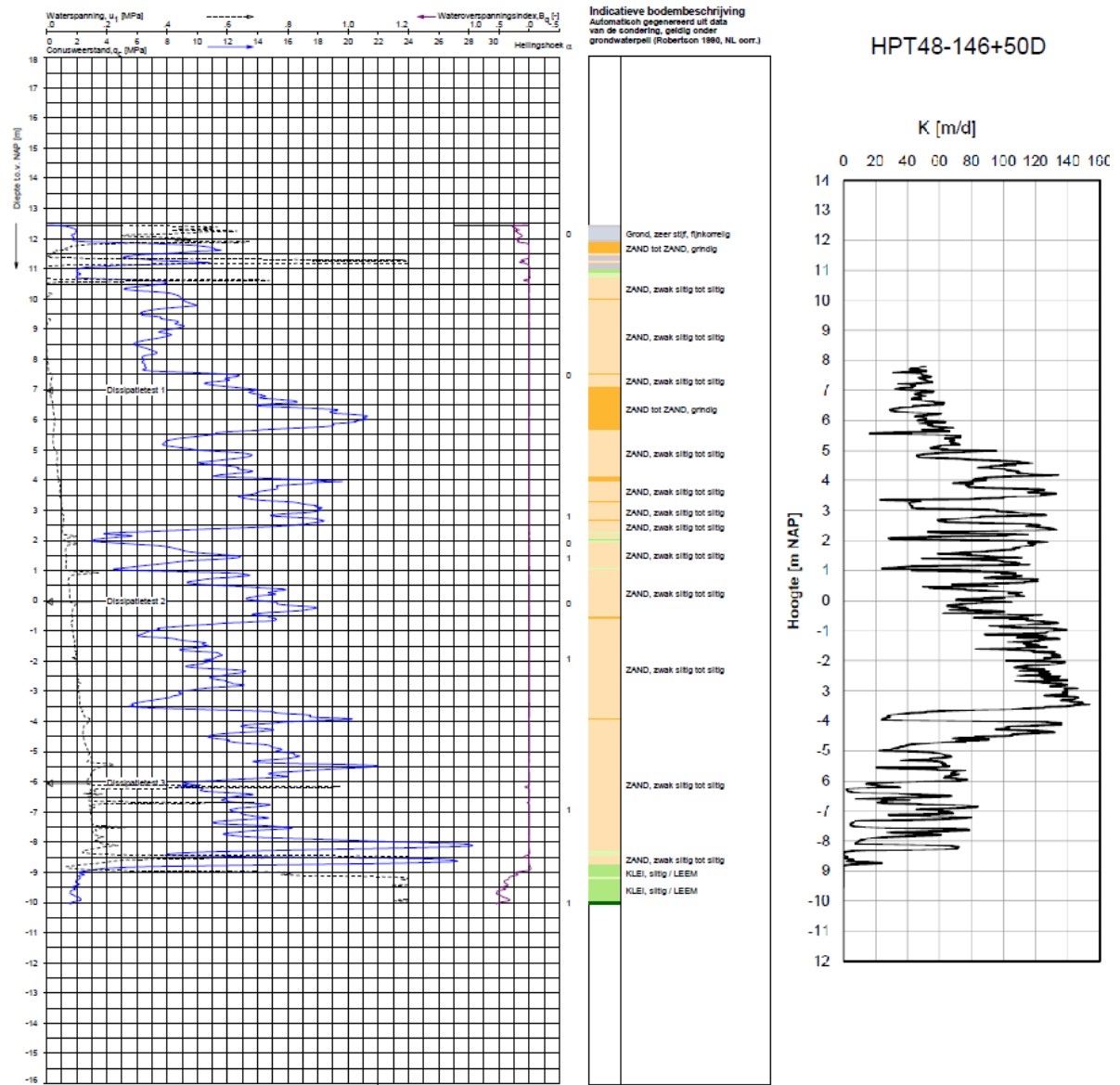
Grondsoort	Horizontale doorlatendheid volgens Gwz2011 [m/d]	Horizontale doorlatendheid op basis van HPT/MPT [m/d]	Horizontale doorlatendheid (inschatting) [m/d]	Verticale doorlatendheid (inschatting) [m/d]	Anisotropie (inschatting) [-]
Organisch	0.0001-0.01	N/A	0.001	0.001	1
Klei	0.0001-0.01	<1	0.008	0.008	1
Kleiig zand	0.05	<1	0.05	0.05	1
Zand, fijn	1-10	20	20	7	3
Zand, midden	10-30	60	60	20	3
Zand, grof	30-200	120	130	44	3
Grind	1000-100000	N/A	1500	500	3



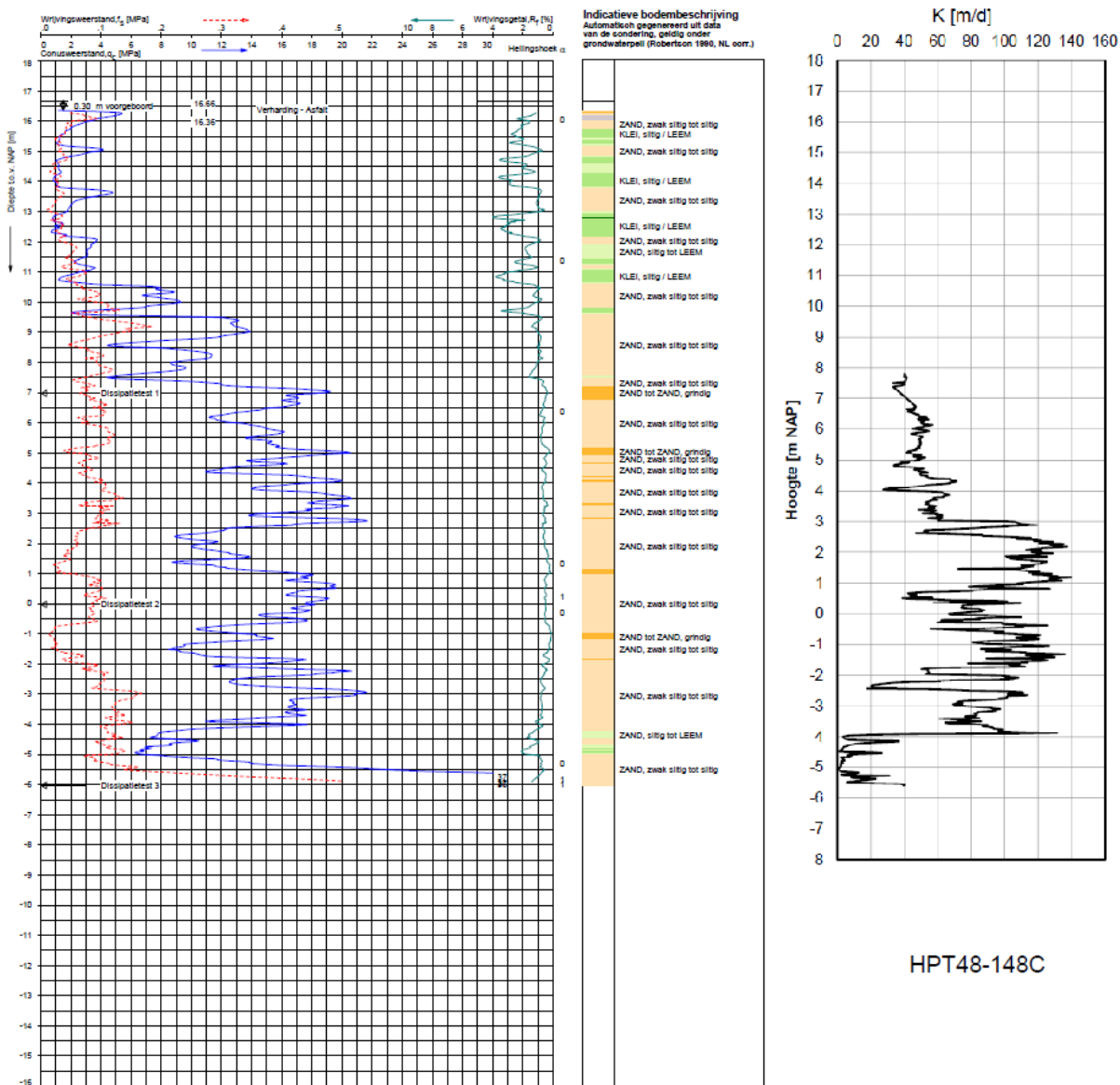
Figuur 58: Resultaten HPT48-072+15E; 's Gravenwaard



Figuur 59: Resultaten HPT48-073B; 's Gravenwaard



Figuur 60: Resultaten HPT48-146+50D; Pannerden-Kandia



Figuur 61: Resultaten HPT48-148C; Pannerden-Kandia

5 Vakindeling

5.1 Bepaling vakgrenzen

Om in te kunnen schatten in hoeverre sloten en open water in het achterland van belang zijn voor de vakindeling zijn verkennende opbarst-, heave- en pipingberekeningen uitgevoerd. De kritieke kwelweglengte is berekend met de toetsregel Sellmeijer 2 (vigerende rekenregel conform Sellmeijer (2011)).

De uiteindelijke vakindeling is zodanig gekozen dat het traject is opgedeeld in vakken met uniforme geometrie en ondergrond. De indeling is gemaakt op basis van variaties in geometrie (aanwezigheid van sloten of open water, aanwezige kwelweglengte en hoogte van het maaiveld) en variaties in ondergrond (dikte van de deklaag, en aard en samenstelling van het watervoerend pakket). Voor wat betreft de invloed van sloten en open water is rekening gehouden met de resultaten van bovengenoemde berekeningen.

's Gravenwaard

In de verkennende berekeningen voor het traject 's Gravenwaard zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Hoogte maaiveld = NAP +13.30 m (gemiddelde waarde op basis van hoogtegegevens).
- Niveau buitenwaterstand = NAP +17.02 m (hoogste ondergrenswaarde).⁶
- Freatisch niveau = hoogte maaiveld.
- Dempingsfactor = 1.
- Nat volumiek gewicht deklaag = 17 kN/m³.
- Hoogte onderkant zandpakket = NAP -11 m (op basis van SOS segment 48011_1D1).
- Korreldiameter $D_{70} = 375 \mu\text{m}$ (karakteristieke waarde op basis van SOS segment 48011_1D1).
- Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag = 195 m/d (karakteristieke waarde op basis van SOS segment 48001_1D1).

In het achterland komen sloten voor met een bodembreedte variërend van 0.3 m tot 1.5 m en een bodemhoogte variërend van NAP +9.7 m tot NAP +12.3 m. De hoogte van de onderkant van de deklaag ligt tussen NAP +7 m en NAP +13 m (op basis van beschikbare boringen en sonderingen).

De berekeningen zijn uitgevoerd voor situaties zonder sloot, situaties met een diepe sloot (met een bodemhoogte van NAP +9.7 m), situaties met matig diepe sloot (met een bodemhoogte van NAP +11.0 m) en situaties met een ondiepe sloot (met een bodemhoogte van NAP +12.3 m). De hoogte van de onderkant van de deklaag is gevarieerd tussen NAP +12.0 m en NAP +7.0 m.

Het verband tussen de hoogte van de onderkant van de deklaag en de opdrukveiligheid is gegeven in Figuur 62 en Figuur 63. Daar waar de onderkant van de deklaag beneden NAP +8.0 m ligt geldt voor situaties zonder sloot en situaties met een ondiepe sloot een opdrukveiligheid groter dan 1. Voor situaties met een matig diepe tot diepe sloot is de opdrukveiligheid kleiner dan 1. Indien een veiligheidsfactor van 1.75 wordt toegepast, is de opdrukveiligheid kleiner dan 1, ongeacht of er zich binnendijks een sloot bevindt.

Het verband tussen de hoogte van de onderkant van de deklaag en de veiligheid tegen heave is gegeven in Figuur 64 en Figuur 65. Zowel met als zonder veiligheidsfactor is de veiligheid tegen heave kleiner dan 1, ongeacht of er zich binnendijks een sloot bevindt.

⁶ De ondergrenswaarde op het traject 's Gravenwaard varieert van NAP +17.02 tot NAP +16.90 m.

Het verband tussen de hoogte van de onderkant van de deklaag en de (effectieve) dikte van de deklaag is gegeven in Figuur 66. Er wordt gesteld dat er geen opbarsten optreedt bij een (effectieve) dikte van de deklaag groter dan 4 m.

Het verband tussen de hoogte van de onderkant van de deklaag en de kritieke kwelweglengte is gegeven in Figuur 67. Voor situaties zonder sloot bedraagt de kritieke kwelweglengte ca. 60-130 m te zijn, afhankelijk van de dikte van de deklaag. Voor situaties met een diepe sloot bedraagt de kritieke kwelweglengte ca. 100-145 m te zijn, afhankelijk van de dikte van de deklaag. Als uittreepunt kunnen sloten maatgevend zijn boven locaties waar geen open water aanwezig is en die zich tot ca. 45 m dichter bij de dijk bevinden. De buitenteen ligt gemiddeld ca. 25 m buitendijks. Sloten tot ca. 120 m binnendijks kunnen daarom van belang zijn bij het bepalen van de vakindeling.

De uiteindelijke vakindeling voor het traject 's Gravenwaard is gegeven in Tabel 10.

Tabel 10: Vakindeling; 's Gravenwaard

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Achtergrond vakindeling geometrie	Achtergrond vakindeling ondergrond
GRA_V1	57+000	63+050	Geen sloot binnendijks.	Grof zand en grind beneden deklaag, fijn zand beneden NAP +0 m, klei beneden NAP -12 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48011 van toepassing.
GRA_V2	63+050	73+050	Geen sloot binnendijks.	Matig grof zand en fijn zand beneden deklaag, fijn zand beneden NAP +0 m, klei beneden NAP -12 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48011 van toepassing.
GRA_V3	73+050	77+000	Sloot binnendijks.	Grof zand en grind beneden deklaag, matig grof zand beneden NAP +0 m, zand beneden NAP -12 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48011 van toepassing. Kruising met oude rivier ter hoogte van dp 75 (op basis van zandbanenkaart).
GRA_V4	77+000	81+000	Sloot binnendijks.	Grof zand en grind beneden deklaag, matig grof zand beneden NAP +0 m, klei beneden NAP -12 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48011 van toepassing. Dunne deklaag (op basis van zandbanenkaart).
GRA_V5	81+000	86+080	Sloot binnendijks.	Klei, grof zand en grind beneden deklaag, matig grof zand beneden NAP +0 m, klei beneden NAP -12 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48011 van toepassing. Dunne deklaag (op basis van zandbanenkaart).
GRA_V6	86+080	88+080	Sloot binnendijks.	
GRA_V7	88+080	89+050	Sloot binnendijks, op grote afstand van binnenteen.	Grof zand en grind beneden deklaag, matig grof zand beneden NAP +0 m, klei beneden NAP -12 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48011 van toepassing.
GRA_V8	89+050	91+065	Sloot binnendijks, op grote afstand van binnenteen. Dikke deklaag.	Grof zand en grind beneden deklaag, matig grof zand beneden NAP +0 m, klei beneden NAP -12 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48011 van toepassing. Dikke deklaag (op basis van grondonderzoeken en zandbanenkaart).
GRA_V9	91+065	96+020	Sloot binnendijks, op grote afstand van binnenteen. Laag maaiveld. Dikke deklaag.	

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Achtergrond vakindeling geometrie	Achtergrond vakindeling ondergrond
GRA_V10	96+020	105+040	Sloot binnendijks. Laag maaiveld.	Grof zand en grind beneden deklaag, matig grof zand beneden NAP +0 m, klei beneden NAP -12 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48011 van toepassing.
GRA_V11	105+040	107+000	Geen sloot binnendijks. Laag maaiveld.	Grof zand en grind beneden deklaag, matig grof zand beneden NAP +0 m, zand beneden NAP -12 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48011 van toepassing.

Pannerden-Kandia

In de verkennende berekeningen voor het traject Pannerden-Kandia zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Hoogte maaiveld = NAP +11.65 m (gemiddelde waarde op basis van hoogtegegevens).
- Niveau buitenwaterstand = NAP +16.12 m (hoogste ondergrenswaarde).⁷
- Freatisch niveau = hoogte maaiveld.
- Dempingsfactor = 1.
- Nat volumiek gewicht deklaag = 17 kN/m³.
- Hoogte onderkant zandpakket = NAP -8 m (op basis van SOS segment 48009_1D1).
- Korreldiameter D_{70} = 375 μ m (karakteristieke waarde op basis van SOS segment 48009_1D1).
- Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag = 195 m/d (karakteristieke waarde op basis van SOS segment 48009_1D1).

In het achterland komen sloten voor met een bodembreedte variërend van 0.6 m tot 1.7 m en een bodemhoogte variërend van NAP +9.4 m tot NAP +10.6 m. Bij dp 144-145, dp 157-158 en dp 172-173 is binnendijks open water (met onbekende bodemhoogte) aanwezig. De hoogte van de onderkant van de deklaag ligt tussen NAP +6 m en NAP +12 m (op basis van beschikbare boringen en sonderingen).

De berekeningen zijn uitgevoerd voor situaties zonder sloot, situaties met een diepe sloot (met een bodemhoogte van NAP +9.4 m), situaties met matig diepe sloot (met een bodemhoogte van NAP +10.1 m) en situaties met een ondiepe sloot (met een bodemhoogte van NAP +10.6 m). De hoogte van de onderkant van de deklaag is gevarieerd tussen NAP +11.0 m en NAP +6.0 m.

Het verband tussen de hoogte van de onderkant van de deklaag en de opdrukveiligheid is gegeven in Figuur 68 en Figuur 69. Zowel met als zonder veiligheidsfactor is de opdrukveiligheid kleiner dan 1, ongeacht of er zich binnendijks een sloot bevindt.

Het verband tussen de hoogte van de onderkant van de deklaag en de veiligheid tegen heave is gegeven in Figuur 70 en Figuur 71. Zowel met als zonder veiligheidsfactor is de veiligheid tegen heave kleiner dan 1, ongeacht of er zich binnendijks een sloot bevindt.

Het verband tussen de hoogte van de onderkant van de deklaag en de (effectieve) dikte van de deklaag is gegeven in Figuur 72. Er wordt gesteld dat er geen opbarsten optreedt bij een (effectieve) dikte van de deklaag groter dan 4 m.

⁷ De ondergrenswaarde op het traject Pannerden-Kandia varieert van NAP +16.12 m tot NAP +15.30 m.

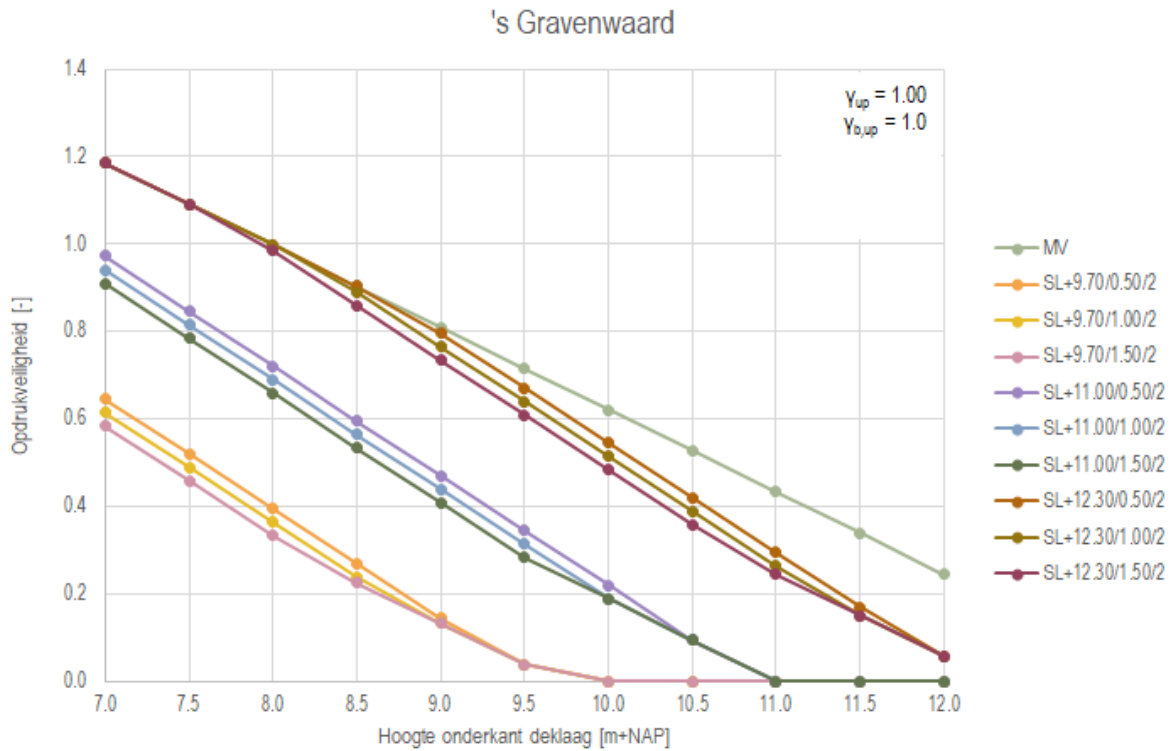
Het verband tussen de hoogte van de onderkant van de deklaag en de kritieke kwelweglengte is gegeven in Figuur 73. Voor situaties zonder sloot bedraagt de kritieke kwelweglengte ca. 95-170 m te zijn, afhankelijk van de dikte van de deklaag. Voor situaties met een diepe sloot bedraagt de kritieke kwelweglengte ca. 125-180 m te zijn, afhankelijk van de dikte van de deklaag. Als uittreepunt kunnen sloten maatgevend zijn boven locaties waar geen open water aanwezig is en die zich tot ca. 30 m dichter bij de dijk bevinden. De buitenteen ligt gemiddeld ca. 18 m buitendijks. Sloten tot ca. 160 m kunnen daarom van belang zijn bij het bepalen van de vakindeling.

Opgemerkt moet worden dat in de berekeningen voor het traject Pannerden-Kandia een groter verval over de kering wordt aangehouden dan in die voor het traject 's Gravenwaard en dat, rekening houdend met de aanzienlijke variatie in de ondergrenswaarde op het traject Pannerden-Kandia, lokaal een kleiner verval over de kering van toepassing kan zijn.

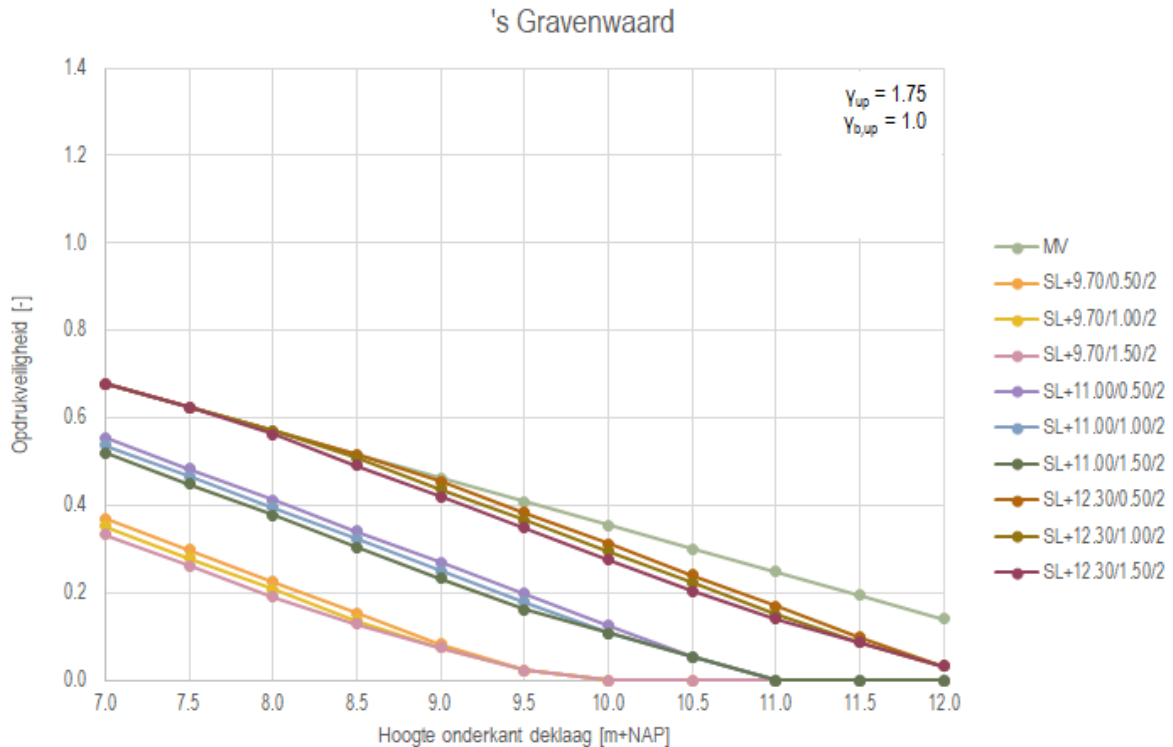
De uiteindelijke vakindeling voor het traject Pannerden-Kandia is gegeven in Tabel 11. Vak PAN_V11, waarin de waterkering de Oude Rijn kruist, wordt niet beoordeeld in deze proeftoetsing.

Tabel 11: Vakindeling; Pannerden-Kandia

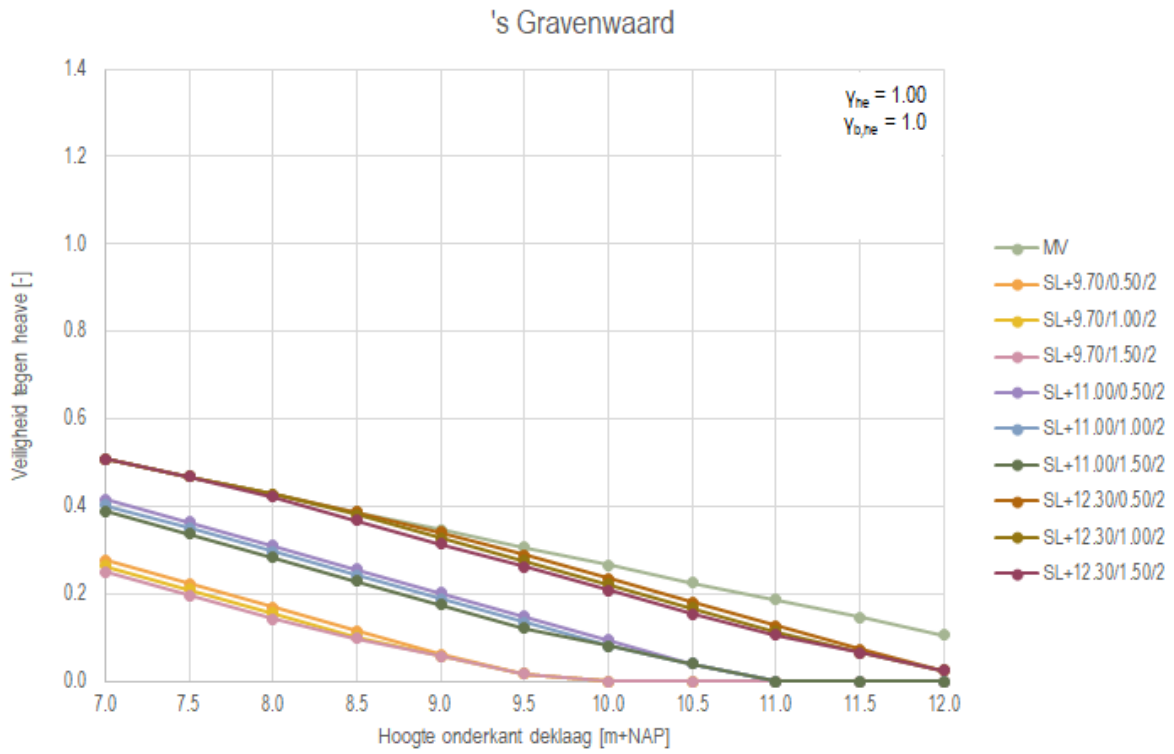
Vak ID	Begin vak	Einde vak	Achtergrond vakindeling geometrie	Achtergrond vakindeling ondergrond
PAN_V1	135+030	138+000	Geen sloot binnendijks.	Matig grof en fijn zand beneden deklaag, grind rond NAP +0 m, klei beneden NAP -5 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48010.
PAN_V2	138+000	141+010	Sloot binnendijks. Open water binnendijks.	
PAN_V3	141+010	143+060	Geen sloot binnendijks.	
PAN_V4	143+060	146+000	Sloot binnendijks. Open water binnendijks.	
PAN_V5	146+000	148+030	Geen sloot binnendijks.	
PAN_V6	148+030	156+030	Sloot binnendijks. Open water binnendijks.	
PAN_V7	156+030	157+040	Geen sloot binnendijks.	
PAN_V8	157+040	157+080	Open water binnendijks.	
PAN_V9	157+080	162+050	Geen sloot binnendijks.	
PAN_V10	162+050	168+010	Sloot binnendijks.	
PAN_V11	168+010	170+000	Kruising met Oude Rijn.	
PAN_V12	170+000	172+020	Geen sloot binnendijks.	
PAN_V13	172+020	172+080	Open water binnendijks.	
PAN_V14	172+080	174+060	Geen sloot binnendijks.	
				Matig grof en grof zand beneden deklaag, geen klei maar grof zand beneden NAP -5 m, fijn zand beneden NAP -12 m (op basis van GeoTOP). SOS segment 48008 van toepassing.



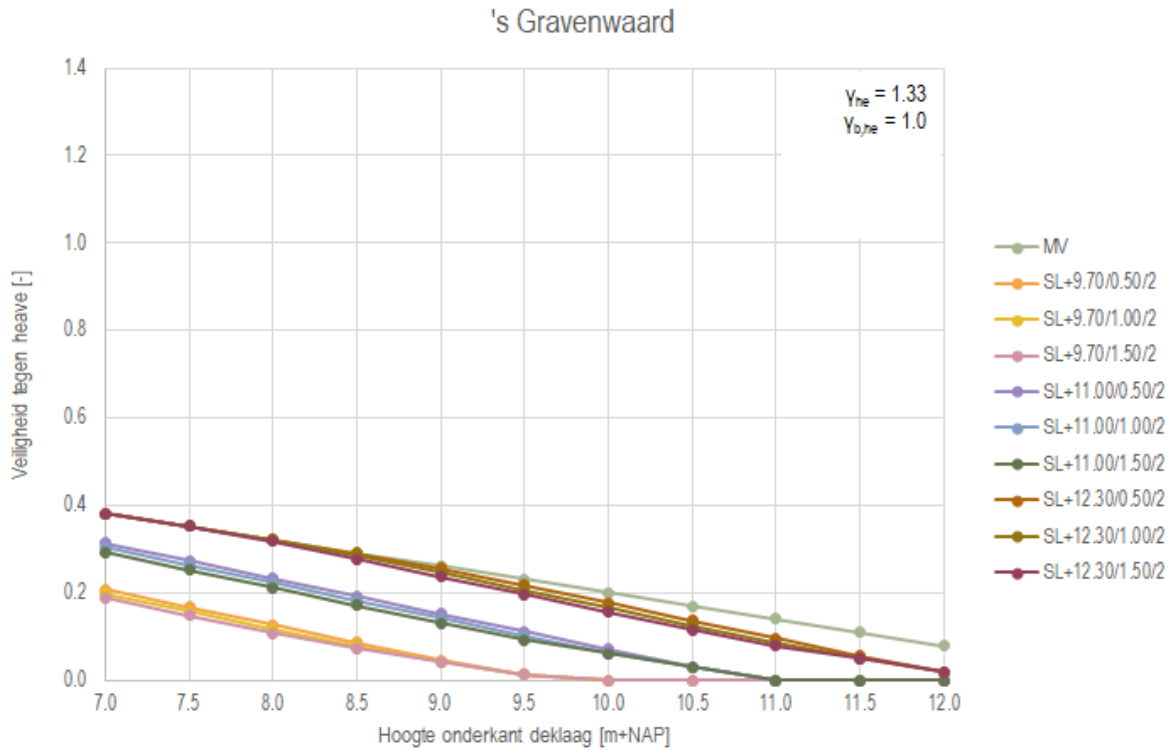
Figuur 62: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en opdrukveiligheid excl. veiligheids- en schematiseringsfactoren; 's Gravenwaard



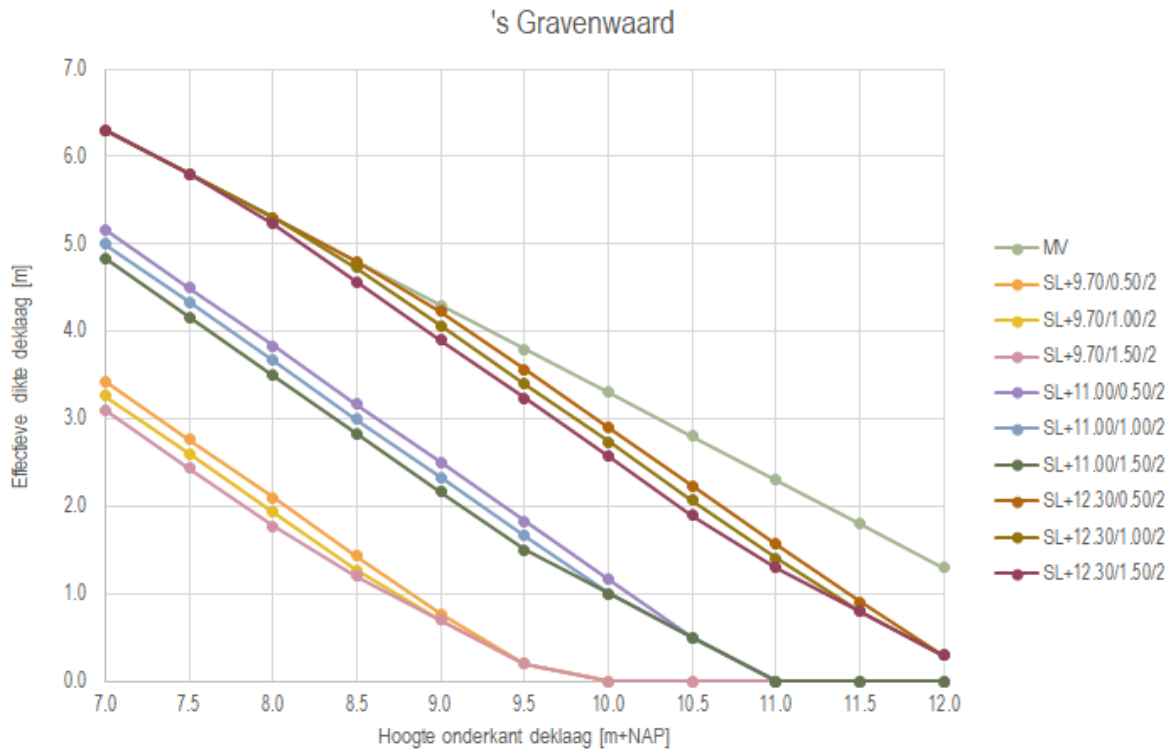
Figuur 63: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en opdrukveiligheid incl. veiligheids- en schematiseringsfactoren; 's Gravenwaard



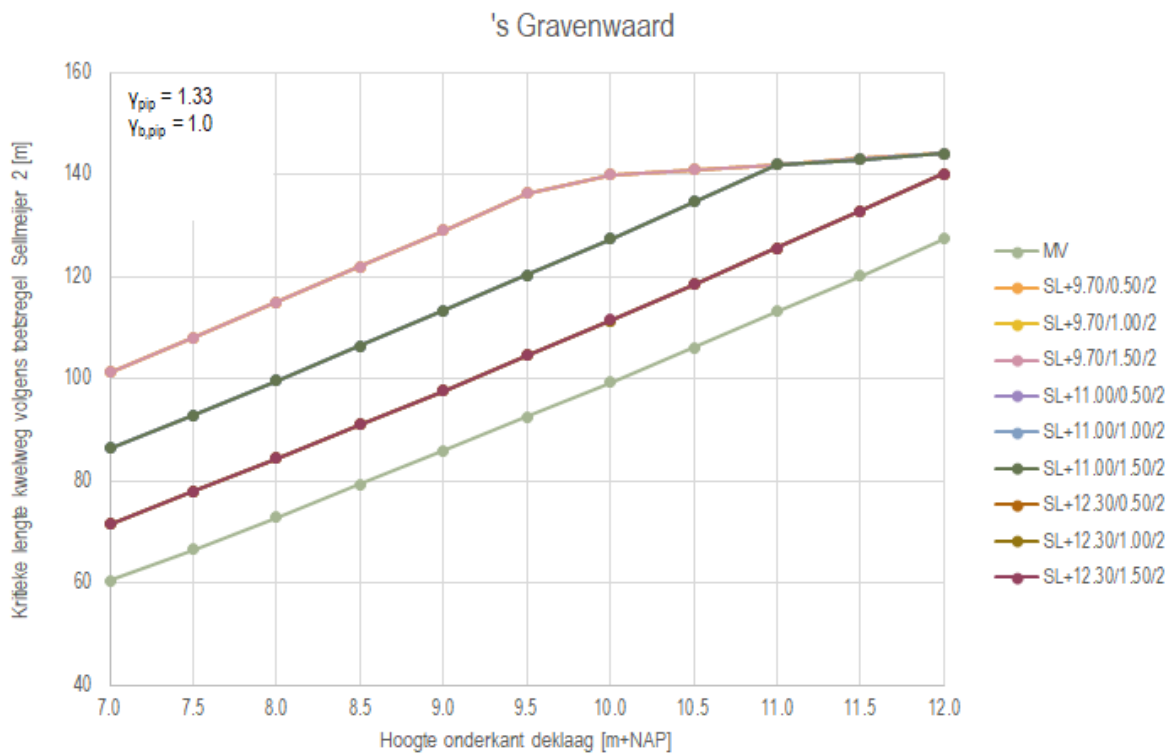
Figuur 64: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en veiligheid tegen heave excl. veiligheids- en schematiseringsfactoren; 's Gravenwaard



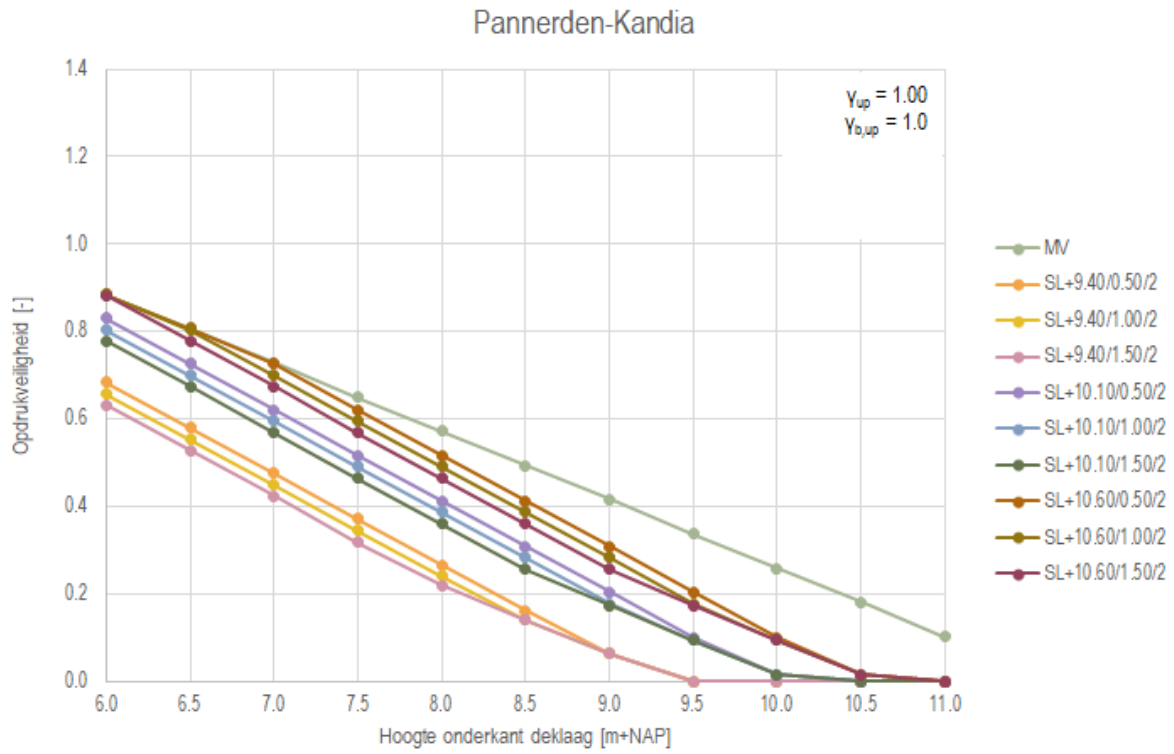
Figuur 65: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en veiligheid tegen heave incl. veiligheids- en schematiseringsfactoren; 's Gravenwaard



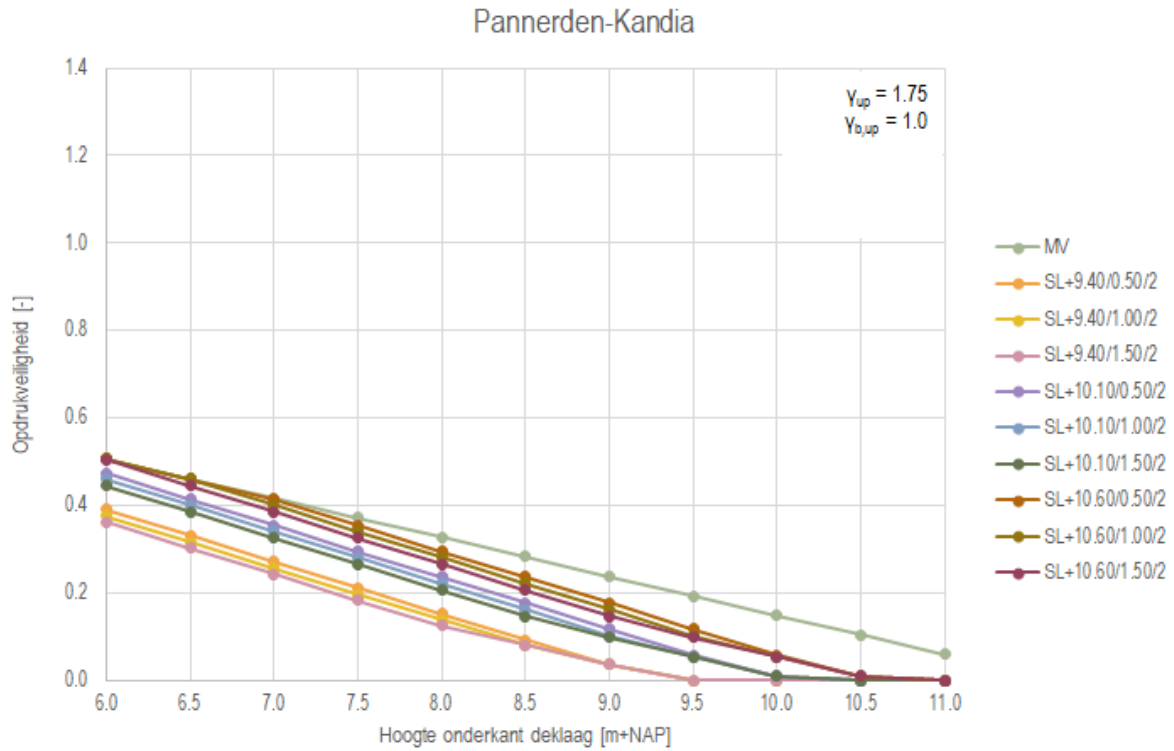
Figuur 66: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en effectieve dikte deklaag; 's Gravenwaard



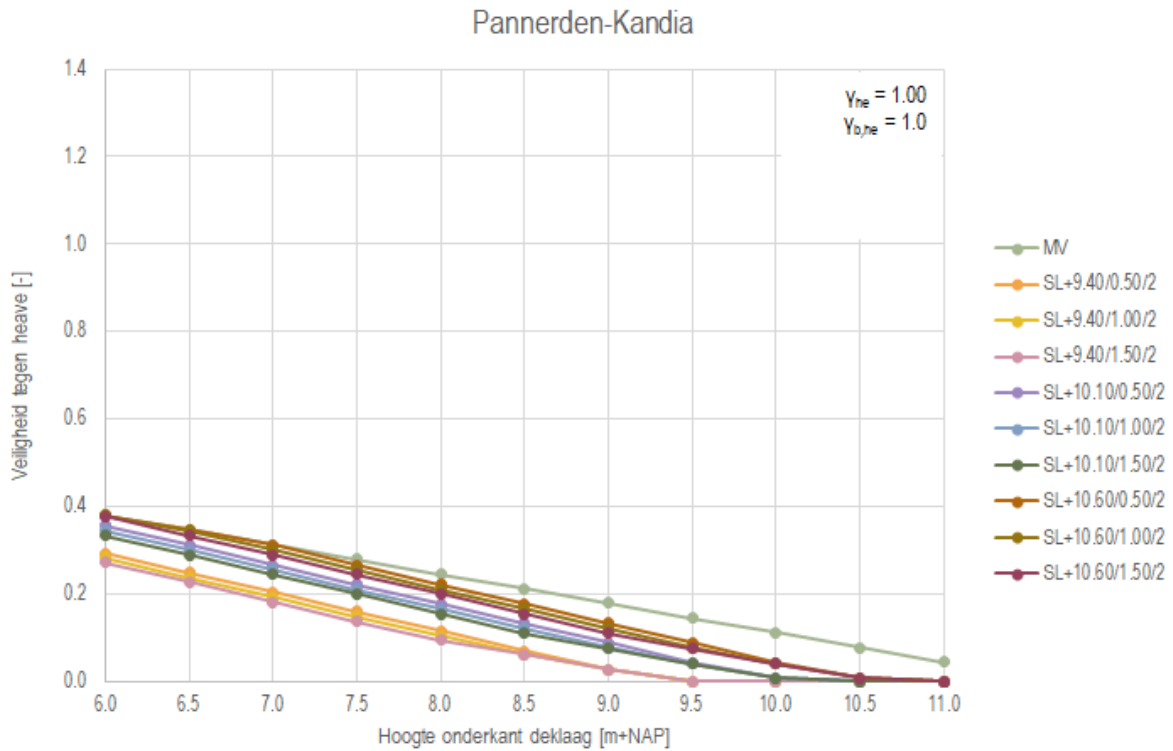
Figuur 67: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en kritieke kwelweglengte; 's Gravenwaard



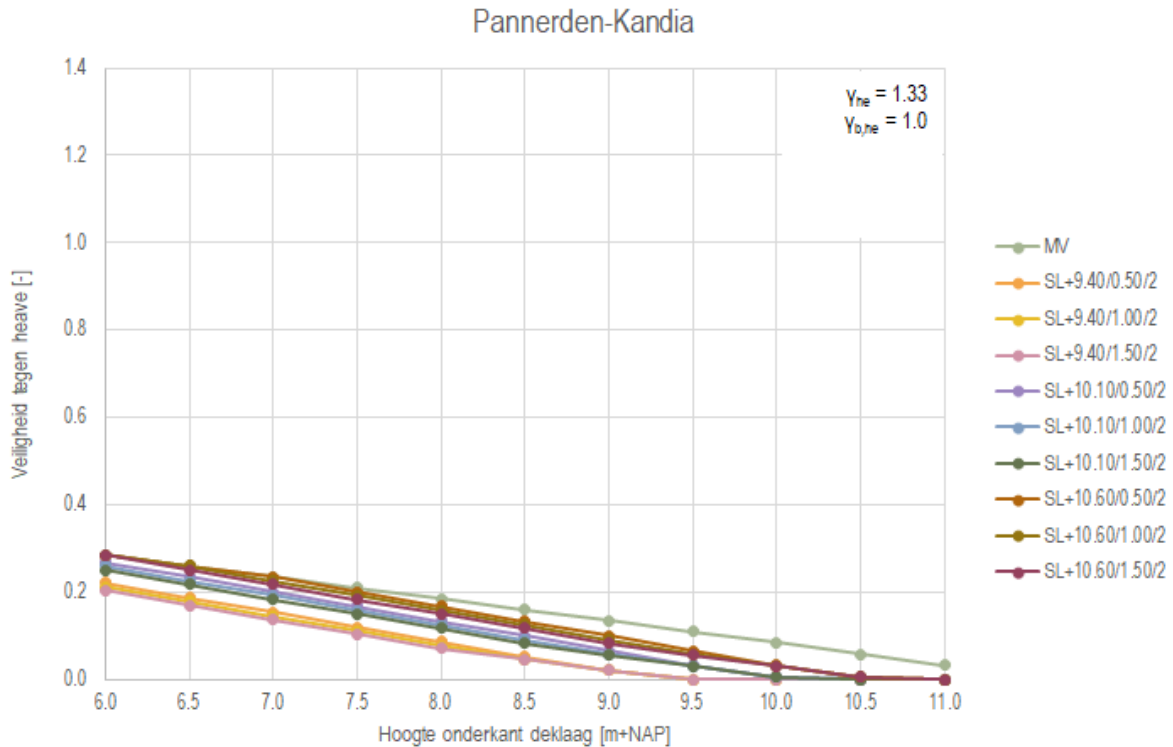
Figuur 68: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en opdrukveiligheid excl. veiligheids- en schematiseringsfactoren; Pannerden-Kandia



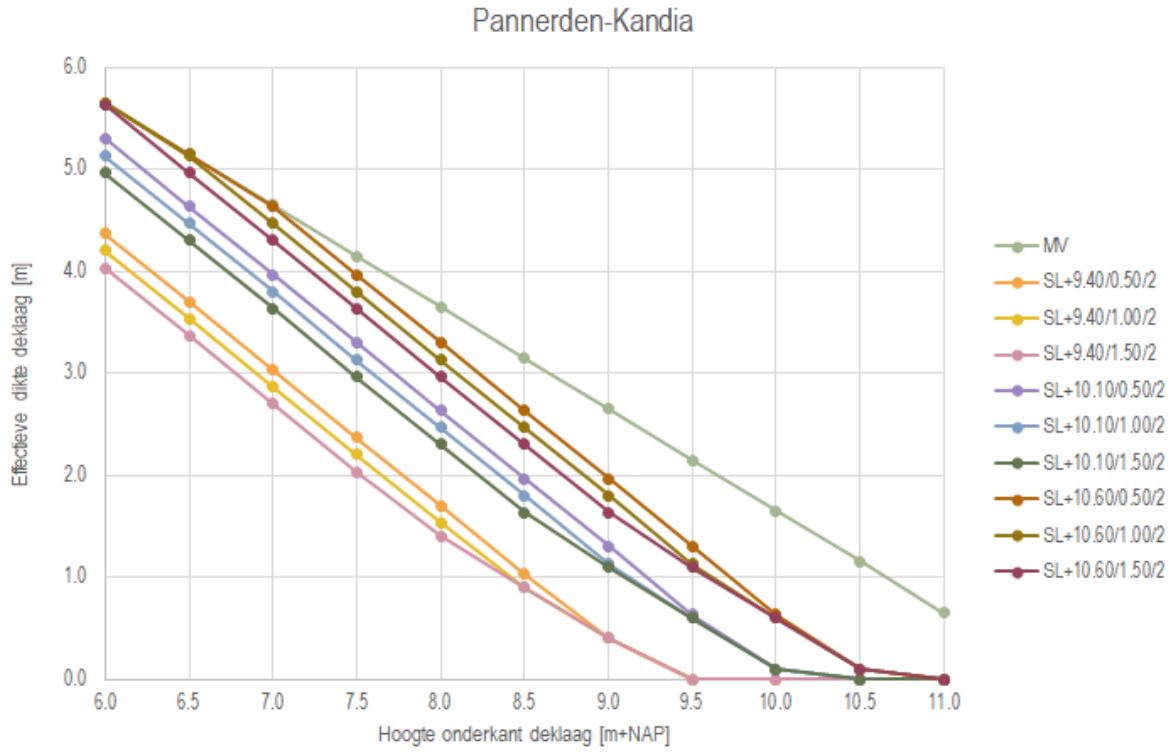
Figuur 69: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en opdrukveiligheid incl. veiligheids- en schematiseringsfactoren; Pannerden-Kandia



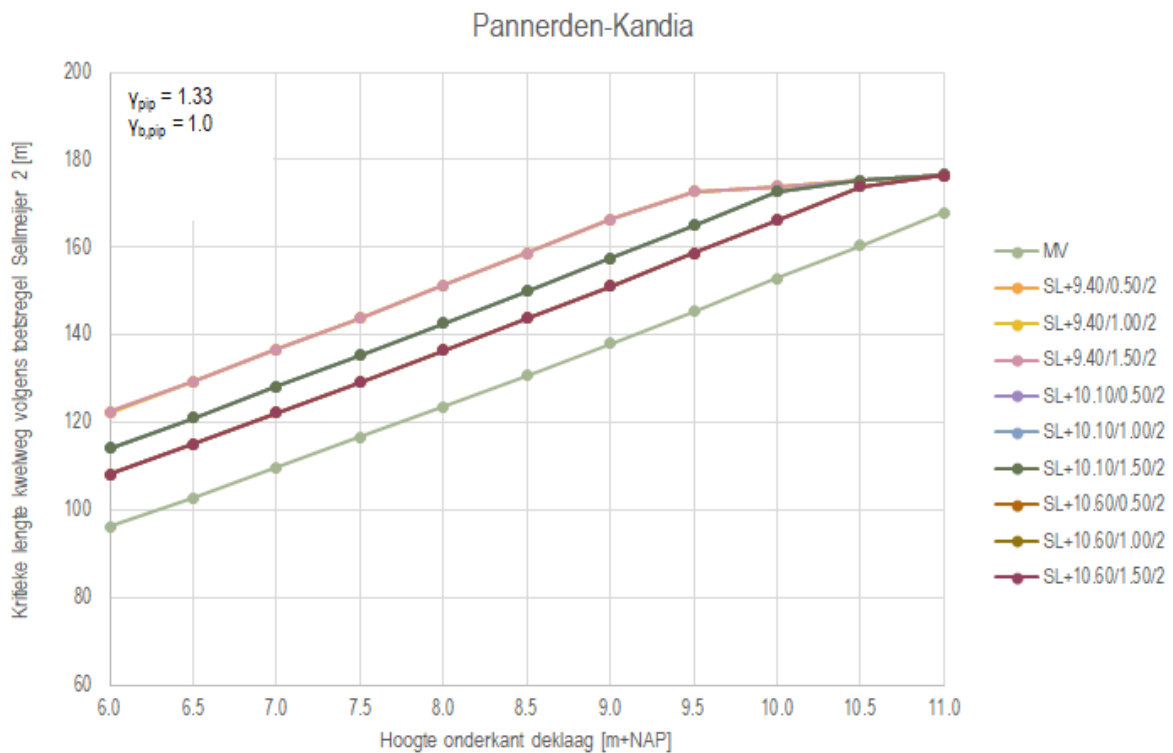
Figuur 70: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en veiligheid tegen heave excl. veiligheids- en schematiseringsfactoren; Pannerden-Kandia



Figuur 71: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en veiligheid tegen heave incl. veiligheids- en schematiseringsfactoren; Pannerden-Kandia



Figuur 72: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en effectieve dikte deklaag; Pannerden-Kandia



Figuur 73: Verband tussen hoogte onderkant deklaag en kritieke kwelweglengte; Pannerden-Kandia

5.2 Bepaling maatgevende en representatieve profielen

Voor elk vak is een maatgevend profiel en een representatief profiel bepaald. Het maatgevende profiel is het profiel binnen het betrokken vak dat naar verwachting het meest pipinggevoelig is. Het representatieve profiel is het profiel dat voor wat betreft geometrie het meest voorkomend is binnen het betrokken vak.

Het maatgevende profiel is bepaald op basis van de aanwezige (minimale) kwelweglengte in combinatie met de hoogte van het maaiveld. Het representatieve profiel is niet gekoppeld aan een bestaand profiel, maar is een theoretisch profiel waarvoor de hoogte van het maaiveld overeenkomt met de vakgemiddelde hoogte van het maaiveld en waarvoor de locatie van het uittreepunt overeenkomt met de vakgemiddelde locatie van het uittreepunt. Voor representatieve profielen van vakken waarin zich binnendijks een sloot bevindt dat gemiddeld op grote afstand van de dijk ligt, is aangenomen dat het uittreepunt zich ter plaatse van de binnenteen bevindt.

's Gravenwaard

Maatgevende profielen voor het traject 's Gravenwaard zijn gegeven in Tabel 12. Voor sloten waarvan de dimensies niet bekend zijn, zijn de dimensies van naburige, meestal grotere sloten aangehouden.

Tabel 12: Maatgevende profielen; 's Gravenwaard

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Maatgevend profiel	Uittreepunt in sloot [J/N]	Breedte slootbodembodem [m]	Hoogte slootbodembodem [m+NAP]	Helling sloottalud [1:n]
GRA_V1	57+000	63+050	P_48_062+100	N			
GRA_V2	63+050	73+050	P_48_066+080	N			
GRA_V3	73+050	77+000	P_48_076+074	J	1.00	9.70	2.3
GRA_V4	77+000	81+000	P_48_077+035	J	1.10	10.92	2.0
GRA_V5	81+000	86+080	P_48_083+054	J	1.60	10.33	2.0
GRA_V6	86+080	88+080	P_48_087+026	J	1.60	10.33	2.0
GRA_V7	88+080	89+050	P_48_089+014	N	2.30	10.33	2.0
GRA_V8	89+050	91+065	P_48_090+015	N	1.80	10.34	2.0
GRA_V9	91+065	96+020	P_48_093+063	N	0.30	10.90	1.5
GRA_V10	96+020	105+040	P_48_096+024	J	0.30	10.55	1.5
GRA_V11	105+040	107+000	P_48_106+025	N			

Pannerden-Kandia

Maatgevende profielen voor het traject Pannerden-Kandia zijn gegeven in Tabel 13.⁸ Voor sloten waarvan de dimensies niet bekend zijn, zijn de dimensies van naburige, meestal grotere sloten aangehouden. Voor open water is ervan uitgegaan dat de bodem op 5 m beneden maaiveld ligt.

Tabel 13: Maatgevende profielen; Pannerden-Kandia

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Maatgevend profiel	Uittreepunt in sloot [J/N]	Breedte slootbodembodem [m]	Hoogte slootbodembodem [m+NAP]	Helling sloottalud [1:n]
PAN_V1	135+030	138+000	P_48_137+039	N			
PAN_V2	138+000	141+010	P_48_140+018	J	1.70	10.07	1.5
PAN_V3	141+010	143+060	P_48_142+059	N			
PAN_V4	143+060	146+000	P_48_145+079	J	20.00	7.59	2.5
PAN_V5	146+000	148+030	P_48_146+019	N			

⁸ De profielen P_48_138+019 (open water), P_48_143+098 (open water) en P_165+018 (kopsloot) worden als bepalende profielen gekenmerkt, maar zijn als gevolg van gehanteerde (conservatieve) invoer met betrekking tot de watergangen niet maatgevend binnen het betrokken vak.

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Maatgevend profiel	Uittreepunt in sloot [J/N]	Breedte slootbodem [m]	Hoogte slootbodem [m+NAP]	Helling sloottalud [1:n]
PAN_V6	148+030	156+030	P_48_151+058	J	0.70	9.52	1.5
PAN_V7	156+030	157+040	P_48_156+038	N			
PAN_V8	157+040	157+080	P_48_157+060	J	20.00	6.60	2.5
PAN_V9	157+080	162+050	P_48_161+039	N			
PAN_V10	162+050	168+010	P_48_167+078	J	0.60	9.60	1.5
PAN_V11	168+010	170+000	N/A	N/A			
PAN_V12	170+000	172+020	P_48_172+018	N			
PAN_V13	172+020	172+080	P_48_172+038	J	20.00	7.11	2.5
PAN_V14	172+080	174+060	P_48_173+057	N			

6 Analytische berekeningen

6.1 Bepaling benodigde kwelweglengte

Om inzicht in de consequenties van de aanpassing van de rekenregel van Sellmeijer (2013) en in de invloed van nieuw vergaarde informatie te verkrijgen is per vak de kritieke kwelweglengte in opeenvolgende stappen berekend (Figuur 74). Hierbij is de schematisatie steeds verder geactualiseerd.

De invoer bij Stap 1 en Stap 2 is ontleend aan die uit de derde toetsronde. In de navolgende stappen zijn de geometrie, de dikte van de deklaag en de eigenschappen van het watervoerend pakket aangepast.

In Stap 1 is de kritieke kwelweglengte berekend met toetsregel Sellmeijer 1 (oorspronkelijke rekenregel conform Sellmeijer (1989)). In de navolgende stappen is toetsregel Sellmeijer 2 (vigerende rekenregel conform Sellmeijer (2011)) gehanteerd.



Figuur 74: Pipingberekeningen per stap

Voor de dijkvakken in het traject Pannerden-Kandia zijn in Stap 5 op basis van Stochastisch Ondergrond Schematisatie (SOS) meerdere scenario's (voor de onderkant van het zandpakket) van toepassing. Ook in Stap 6 worden voor bepaalde dijkvakken meerdere lokale scenario's onderscheiden.

6.2 Bepaling parameters

In alle berekeningen worden voor de volgende parameters vaste waarden toegepast (deze parameters worden niet gevarieerd):

- Gemiddelde korrel diameter schaalproeven $D_{70m} = 208 \mu\text{m}$.
- Volumiek gewicht water = 10 kN/m^3 .
- Kinematische viscositeit water = $1.33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.
- Coëfficiënt White = 0.25.

- Rolweerstandshoek zandkorrels = 37°.
- Volumiek gewicht zandkorrels onder water = 16.5 kN/m³.

Daarnaast wordt er in alle berekeningen van uitgegaan dat het freatische niveau bij het uittredepunt gelijk is aan de hoogte van het maaiveld.

Stap 1: Invoer op basis van derde toetsronde + controle op piping met toetsregel Sellmeijer 1

Het niveau van de buitenwaterstand, de hoogte van het maaiveld, de hoogte van de onderkant van de deklaag, de hoogte van de onderkant van het zandpakket, de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige zandlaag zijn ontleend aan de invoer van de derde toetsronde. Voor maatgevende profielen zijn de waarden voor het dichtstbijzijnde, in de derde toetsronde gecontroleerde profiel gehanteerd. Voor representatieve profielen zijn de gemiddelde waarden voor alle in de derde toetsronde gecontroleerde profielen binnen het betrokken vak gehanteerd.

In de derde toetsronde zijn de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR 2006) aangehouden. Voor het traject 's Gravenwaard varieert het toetspeil tussen NAP +17.10 m en NAP +17.00 m. Voor het traject Pannerden varieert het toetspeil tussen NAP +16.20 m en NAP +15.30 m.

De veiligheidsfactor piping bedraagt 1.2 (toetsregel Sellmeijer 1).

Stap 2: Invoer op basis van derde toetsronde + controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2

In tegenstelling tot in stap 1 wordt de controle op piping in stap 2 uitgevoerd met toetsregel Sellmeijer 2. Voor dijktraject 48-1 geldt een veiligheidsfactor piping van 1.33. Voor de schematiseringsfactor piping is 1.0 aangehouden, voor zowel representatieve profielen als maatgevende profielen.

Stap 3: Aanpassen geometrie

Ten opzichte van de invoer in stap 2 zijn het niveau van de buitenwaterstand en de hoogte van het maaiveld aangepast. Voor het niveau van de buitenwaterstand is de ondergrenswaarde gehanteerd. De hoogte van het maaiveld is ontleend aan de hoogtegegevens Waterschap Rijn en IJssel. Voor maatgevende profielen zijn de waarden voor het betrokken profiel gehanteerd. Voor representatieve profielen zijn de gemiddelde waarden voor alle profielen binnen het betrokken vak gehanteerd.

Stap 4: Aanpassen dikte deklaag

Ten opzichte van de invoer in stap 3 is de dikte van de deklaag aangepast. De dikte van de deklaag is ontleend aan de beschikbare grondonderzoeken en de zandbanenkaart. Voor maatgevende profielen is de dikte van de deklaag bepaald als het minimum van de minimale dikte van de deklaag op basis van boringen en sonderingen en de minimale dikte van de deklaag op basis van de zandbanenkaart. Voor representatieve profielen is het minimum van gemiddelde waarde de dikte van de deklaag op basis van boringen en sonderingen en de gemiddelde dikte van de deklaag op basis van de zandbanenkaart binnen het betrokken vak gehanteerd (Figuur 19 en Figuur 22).

Ingevoerd is de lage karakteristieke waarde van de dikte van de deklaag. De lage karakteristieke waarde van de dikte van de deklaag is berekend uitgaande van een lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt van 0.3 (standaardwaarde).

Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket op basis van SOS segmenten

Ten opzichte van de invoer in stap 4 zijn de hoogte van de onderkant van het zandpakket, de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige zandlaag aangepast. Voor

de hoogte van de onderkant van het zandpakket is de gemiddelde waarde van de hoogte van de onderkant van het zandpakket voor het betrokken SOS segment gehanteerd (Figuur 23). De korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid zijn ontleend aan het betrokken SOS segment, rekening houdend met de verschillende scenario's (Figuur 47, Figuur 52, Figuur 50 en Figuur 55).

Ingevoerd zijn de lage karakteristieke waarde van de korreldiameter D_{70} en de hoge karakteristieke waarde van de specifieke doorlatendheid. De lage karakteristieke waarde van de korreldiameter D_{70} is berekend uitgaande van een lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt van 0.12 (standaardwaarde). De hoge karakteristieke waarde van de specifieke doorlatendheid is berekend uitgaande van een lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt van 0.5 (standaardwaarde).

Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket op basis van beschikbare grondonderzoeken en GeoTOP

Ten opzichte van de invoer van stap 5 zijn de hoogte van de onderkant van het zandpakket, de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige zandlaag aangepast. De hoogte van de onderkant van het zandpakket is ontleend aan de bodemopbouw op basis van GeoTOP (Figuur 24 en Figuur 26). De korreldiameter D_{70} is ontleend aan de korreldiameter D_{70} op basis van korrelgrootteverdelingen van monsters in de zandlaag direct onder de deklaag. De specifieke doorlatendheid is ontleend aan de doorlatendheid op basis van de beschikbare HPT/MPT en pompproeven.

De korreldiameter D_{70} is afgeleid uit de waarden van de korreldiameter D_{70} op basis van alle korrelgrootteverdelingen van monsters tot 2 m beneden de bovenkant van het watervoerend pakket binnen het betrokken traject (Figuur 48). Hierbij is de korreldiameter D_{70} op basis van korrelgrootteverdelingen begrensd tot 1000 μm .

Voor de specifieke doorlatendheid is de effectieve doorlatendheid van het totale zandpakket gehanteerd. Deze is het resultaat van de gecombineerde doorlatendheden van de gestapelde zandlagen, en is benaderd als het naar dikte gewogen rekenkundig gemiddelde.⁹ De diktes van de verschillende zandlagen zijn geschat aan de hand van de bodemopbouw op basis van GeoTOP. De doorlatendheden van de verschillende zandlagen zijn ontleend aan de doorlatendheid op basis van de beschikbare HPT/MPT en pompproeven (Tabel 14 en Tabel 15). De bepaling van de effectieve doorlatendheid is opgenomen in Bijlage 5.

Tabel 14: Doorlatendheid op basis van HPT/MPT en pompproeven; 's Gravenwaard

Grondsoort	Horizontale doorlatendheid [m/d]	Verticale doorlatendheid [m/d]	Anisotropie [-]
Organisch	0.001	0.001	1
Klei	0.008	0.008	1
Kleiig zand	0.05	0.05	1
Zand, fijn	20	7	3
Zand, midden	40	14	3
Zand, grof	120	40	3
Grind	1500	500	3

⁹ Tenzij de doorlatendheid van de bovenste laag groter is dan die van de onderliggende laag, de dikte van de bovenste laag groter is dan 1 m en de dikte van de bovenste laag groter is dan 10% van de dikte van het totale zandpakket.

Tabel 15: Doorlatendheid op basis van HPT/MPT en pompproeven; Pannerden-Kandia

Grondsoort	Horizontale doorlatendheid [m/d]	Verticale doorlatendheid [m/d]	Anisotropie [-]
Organisch	0.001	0.001	1
Klei	0.008	0.008	1
Kleiig zand	0.05	0.05	1
Zand, fijn	20	7	3
Zand, midden	60	20	3
Zand, grof	130	44	3
Grind	1500	500	3

Ingevoerd zijn de lage karakteristieke waarde van de korreldiameter D_{70} en de hoge karakteristieke waarde van de specifieke doorlatendheid. De lage karakteristieke waarde van de korreldiameter D_{70} is berekend uitgaande van een lokaal bestand van lognormaal verdeelde waarnemingen:

$$p_{kar} = \exp \left[(\ln p)_{gem} - t_{N-1}^{0.95} \frac{s_{\ln p}}{\sqrt{N}} \right]$$

De hoge karakteristieke waarde van de specifieke doorlatendheid is berekend uitgaande van een lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt van 0.5 (standaardwaarde).

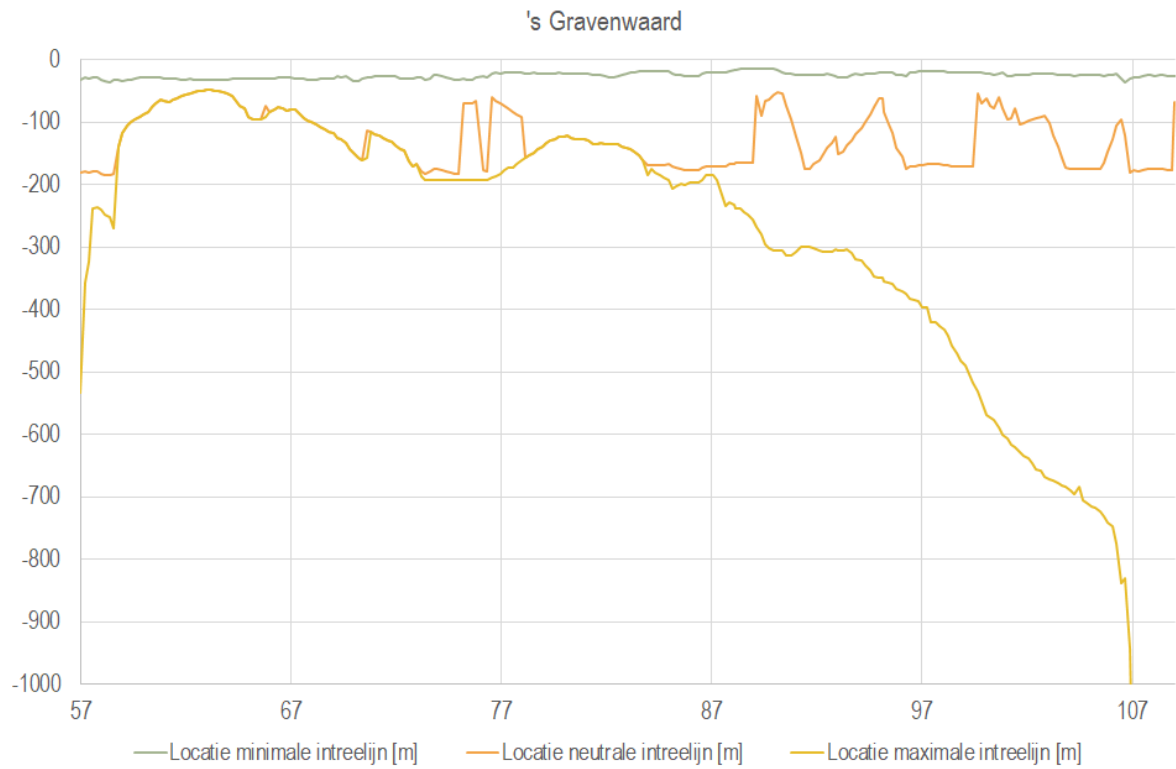
Aanwezige kwelweglengte

De aanwezige kwelweglengte is afhankelijk van de locatie van het intredepunt en de locatie van het uittredepunt. In deze proeftoetsing worden voor de aanwezige kwelweglengte de volgende scenario's aangehouden:

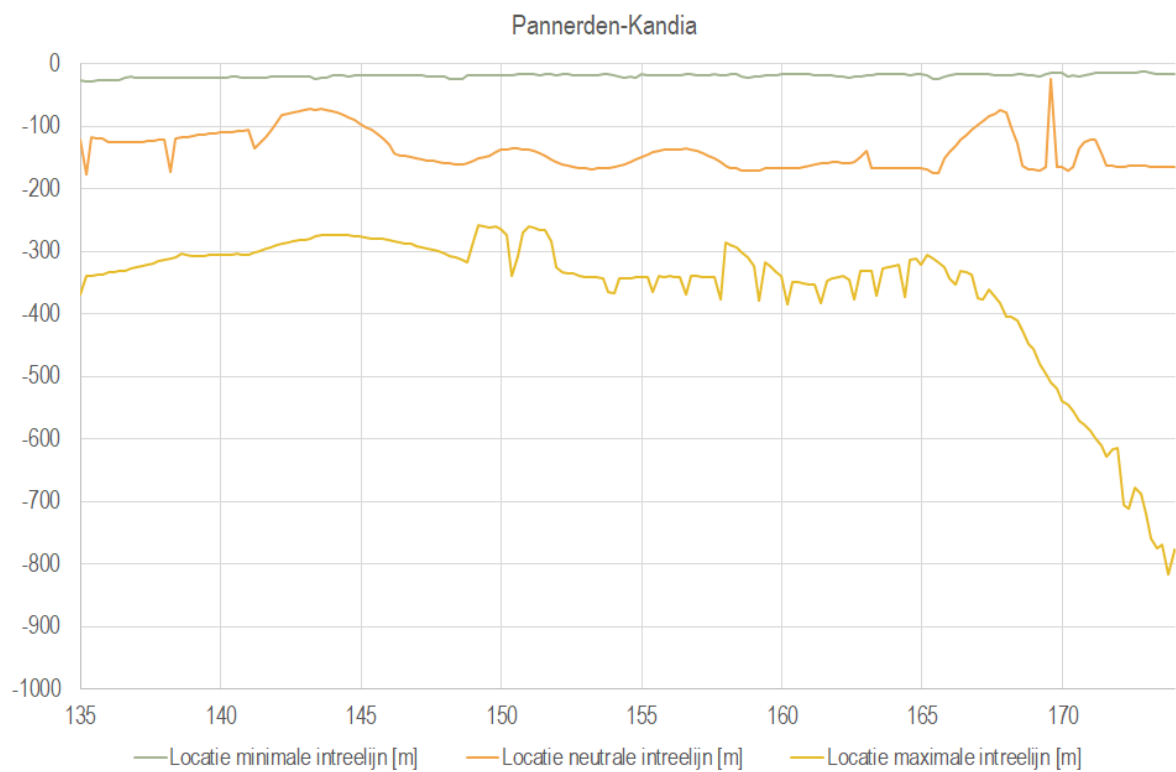
- Minimale kwelweglengte
- Neutrale kwelweglengte
- Maximale kwelweglengte

Voor de minimale kwelweglengte is aangenomen dat het intredepunt zich ter plaatse van de buitenteen bevindt. Voor de maximale kwelweglengte is aangenomen dat het intredepunt zich ter plaatse van de insteek van de Boven-Rijn, De Bijland of het Pannerdensch Kanaal bevindt. Voor de neutrale kwelweglengte is aangenomen dat het intredepunt zich 150 m buitendijks van de buitenteen of ter plaatse van de insteek van een sloot of open water in het voorland bevindt, mits deze insteek op een horizontale afstand van maximaal 150 m buitendijks van de buitenteen ligt. De locatie van de minimale intreeliijn, de neutrale intreeliijn en de maximale intreeliijn is gegeven in Figuur 75 en Figuur 76.

Voor representatieve profielen is de gemiddelde waarde van de kwelweglengte voor alle profielen binnen het betrokken vak gehanteerd, waarbij de locatie van het uittredepunt (met het oog op 3D-effecten) is begrensd tot 90 m binnendijks.



Figuur 75: Locatie intreelijn ten behoeve van controle op piping; 's Gravenwaard



Figuur 76: Locatie intreelijn ten behoeve van controle op piping; Pannerden-Kandia

6.3 Resultaten

's Gravenwaard

De kritieke kwelweglengte voor maatgevende profielen is gegeven in Tabel 16 en Figuur 77. De kritieke kwelweglengte voor representatieve profielen is gegeven in Tabel 17 en Figuur 78.

De aanwezige kwelweglengte voor maatgevende profielen is gegeven in Tabel 18 en Figuur 79. De aanwezige kwelweglengte voor representatieve profielen is gegeven in Tabel 19 en Figuur 80. Gegeven zijn de aanwezige kwelweglengte op basis van de derde toetsronde en de aanwezige kwelweglengte volgens de minimale, neutrale en maximale intreelijnen (zie Sectie 6.2).

Het kwelweglengtetekort bij Stap 5 (aanpassen watervoerend pakket op basis van Stochastisch Ondergrond Schematisatie) is gegeven in Figuur 81 en Figuur 83. Het kwelweglengtetekort bij Stap 6 (aanpassen watervoerend pakket op basis van beschikbare grondonderzoeken en GeoTOP) is gegeven in Figuur 82 en Figuur 84. Bij een positieve waarde is er onvoldoende kwelweglengte aanwezig; bij een negatieve waarde is er voldoende kwelweglengte aanwezig.

Tabel 16: Kritieke kwelweglengte maatgevende profielen; 's Gravenwaard

Vak ID	Kritieke kwelweglengte [m]					
	Stap 1: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 1	Stap 2: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 2	Stap 3: Aanpassen geometrie + Sellmeijer 2	Stap 4: Aanpassen dikte deklaag + Sellmeijer 2	Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. SOS + Sellmeijer 2	Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. onderzoeken en GeoTOP + Sellmeijer 2
GRA_V1	40	70	60	89	105	167
GRA_V2	0	0	68	103	121	101
GRA_V3	29	51	89	91	146	243
GRA_V4	29	51	94	102	163	176
GRA_V5	54	98	96	100	159	236
GRA_V6	39	69	103	104	166	250
GRA_V7	52	94	104	105	169	274
GRA_V8	44	80	76	97	151	247
GRA_V9	45	80	75	97	150	245
GRA_V10	50	90	104	127	197	314
GRA_V11	49	88	82	117	183	204

Tabel 17: Kritieke kwelweglengte representatieve profielen; 's Gravenwaard

Vak ID	Kritieke kwelweglengte [m]					
	Stap 1: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 1	Stap 2: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 2	Stap 3: Aanpassen geometrie + Sellmeijer 2	Stap 4: Aanpassen dikte deklaag + Sellmeijer 2	Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. SOS + Sellmeijer 2	Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. onderzoeken en GeoTOP + Sellmeijer 2
GRA_V1	22	38	56	82	97	154
GRA_V2	35	63	87	110	129	108
GRA_V3	36	64	110	112	150	252
GRA_V4	44	79	91	99	158	170
GRA_V5	50	89	96	98	157	233
GRA_V6	44	79	104	105	168	252

Vak ID	Kritieke kwelweglengte [m]					
	Stap 1: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 1	Stap 2: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 2	Stap 3: Aanpassen geometrie + Sellmeijer 2	Stap 4: Aanpassen dikte deklaag + Sellmeijer 2	Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. SOS + Sellmeijer 2	Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. onderzoeken en GeoTOP + Sellmeijer 2
GRA_V7	52	94	107	107	172	279
GRA_V8	10	17	75	94	146	238
GRA_V9	44	79	80	98	152	249
GRA_V10	38	68	83	115	179	287
GRA_V11	41	72	68	119	182	204

Tabel 18: Aanwezige kwelweglengte maatgevende profielen; 's Gravenwaard

Vak ID	Aanwezige kwelweglengte [m]			
	Derde toetsronde	Minimaal	Neutraal	Maximaal
GRA_V1	60	67	84	84
GRA_V2	60	66	120	120
GRA_V3	57	56	100	222
GRA_V4	57	56	113	208
GRA_V5	77	56	190	190
GRA_V6	81	76	226	248
GRA_V7	83	64	108	317
GRA_V8	102	56	91	345
GRA_V9	114	62	169	349
GRA_V10	114	77	224	425
GRA_V11	114	59	142	813

Tabel 19: Aanwezige kwelweglengte representatieve profielen; 's Gravenwaard

Vak ID	Aanwezige kwelweglengte [m]			
	Derde toetsronde	Minimaal	Neutraal	Maximaal
GRA_V1	60	90	157	184
GRA_V2	60	85	164	165
GRA_V3	58	71	167	236
GRA_V4	57	58	157	179
GRA_V5	70	64	192	199
GRA_V6	82	85	235	276
GRA_V7	83	75	166	329
GRA_V8	108	68	146	352
GRA_V9	114	75	172	380
GRA_V10	114	77	192	605
GRA_V11	114	72	185	837

Pannerden-Kandia

De kritieke kwelweglengte voor maatgevende profielen is gegeven in Tabel 20 en Figuur 85. De kritieke kwelweglengte voor representatieve profielen is gegeven in Tabel 21 en Figuur 86. In geval van meerdere scenario's is de kritieke kwelweglengte behorend bij het maatgevende scenario weergegeven in Figuur 85 en Figuur 86.

De aanwezige kwelweglengte voor maatgevende profielen is gegeven in Tabel 22 en Figuur 87. De aanwezige kwelweglengte voor representatieve profielen is gegeven in Tabel 23 en Figuur 88. Gegeven zijn de aanwezige kwelweglengte op basis van de derde toetsronde en de aanwezige kwelweglengte volgens de minimale, neutrale en maximale intreelijnen (zie Sectie 6.2).

Het kwelweglengtetekort bij Stap 5 (aanpassen watervoerend pakket op basis van Stochastisch Ondergrond Schematisatie) is gegeven in Figuur 89 en Figuur 91. Het kwelweglengtetekort bij Stap 6 (aanpassen watervoerend pakket op basis van beschikbare grondonderzoeken en GeoTOP) is gegeven in Figuur 90 en Figuur 92. Bij een positieve waarde is er onvoldoende kwelweglengte aanwezig; bij een negatieve waarde is er voldoende kwelweglengte aanwezig.

Tabel 20: Kritieke kwelweglengte maatgevende profielen; Pannerden-Kandia

Vak ID	Kritieke kwelweglengte [m]					
	Stap 1: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 1	Stap 2: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 2	Stap 3: Aanpassen geometrie + Sellmeijer 2	Stap 4: Aanpassen dikte deklaag + Sellmeijer 2	Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. SOS + Sellmeijer 2	Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. onderzoeken en GeoTOP + Sellmeijer 2
PAN_V1	42	74	71	96	152	128
					52	92
PAN_V2	44	78	103	108	175	147
					60	105
PAN_V3	12	21	80	96	154	143
					175	
PAN_V4	67	111	126	129	186	174
					212	
PAN_V5	67	111	111	128	185	173
					211	
PAN_V6	59	96	110	118	171	160
					194	
PAN_V7	64	105	108	114	169	157
					191	
PAN_V8	59	97	124	124	184	171
					209	
PAN_V9	50	80	82	96	142	132
					161	
PAN_V10	74	104	125	154	183	191
					209	203
PAN_V12	40	54	108	132	159	164
					182	175
PAN_V13	40	54	144	149	180	185
					206	196
PAN_V14	25	34	114	136	164	170
					188	181

Tabel 21: Kritieke kwelweglengte representatieve profielen; Pannerden-Kandia

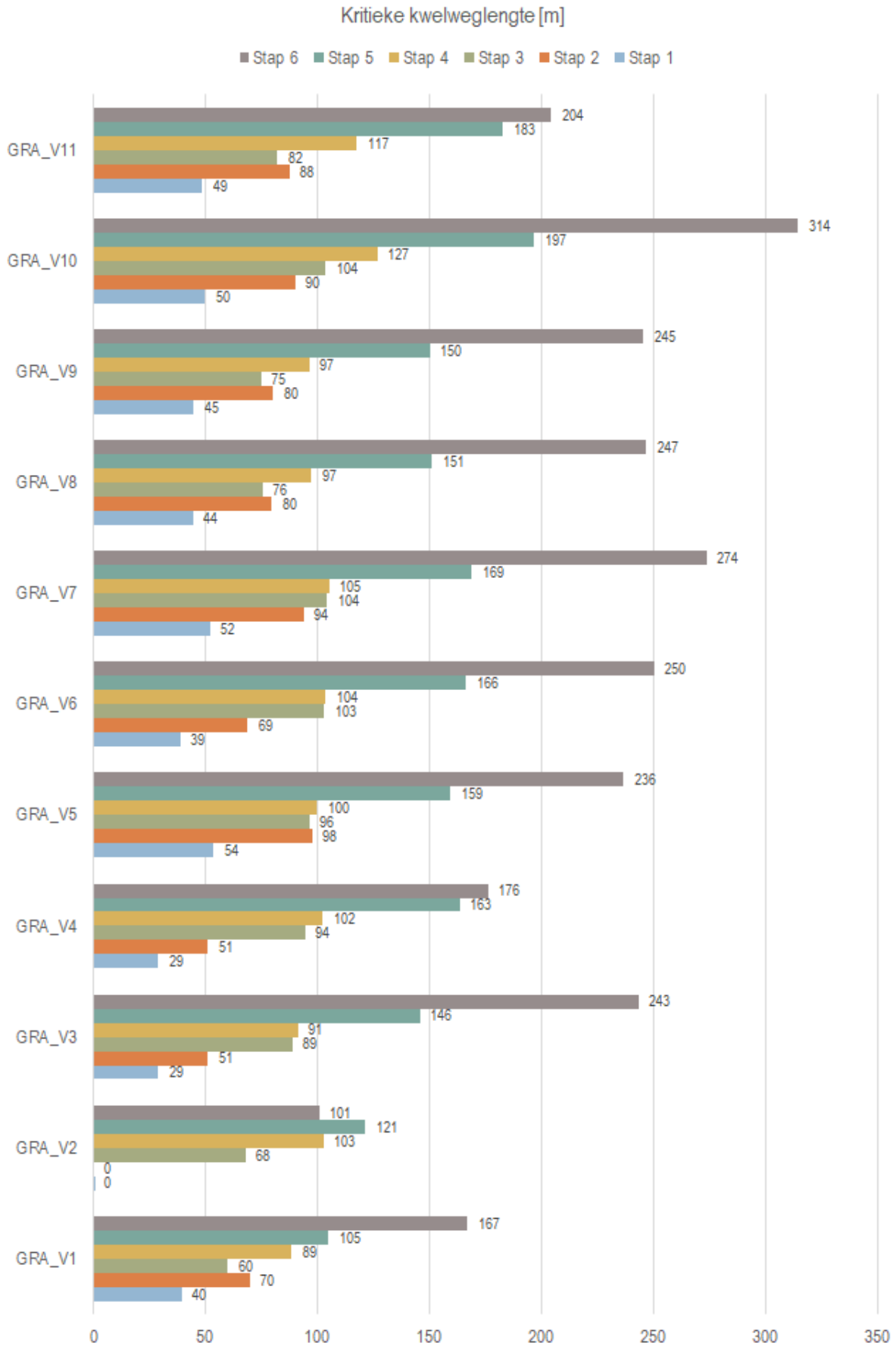
Vak ID	Kritieke kwelweglengte [m]					
	Stap 1: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 1	Stap 2: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 2	Stap 3: Aanpassen geometrie + Sellmeijer 2	Stap 4: Aanpassen dikte deklaag + Sellmeijer 2	Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. SOS + Sellmeijer 2	Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. onderzoeken en GeoTOP + Sellmeijer 2
PAN_V1	41	71	74	95	152	128
					51	90
PAN_V2	45	79	93	105	169	142
					58	101
PAN_V3	33	58	77	92	148	138
					168	
PAN_V4	64	104	105	123	178	166
					202	
PAN_V5	71	118	127	140	203	189
					232	
PAN_V6	64	105	110	115	168	156
					191	
PAN_V7	65	106	105	109	162	151
					184	
PAN_V8	N/A	N/A	124	124	183	171
					209	
PAN_V9	51	83	85	96	142	132
					160	
PAN_V10	53	78	111	133	170	178
					194	189
PAN_V12	34	46	98	120	146	150
					167	160
PAN_V13	N/A	N/A	118	111	168	172
					191	183
PAN_V14	0	0	117	135	163	168
					187	179

Tabel 22: Aanwezige kwelweglengte maatgevende profielen; Pannerden-Kandia

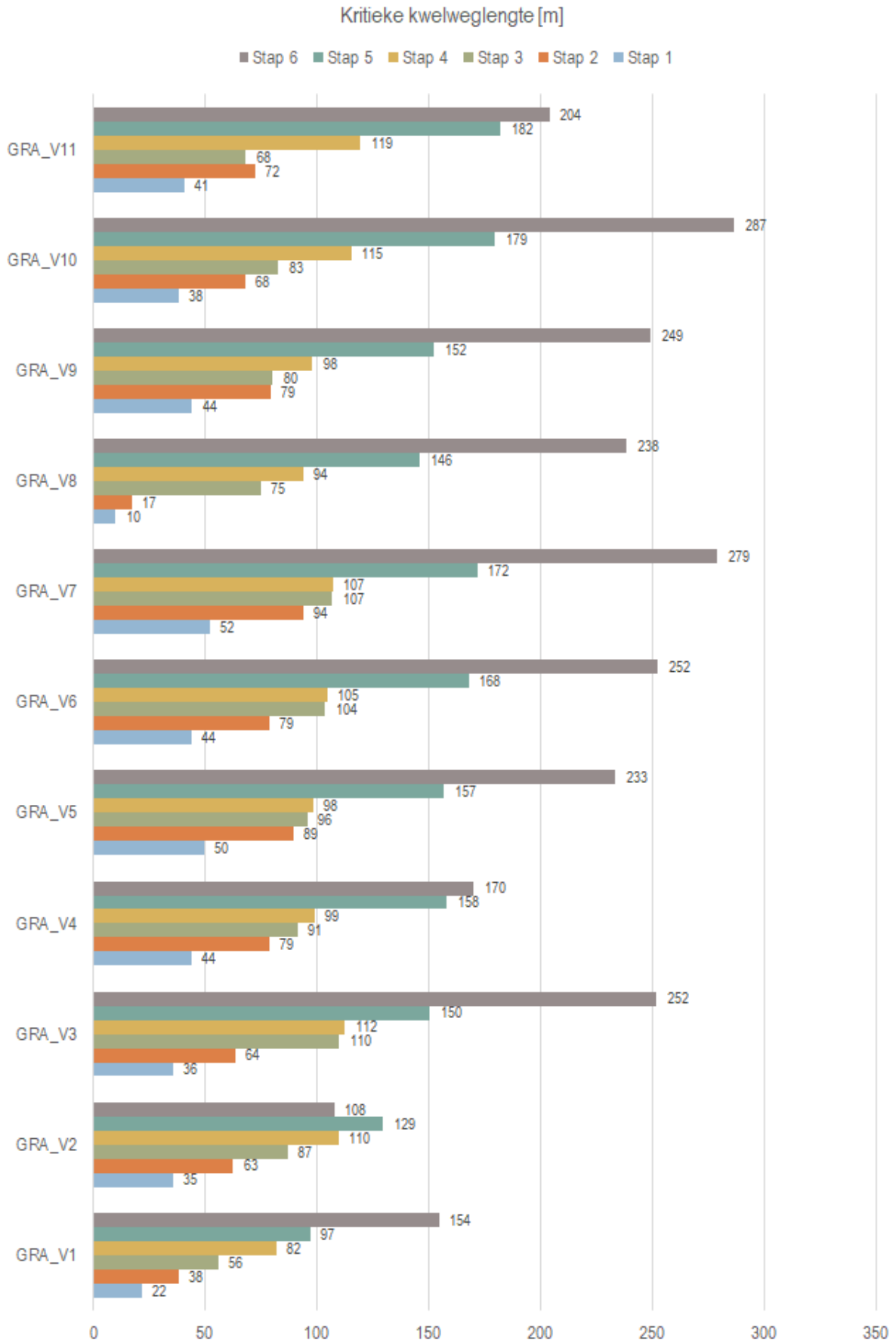
Vak ID	Aanwezige kwelweglengte [m]			
	Derde toetsronde	Minimaal	Neutraal	Maximaal
PAN_V1	59	57	159	357
PAN_V2	78	58	147	341
PAN_V3	79	49	106	312
PAN_V4	77	66	167	327
PAN_V5	77	61	186	325
PAN_V6	77	68	198	318
PAN_V7	73	57	176	380
PAN_V8	73	79	212	402
PAN_V9	73	56	199	422
PAN_V10	84	57	113	422
PAN_V12	84	78	228	770
PAN_V13	84	86	235	783
PAN_V14	83	65	215	818

Tabel 23: Aanwezige kwelweglengte representatieve profielen; Pannerden-Kandia

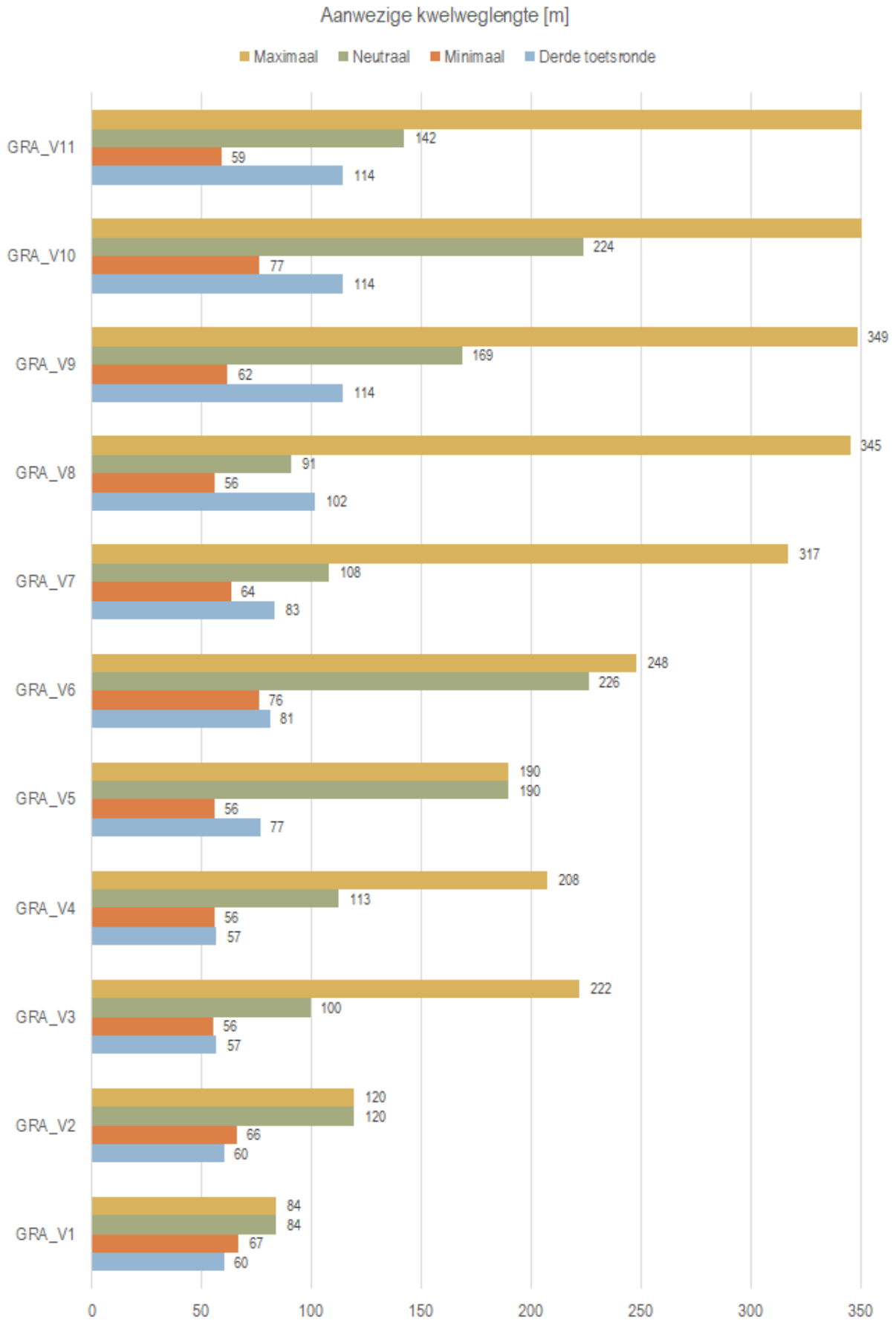
Vak ID	Aanwezige kwelweglengte [m]			
	Derde toetsronde	Minimaal	Neutraal	Maximaal
PAN_V1	59	64	164	368
PAN_V2	69	68	165	353
PAN_V3	79	58	131	325
PAN_V4	77	66	142	323
PAN_V5	77	80	213	354
PAN_V6	75	64	197	360
PAN_V7	73	58	179	386
PAN_V8	N/A	79	212	402
PAN_V9	73	63	210	381
PAN_V10	72	73	196	397
PAN_V12	84	85	218	670
PAN_V13	N/A	79	228	758
PAN_V14	84	75	225	840



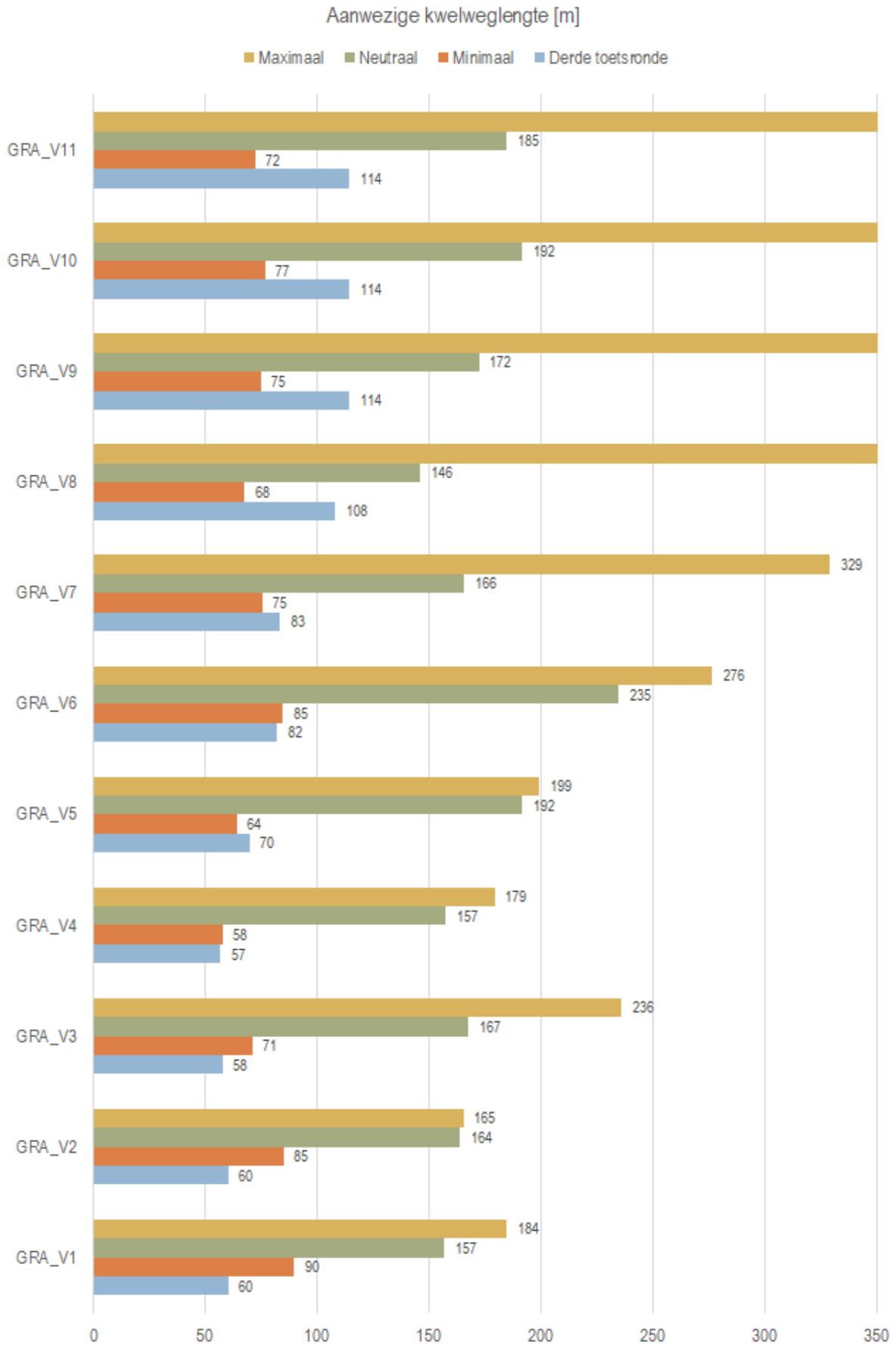
Figuur 77: Kritieke kwelweglengte maatgevende profielen; 's Gravenwaard



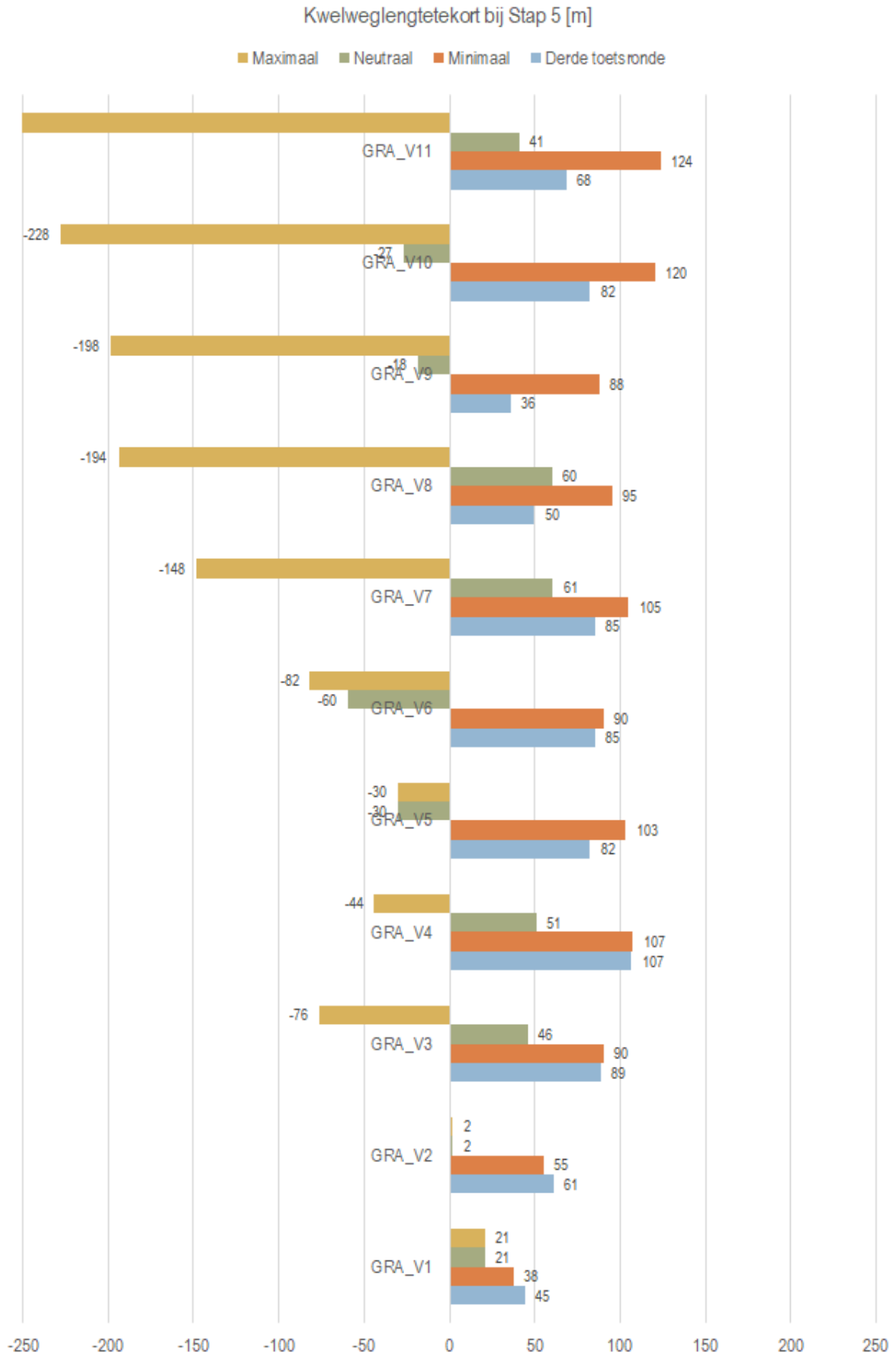
Figuur 78: Kritieke kwelweglengte representatieve profielen; 's Gravenwaard



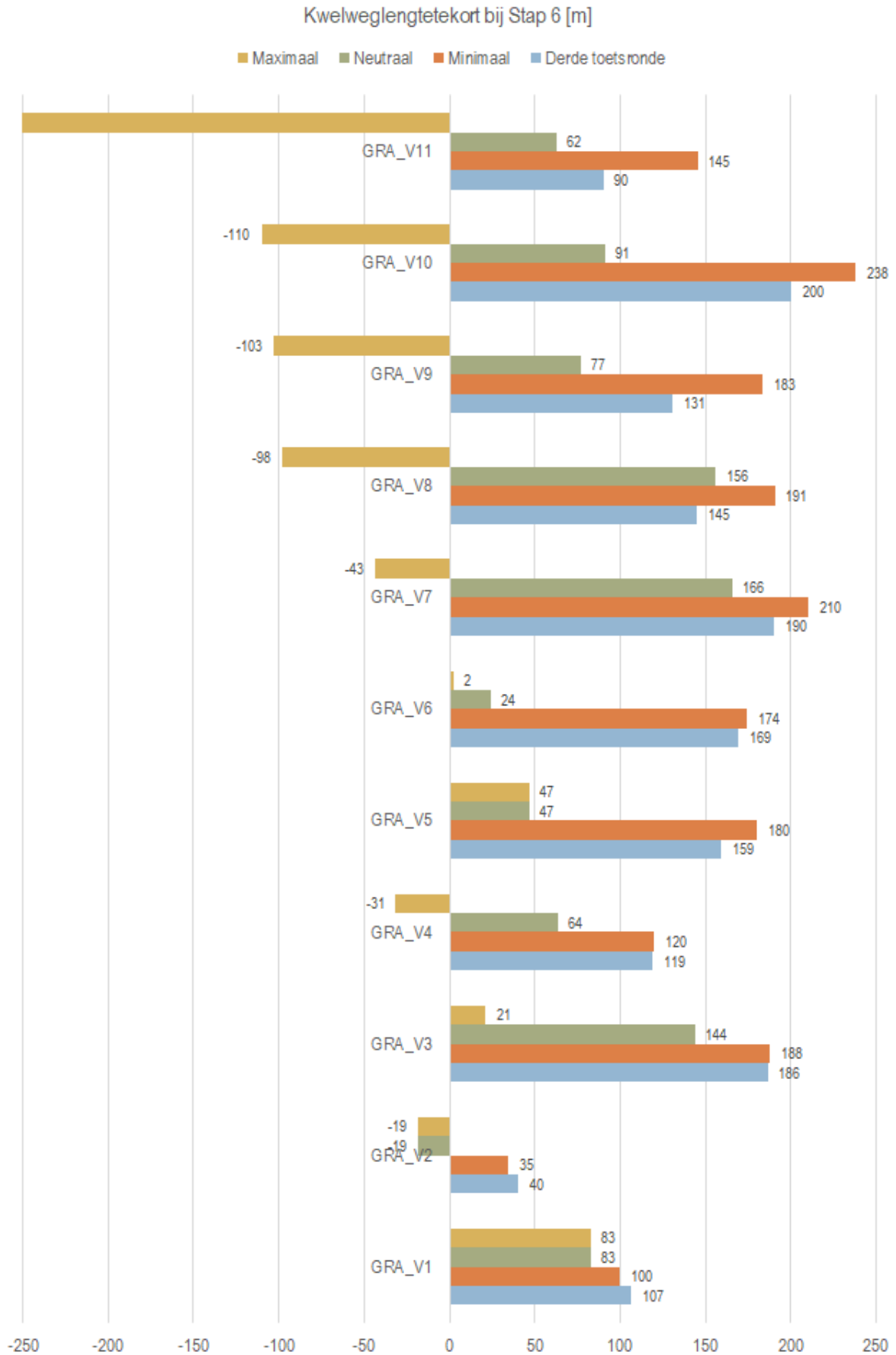
Figuur 79: Aanwezige kwelweglengte maatgevende profielen; 's Gravenwaard



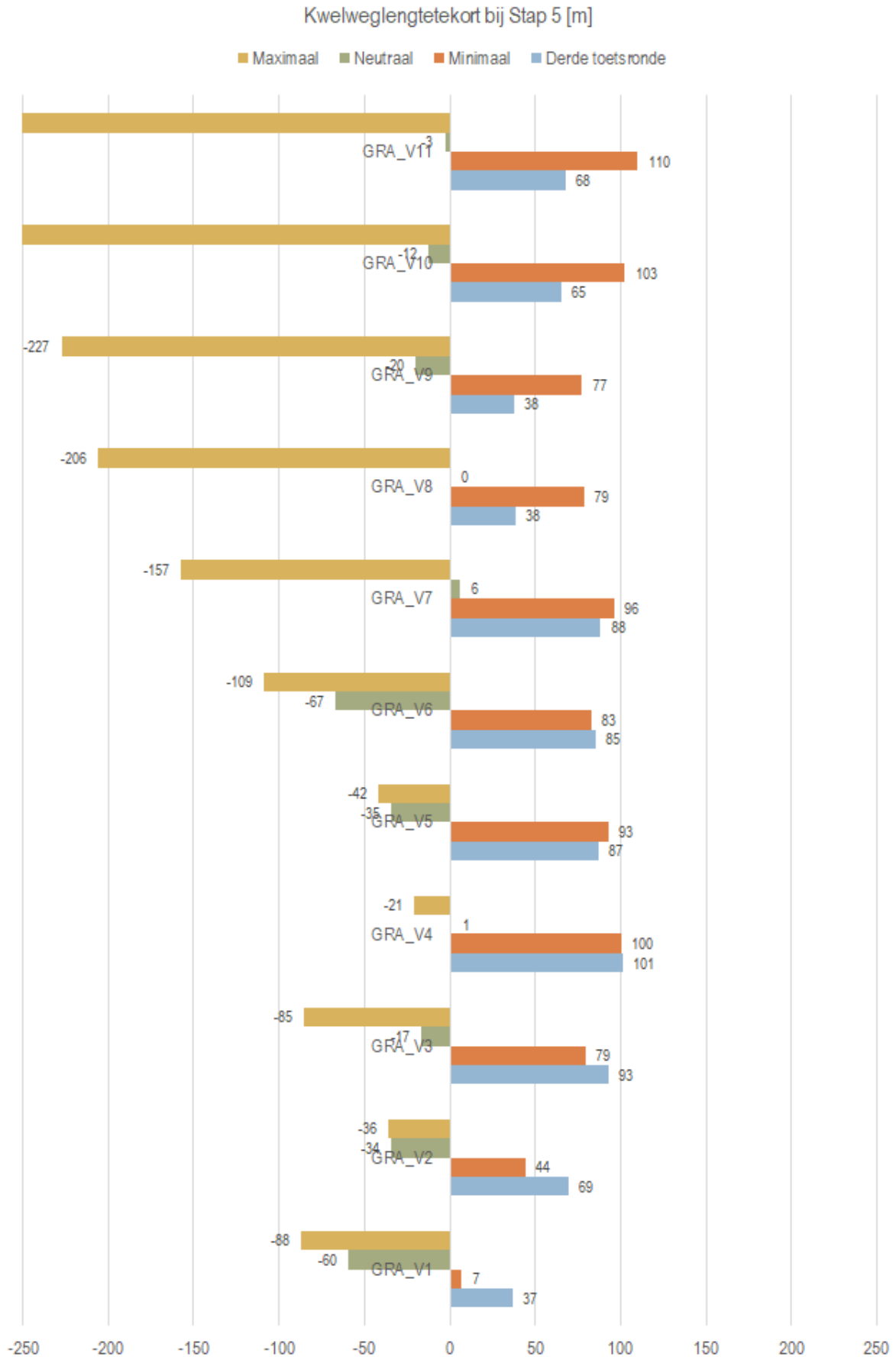
Figuur 80: Aanwezige kwelweglengte representatieve profielen; 's Gravenwaard



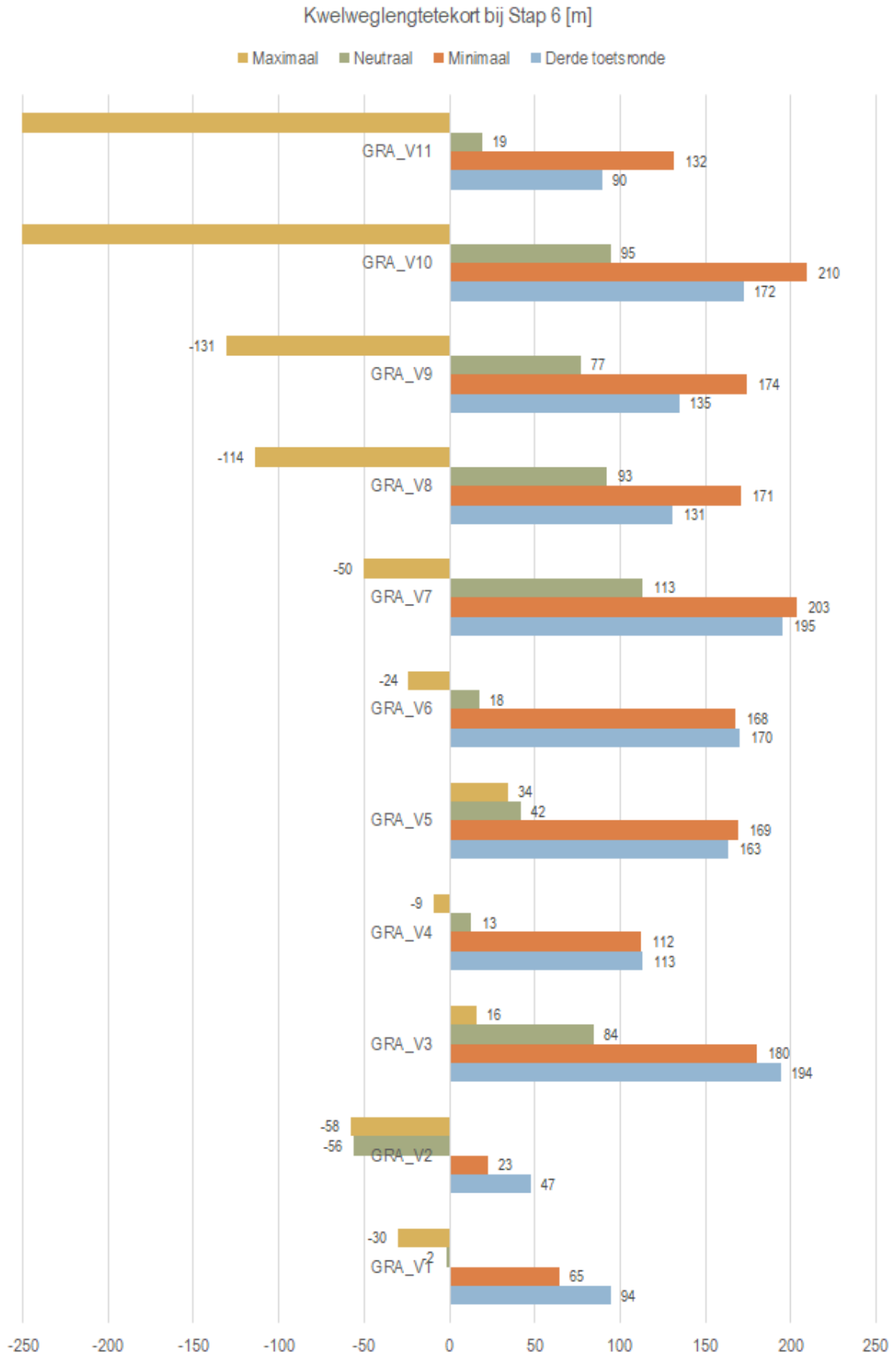
Figuur 81: Kwelweglengtetekort bij Stap 5 maatgevende profielen; 's Gravenwaard



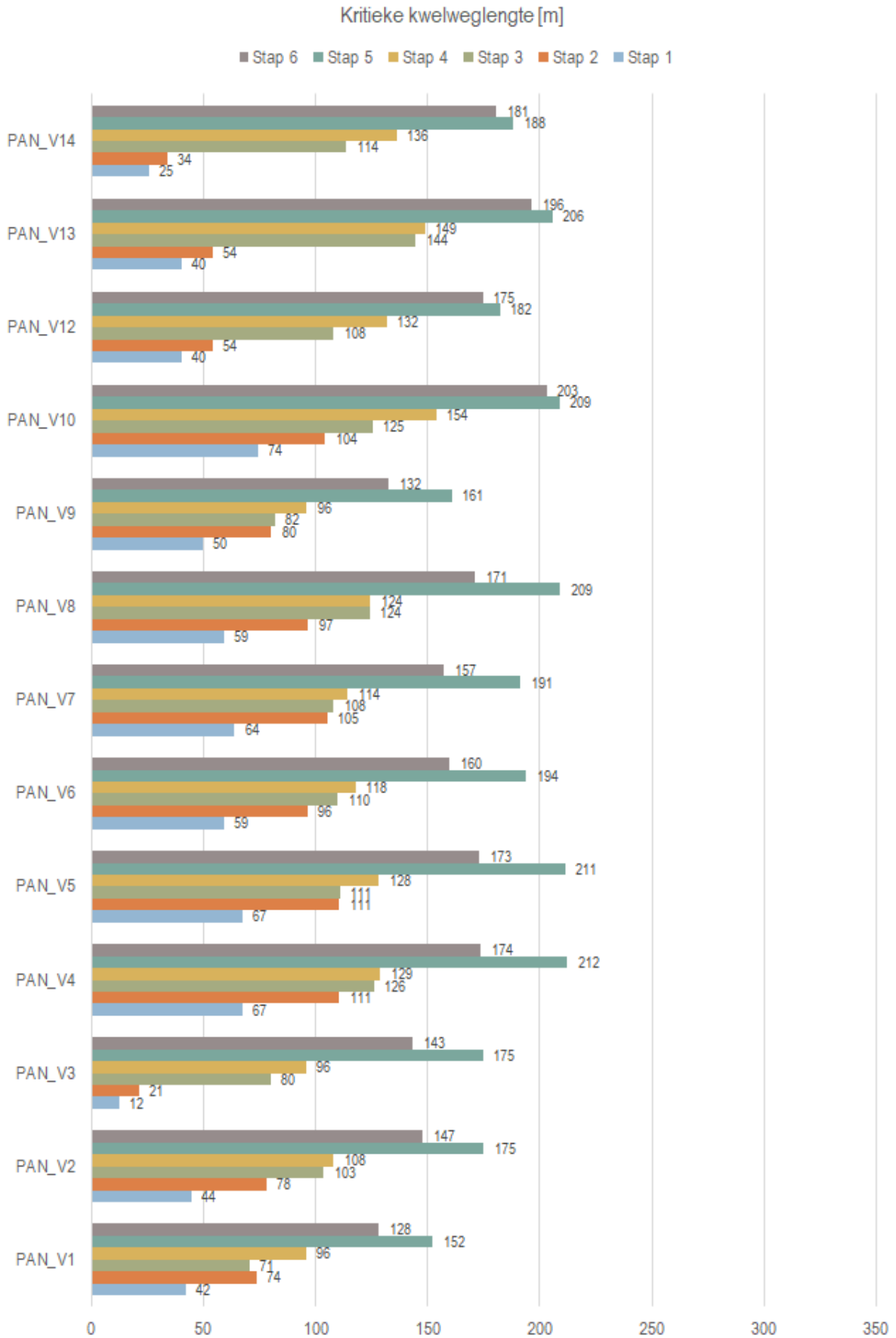
Figuur 82: Kwelweglengtetekort bij Stap 6 maatgevende profielen; 's Gravenwaard



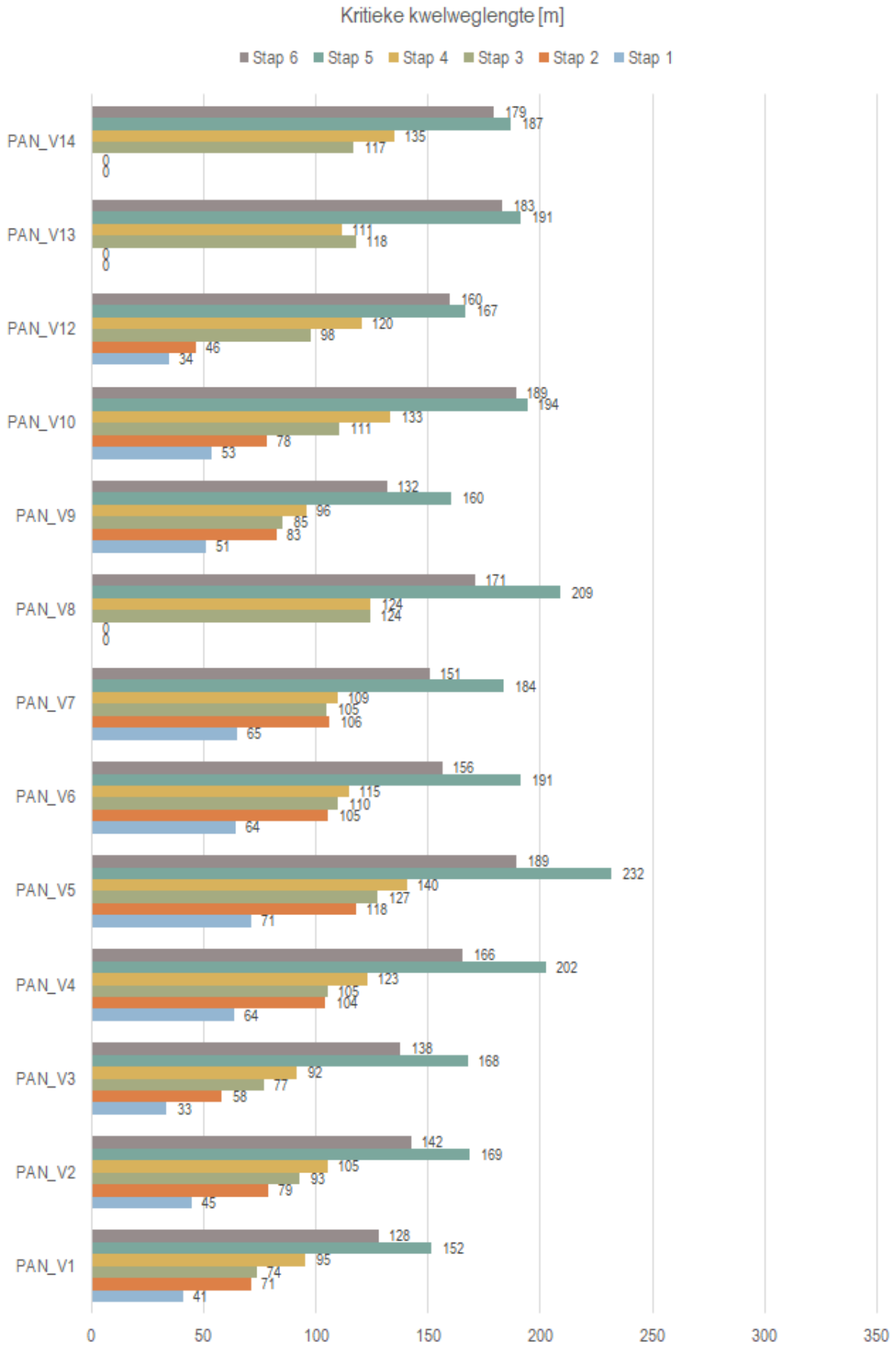
Figuur 83: Kwelweglengtetekort bij Stap 5 representatieve profielen; 's Gravenwaard



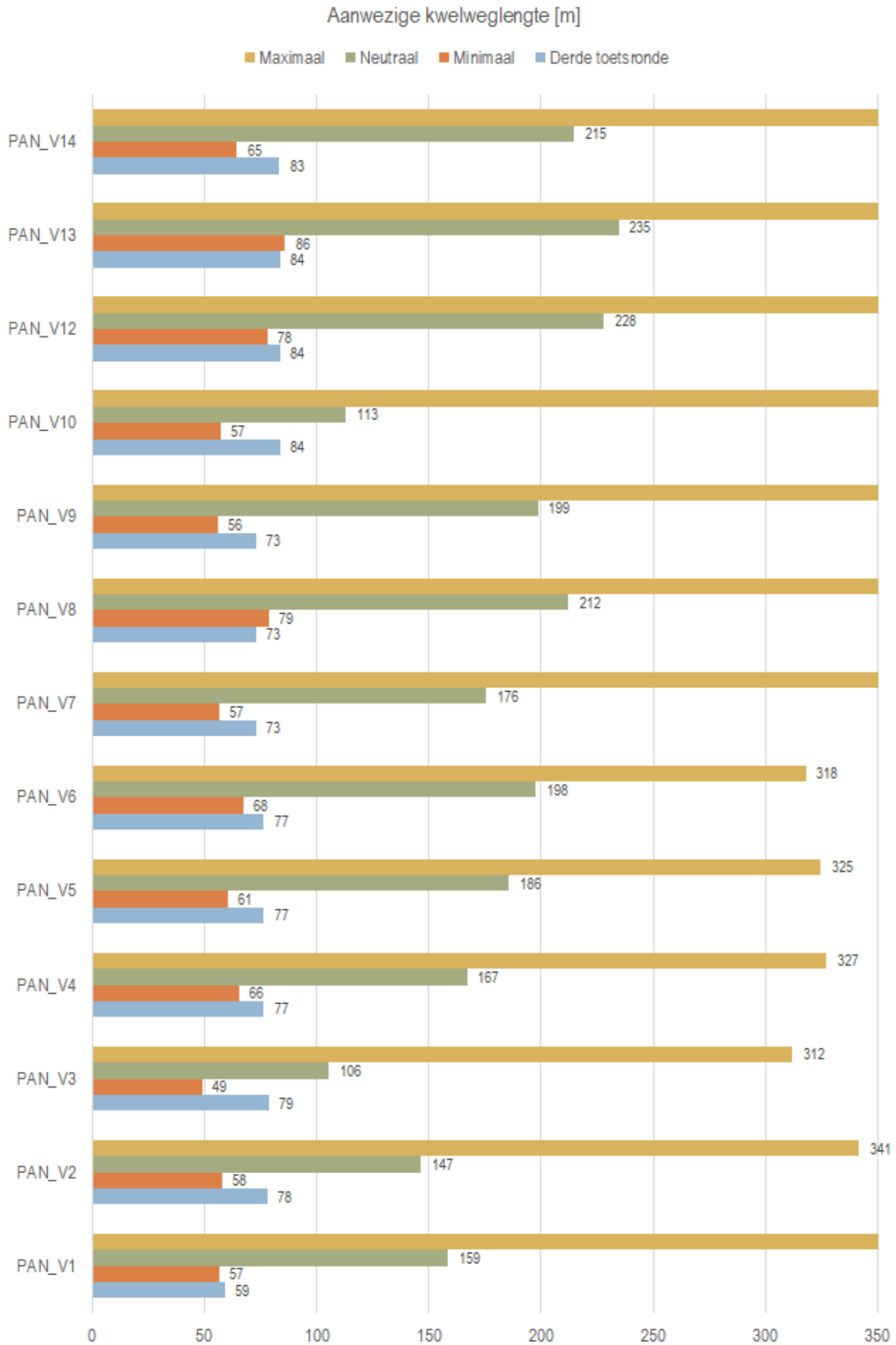
Figuur 84: Kwelweglengtetekort bij Stap 6 representatieve profielen; 's Gravenwaard



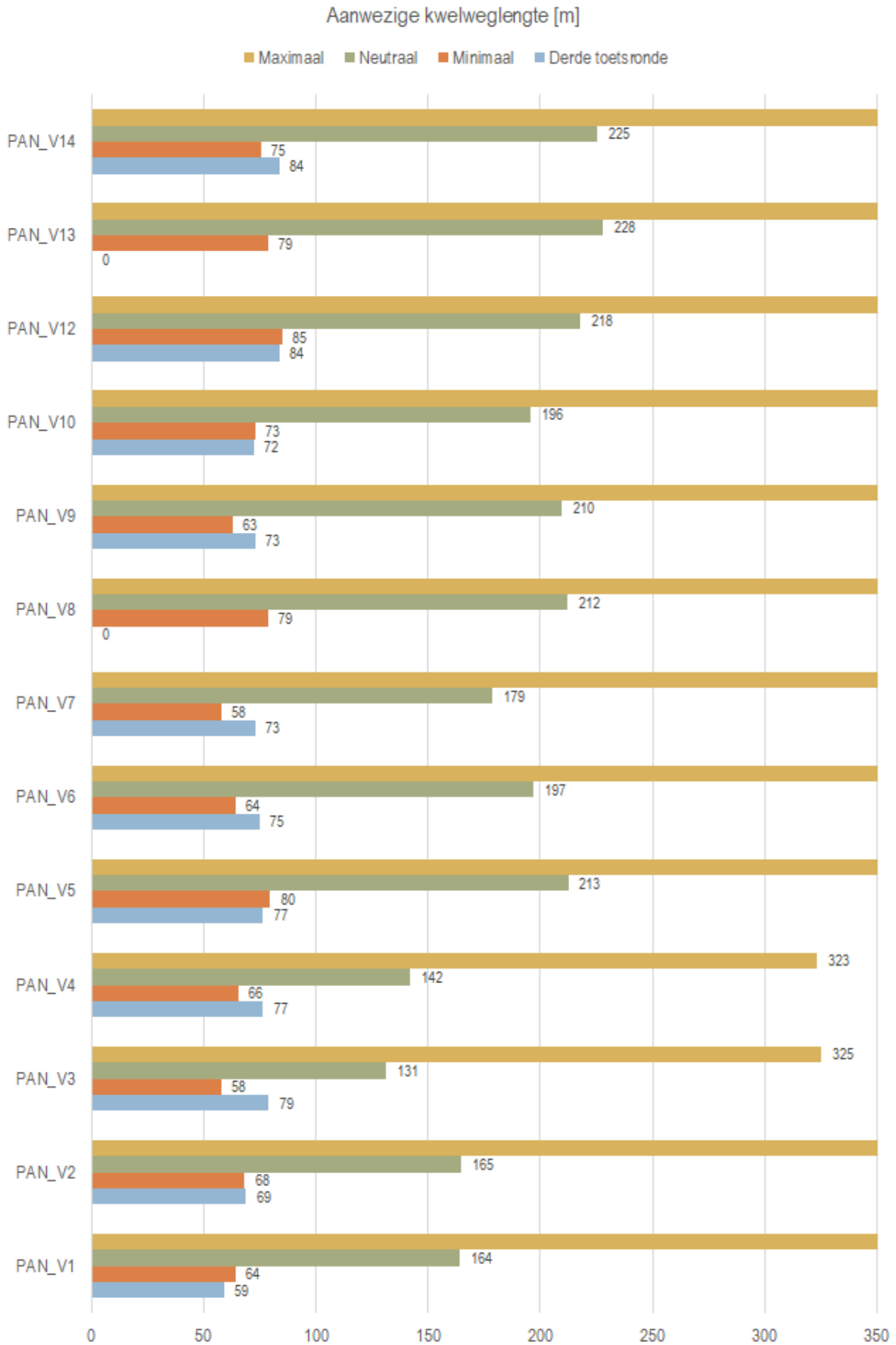
Figuur 85: Kritieke kwelweglengte maatgevende profielen; Pannerden-Kandia



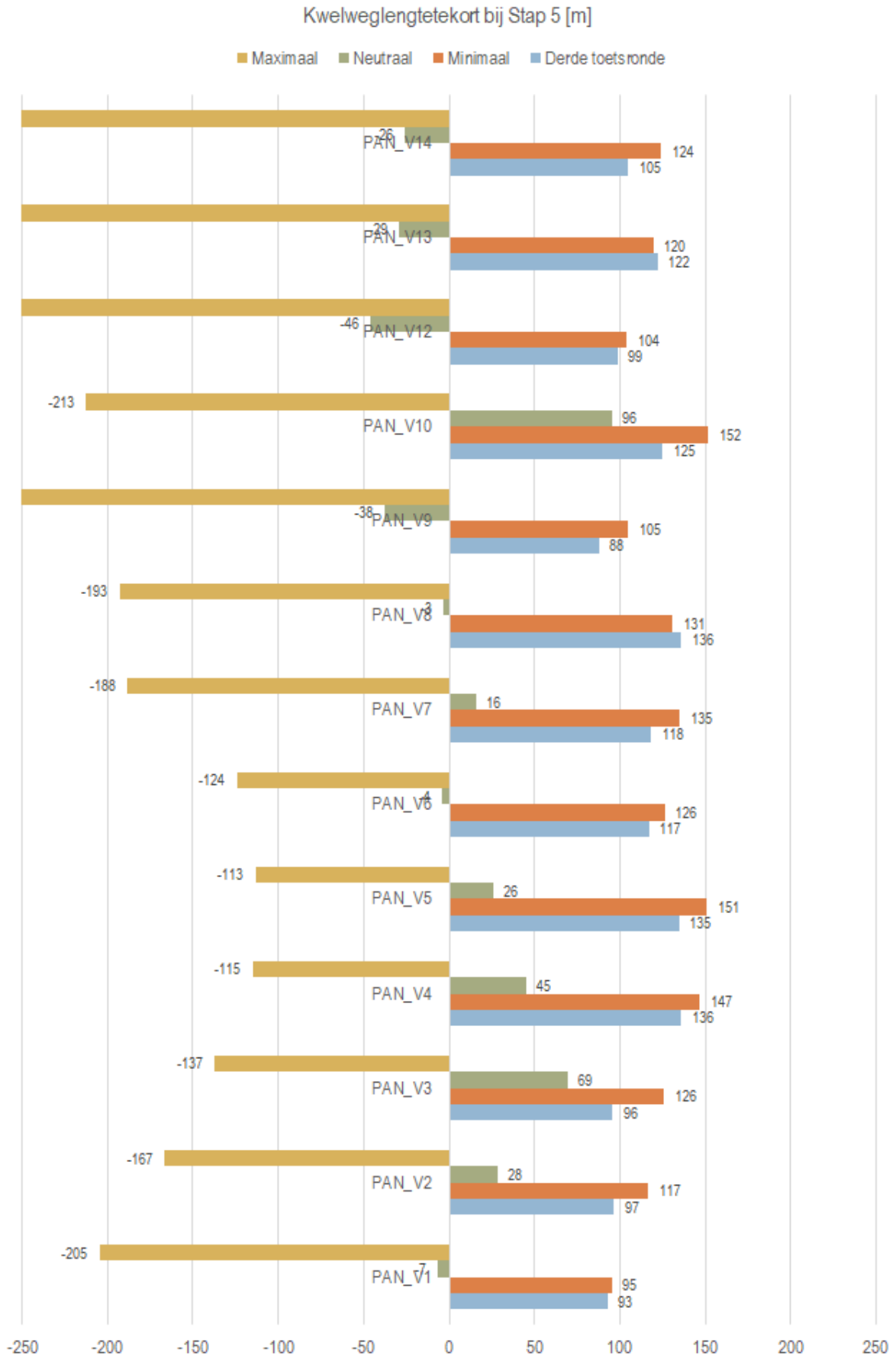
Figuur 86: Kritieke kwelweglengte representatieve profielen; Pannerden-Kandia



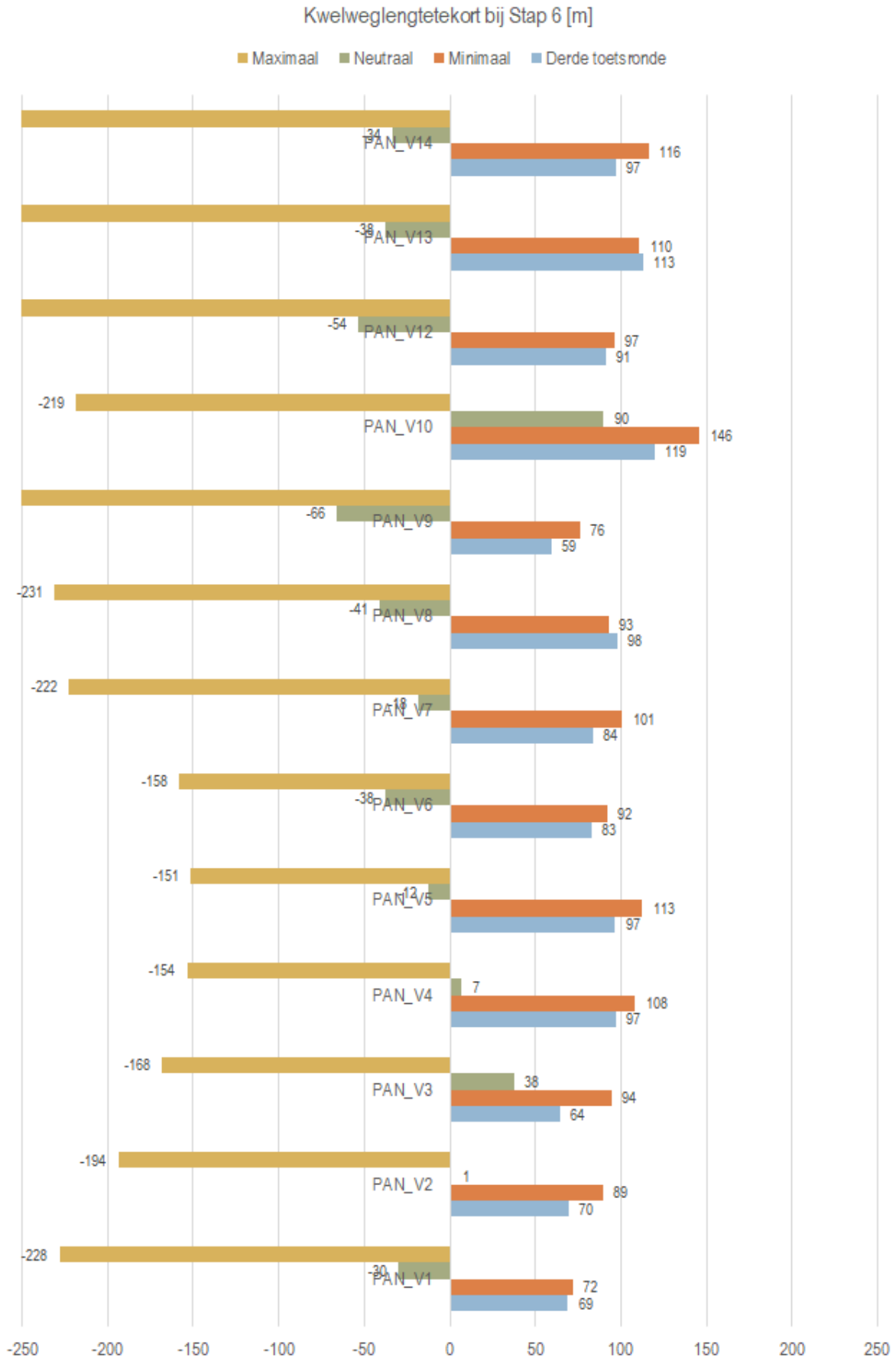
Figuur 87: Aanwezige kwelweglengte maatgevende profielen; Pannerden-Kandia



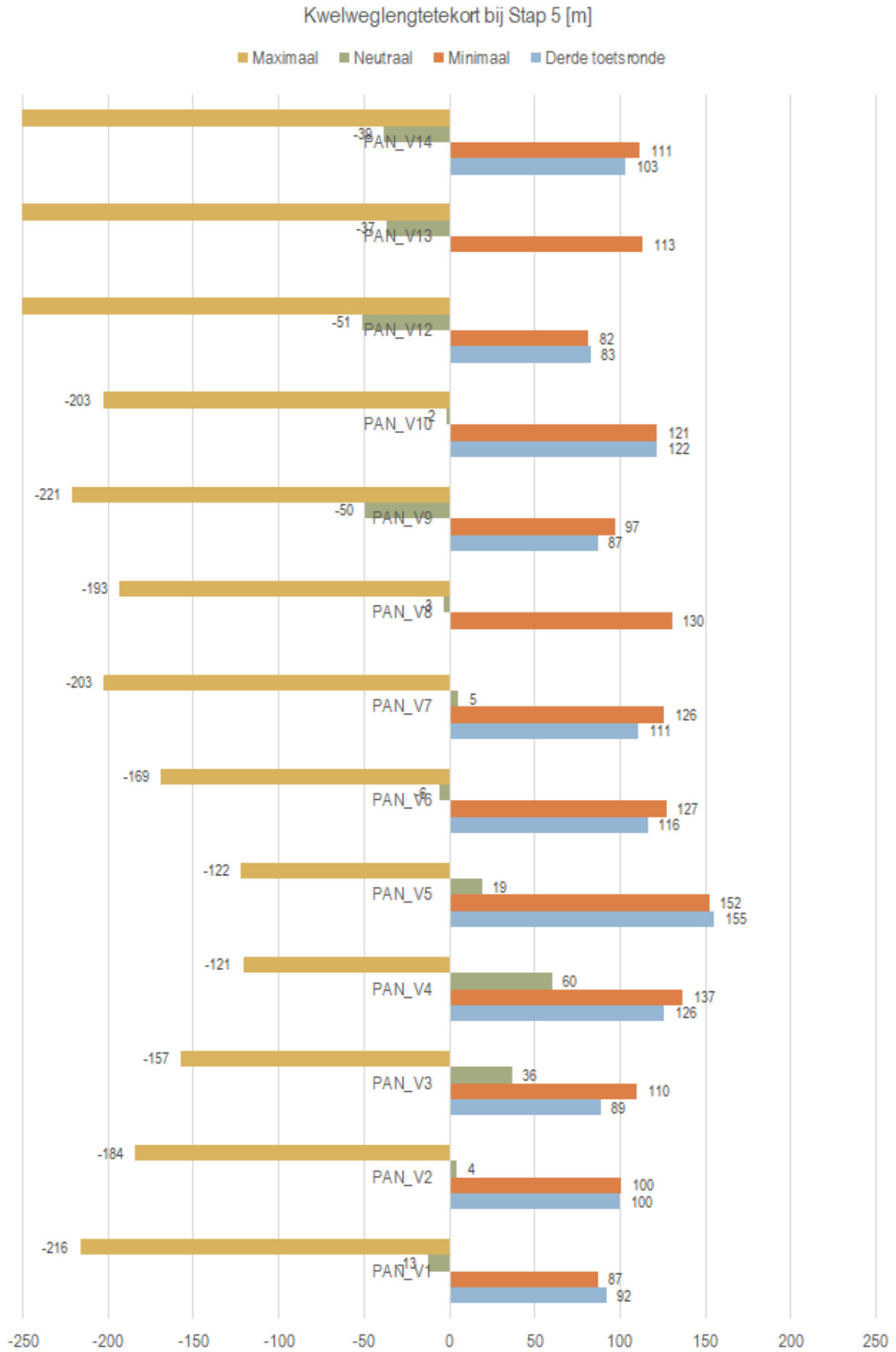
Figuur 88: Aanwezige kwelweglengte representatieve profielen; Pannerden-Kandia



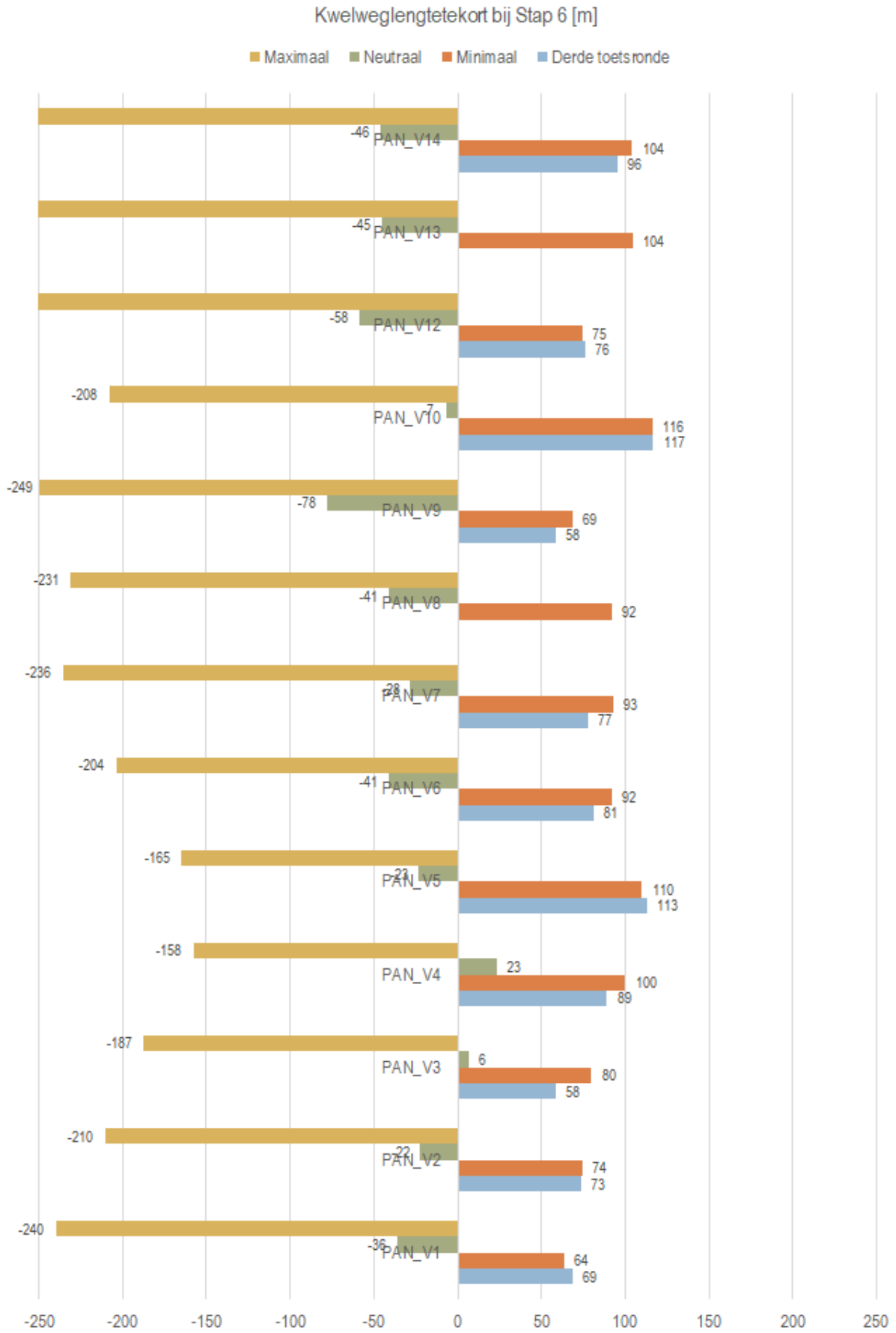
Figuur 89: Kwelweglengtetekort bij Stap 5 maatgevende profielen; Pannerden-Kandia



Figuur 90: Kwelweglengtetekort bij Stap 6 maatgevende profielen; Pannerden-Kandia



Figuur 91: Kwelweglengtetekort bij Stap 5 representatieve profielen; Pannerden-Kandia



Figuur 92: Kwelweglengtetekort bij Stap 6 representatieve profielen; Pannerden-Kandia

6.4 Evaluatie

's Gravenwaard

Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 2 met die bij Stap 1 volgt dat het controleren op piping met toetsregel Sellmeijer 2 leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte. De toename in kritieke kwelweglengte varieert tussen 22 m en 44 m (gemiddeld 34 m) voor maatgevende profielen en tussen 7 m en 42 m (gemiddeld 30 m) voor representatieve profielen.

Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 4 met die bij Stap 2 volgt dat het aanpassen van de geometrie en de dikte van de deklaag gemiddeld genomen leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte. De toename in kritieke kwelweglengte varieert tussen 2 m en 103 m (gemiddeld 33 m) voor maatgevende profielen en tussen 9 m en 77 m (gemiddeld 36 m) voor representatieve profielen. De verslechtering van het oordeel voor piping duidt erop dat in de derde toetsronde niet altijd een veilige schematisatie is gegeven.

Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 5 met die bij Stap 4 volgt dat het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van Stochastische Ondergrond Schematisatie leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte. De toename in kritieke kwelweglengte varieert tussen 16 m en 70 m (gemiddeld 53 m) voor maatgevende profielen en tussen 15 m en 65 m (gemiddeld 50 m) voor representatieve profielen. De toename in kritieke kwelweglengte is het gevolg van het hanteren van een grotere doorlatendheid van het zandpakket in de berekeningen bij Stap 5.

Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 6 met die van Stap 5 volgt dat het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van beschikbare onderzoeken en GeoTOP gemiddeld genomen leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte, terwijl er voor bepaalde profielen sprake is van een afname in kritieke kwelweglengte. De toename in kritieke kwelweglengte varieert tussen -21 m en 118 m (gemiddeld 68 m) voor maatgevende profielen en tussen -22 m en 107 m (gemiddeld 67 m) voor representatieve profielen. De toename in kritieke kwelweglengte is het gevolg van het hanteren van een kleinere korreldiameter D_{70} in combinatie met een grotere dikte en doorlatendheid van het zandpakket in de berekeningen bij Stap 6.

De kritieke kwelweglengte voor het representatieve profiel (bij Stap 5 en Stap 6) is gemiddeld genomen nagenoeg gelijk aan die voor het maatgevende profiel binnen het betrokken vak. De verschillen in de berekende kritieke kwelweglengte zijn kleiner dan 9%. Dit duidt erop dat de vakindeling zodanig is gekozen dat ieder vak een behoorlijk uniforme geometrie en ondergrond kent.

Recent is het beeld ontstaan dat de pipingopgave wordt overschat: de verschillen in veiligheidstekort tussen de dijkvakken is niet meer onderscheidend en past niet bij de verwachting. Als de huidige regels met betrekking tot piping worden toegepast, leidt dit tot een ontwerp dat mogelijk te robuust is. Om meer nuance en differentiatie in de pipingopgave aan te brengen is de beslisboom piping opgesteld (Bijlage 7). Voorwaarde is dat er in dijkversterkingsplannen ruimte wordt gereserveerd voor een pipingmaatregel [1].

Het kwelweglengtetekort bij de minimale intreelijn na het delen van de kritieke kwelweglengte door een factor 2 is gegeven in Tabel 24 en Tabel 25.¹⁰ Voor de groen gearceerde profielen is geen pipingmaatregel benodigd (omdat de aanwezige kwelweglengte groter is dan de kritieke

¹⁰ In de beslisboom piping is een sterktefactor op het kritieke verval geïntroduceerd in de verwachting dat door kennistoename en betere modellering de berekende sterkte met minimaal een factor 2 toeneemt [1]. In deze proefvoetsing is ervoor gekozen om de factor op de kritieke kwelweglengte toe te passen.

kwelweglengte). Voor oranje gearceerde profielen dient volgens de beslisboom ruimte te worden gereserveerd voor een pipingmaatregel (omdat de aanwezige kwelweglengte kleiner is dan de kritieke kwelweglengte, maar groter dan 50% van de kritieke kwelweglengte). Voor de rood gearceerde profielen dient volgens de beslisboom een pipingmaatregel te worden uitgevoerd (omdat de aanwezige kwelweglengte kleiner is dan 50% van de kritieke kwelweglengte), tenzij er lokale criteria van toepassing zijn.

Tabel 24: Kwelweglengtetekort maatgevende profielen bij minimale intreelijn na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2; 's Gravenwaard

Vak ID	Kwelweglengtetekort bij minimale intreelijn na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2 [m]					
	Stap 1: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 1	Stap 2: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 2	Stap 3: Aanpassen geometrie + Sellmeijer 2	Stap 4: Aanpassen dikte deklaag + Sellmeijer 2	Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. SOS + Sellmeijer 2	Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. onderzoeken en GeoTOP + Sellmeijer 2
GRA_V1		-32		-23	-15	16
GRA_V2			-32	-15	-5	-16
GRA_V3			-11	-10	17	66
GRA_V4			-9	-5	26	32
GRA_V5		-7	-8	-6	24	62
GRA_V6			-25	-24	7	49
GRA_V7		-17	-11	-11	21	73
GRA_V8		-16	-18	-7	20	67
GRA_V9		-22	-25	-14	13	61
GRA_V10		-32	-25	-13	22	81
GRA_V11		-15	-18	0	32	43

Tabel 25: Kwelweglengtetekort representatieve profielen bij minimale intreelijn na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2; 's Gravenwaard

Vak ID	Kwelweglengtetekort bij minimale intreelijn na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2 [m]					
	Stap 1: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 1	Stap 2: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 2	Stap 3: Aanpassen geometrie + Sellmeijer 2	Stap 4: Aanpassen dikte deklaag + Sellmeijer 2	Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. SOS + Sellmeijer 2	Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. onderzoeken en GeoTOP + Sellmeijer 2
GRA_V1					-41	-13
GRA_V2			-42	-30	-20	-31
GRA_V3			-16	-15	4	55
GRA_V4		-18	-12	-8	21	27
GRA_V5		-19	-16	-15	14	53
GRA_V6			-33	-32	-1	41
GRA_V7		-28	-22	-22	11	64
GRA_V8			-30	-21	5	52
GRA_V9		-35	-35	-26	1	50
GRA_V10			-35	-19	13	67
GRA_V11		-36		-13	19	30

Pannerden-Kandia

Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 2 met die bij Stap 1 volgt dat het controleren op piping met toetsregel Sellmeijer 2 leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte. De toename in kritieke kwelweglengte varieert tussen 8 m en 43 m (gemiddeld 29 m) voor maatgevende profielen en tussen 12 m en 47 m (gemiddeld 33 m) voor representatieve profielen.

Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 4 met die bij Stap 2 volgt dat het aanpassen van de geometrie en de dikte van de deklaag gemiddeld genomen leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte. De toename in kritieke kwelweglengte varieert tussen 9 m en 102 m (gemiddeld 43 m) voor maatgevende profielen en tussen 3 m en 135 m (gemiddeld 50 m) voor representatieve profielen. De verslechtering van het oordeel voor piping duidt erop dat in de derde toetsronde niet altijd een veilige schematisatie is gegeven.

Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 5 met die bij Stap 4 volgt dat het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van Stochastische Ondergrond Schematisatie leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte. De toename in kritieke kwelweglengte varieert tussen 51 m en 85 m (gemiddeld 68 m) voor maatgevende profielen en tussen 46 m en 91 m (gemiddeld 70 m) voor representatieve profielen. De toename in kritieke kwelweglengte is het gevolg van het hanteren van een grotere doorlatendheid van het zandpakket in de berekeningen bij Stap 5.

Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 6 met die van Stap 5 volgt dat het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van beschikbare onderzoeken en GeoTOP leidt tot een afname in kritieke kwelweglengte. De afname in kritieke kwelweglengte varieert tussen 6 m en 38 m (gemiddeld 25 m) voor maatgevende profielen en tussen 5 m en 42 m (gemiddeld 25 m) voor representatieve profielen. De afname in kritieke kwelweglengte is hoofdzakelijk het gevolg van het hanteren van een kleinere doorlatendheid van het zandpakket in de berekeningen bij Stap 6.

De kritieke kwelweglengte voor het representatieve profiel (bij Stap 5 en Stap 6) is gemiddeld genomen nagenoeg gelijk aan die voor het maatgevende profiel binnen het betrokken vak. De verschillen in de berekende kritieke kwelweglengte zijn kleiner dan 10%. Dit duidt erop dat de vakindeling zodanig is gekozen dat ieder vak een behoorlijk uniforme geometrie en ondergrond kent.

Recent is het beeld ontstaan dat de pipingopgave wordt overschat: de verschillen in veiligheidstekort tussen de dijkvakken is niet meer onderscheidend en past niet bij de verwachting. Als de huidige regels met betrekking tot piping worden toegepast, leidt dit tot een ontwerp dat mogelijk te robuust is. Om meer nuance en differentiatie in de pipingopgave aan te brengen is de beslisboom piping opgesteld (Bijlage 7). Voorwaarde is dat er in dijkversterkingsplannen ruimte wordt gereserveerd voor een pipingmaatregel [1].

Het kwelweglengtetekort bij de minimale intreelij na het delen van de kritieke kwelweglengte door een factor 2 is gegeven in Tabel 26 en Tabel 27.¹¹ Voor de groen gearceerde profielen is geen pipingmaatregel benodigd (omdat de aanwezige kwelweglengte groter is dan de kritieke kwelweglengte). Voor oranje gearceerde profielen dient volgens de beslisboom ruimte te worden gereserveerd voor een pipingmaatregel (omdat de aanwezige kwelweglengte kleiner is dan de kritieke kwelweglengte, maar groter dan 50% van de kritieke kwelweglengte). Voor de rood gearceerde profielen dient volgens de beslisboom een pipingmaatregel te worden uitgevoerd (omdat

¹¹ In de beslisboom piping is een sterktefactor op het kritieke verval geïntroduceerd in de verwachting dat door kennistoename en betere modellering de berekende sterkte met minimaal een factor 2 toeneemt [1]. In deze proefvoetsing is ervoor gekozen om de factor op de kritieke kwelweglengte toe te passen.

de aanwezige kwelweglengte kleiner is dan 50% van de kritieke kwelweglengte), tenzij er lokale criteria van toepassing zijn.

Tabel 26: Kwelweglengtetekort maatgevende profielen bij minimale intreelijn na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2; Pannerden-Kandia

Vak ID	Kwelweglengtetekort bij minimale intreelijn na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2 [m]					
	Stap 1: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 1	Stap 2: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 2	Stap 3: Aanpassen geometrie + Sellmeijer 2	Stap 4: Aanpassen dikte deklaag + Sellmeijer 2	Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. SOS + Sellmeijer 2	Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. onderzoeken en GeoTOP + Sellmeijer 2
PAN_V1		-20	-21	-9	19	8
PAN_V2		-19	-6	-4	29	16
PAN_V3			-9	-1	38	23
PAN_V4	-32	-10	-3	-1	41	21
PAN_V5	-27	-5	-5	4	45	26
PAN_V6		-19	-13	-9	29	12
PAN_V7	-25	-4	-3	1	39	22
PAN_V8		-30	-16	-16	26	7
PAN_V9		-16	-15	-8	24	10
PAN_V10	-20	-5	6	20	47	45
PAN_V12			-24	-12	13	9
PAN_V13			-14	-12	17	12
PAN_V14			-8	4	30	26

Tabel 27: Kwelweglengtetekort representatieve profielen bij minimale intreelijn na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2; Pannerden-Kandia

Vak ID	Kwelweglengtetekort bij minimale intreelijn na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2 [m]					
	Stap 1: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 1	Stap 2: Invoer derde toetsronde + Sellmeijer 2	Stap 3: Aanpassen geometrie + Sellmeijer 2	Stap 4: Aanpassen dikte deklaag + Sellmeijer 2	Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. SOS + Sellmeijer 2	Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket o.b.v. onderzoeken en GeoTOP + Sellmeijer 2
PAN_V1		-29	-27	-17	11	0
PAN_V2		-29	-22	-16	16	3
PAN_V3		-29	-19	-12	26	11
PAN_V4		-13	-13	-4	36	17
PAN_V5		-21	-16	-9	36	15
PAN_V6	-32	-11	-9	-7	31	14
PAN_V7	-25	-5	-5	-3	34	17
PAN_V8			-16	-16	26	7
PAN_V9		-22	-20	-15	17	3
PAN_V10		-34	-18	-6	24	22
PAN_V12			-36	-25	-2	-5
PAN_V13			-20	-23	17	13
PAN_V14			-17	-8	18	14

7 D-Geo Flow berekeningen

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden met behulp van de software D-Geo Flow analyses uitgevoerd naar gevoeligheden van in inputwaarden op het optreden van piping. Aan de hand van het doorrekenen van een viertal gekozen doorsnedes wordt hiermee inzicht verkregen in het effect van de inputwaarden op het kritieke verval. Tot slot is voor elke D-Geo Flow berekening een analytische som met overeenkomstige uitgangspunten uitgevoerd. Met deze resultaten wordt geanalyseerd welke (eventuele) verschillen zich tussen de analytische Sellmeijer en D-Geo Flow methodes voor doen.

Onderzocht zijn de gevoeligheden van de kwelweglengte, de gelaagdheid van de grondopbouw, de anisotropie van de grondlagen in het watervoerend pakket, de doorlatendheid van de bovenste grondlagen in het watervoerend pakket en de doorlatendheid van de deklaag in het voor- en achterland

7.2 Algemeen

D-Geo Flow is een graphical user interface voor het eindige elementen rekenplatform DGFlow. Het model bevat een pipingmodule, gebaseerd op het model van Sellmeijer, om bij een gegeven waterstandsverloop te kunnen beoordelen of piping kan optreden.

In D-Geo Flow is het mogelijk om 2D transiënte grondwaterstromingsberekeningen uit te voeren met een gelaagde grondopbouw waarin zowel een tijdsafhankelijke hydraulische belasting, de samendrukbaarheid van het korrelskelet en het grondwater, en verandering van de freatische lijn meegenomen kunnen worden.

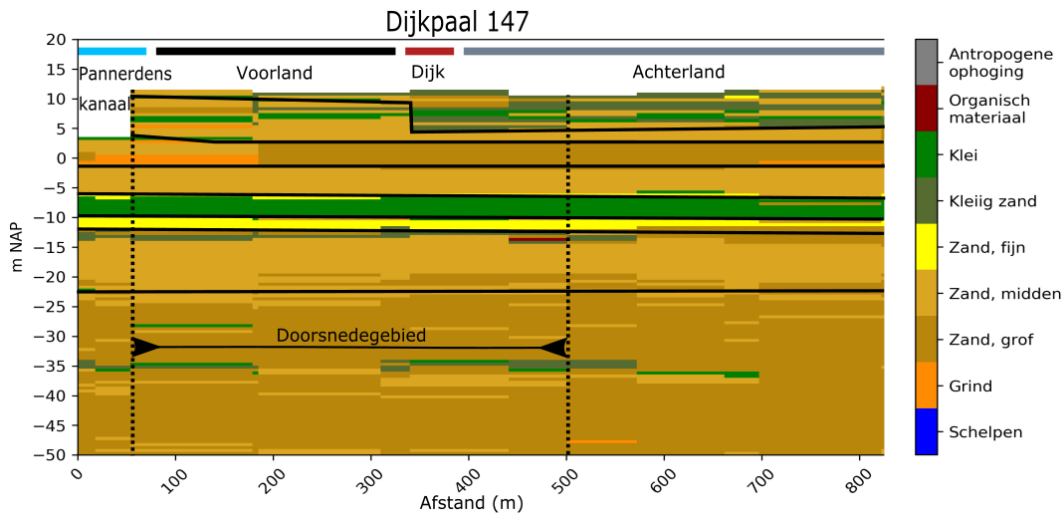
Met behulp van de software D-Geo Flow zijn berekeningen uitgevoerd voor een verkleining van het watervoerend pakket en het toevoegen van anisotropie op de zandige en grindige bodemsoorten. De voordelen van D-Geo Flow zijn de mogelijkheden om een watervoerend pakket op te delen in meerdere bodemlagen met ondergrondkarakteristieken. Dit resulteert in de mogelijkheid voor detaillering van de bodemopbouw in een model. In de analytische Sellmeijer sommen kan alleen gerekend worden met een enkele inputwaarde voor bijvoorbeeld de doorlatendheid. Met D-Geo Flow kan dus gestreefd worden naar een aanscherping op de resultaten uit Sellmeijer.

Voor de doorsnedes bij dijkpaal 75 en 152 zijn enkel berekeningen uitgevoerd met de variatie in het intredepunt zoals bepaald in Hoofdstuk 6.2. Met de modellen op dijkpaal 72 en 147 is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Hiervoor is eerst een “basismodel” als uitgangspunt voor de doorgerekende dwarsprofielen vastgesteld. Vervolgens is gekeken naar de gevoeligheid van de dwarsprofielen op het gebied van intredepunt, uittredepunt, doorlatendheid van de bovenste 3 watervoerende lagen en de doorlatendheid van de deklaag. Het initiële “basismodel” heeft het intredepunt bij de oever van de rivier of nevengeul en het uittredepunt bij de binnenteen. Het kan voorkomen dat het initiële “basismodel” niet faalt binnen de hoogwaterstand op kruinhoogte. In dit geval wordt het eerst falende model op basis verplaatsing van intredepunt gekozen als “basismodel” voor de verdere gevoeligheidsanalyse, waarbij voor het intredepunt de drie opties uit Paragraaf 5.2 leidend zijn. De gevoeligheid wordt vervolgens waargenomen aan de hand van de resulterende kritieke vervallen.

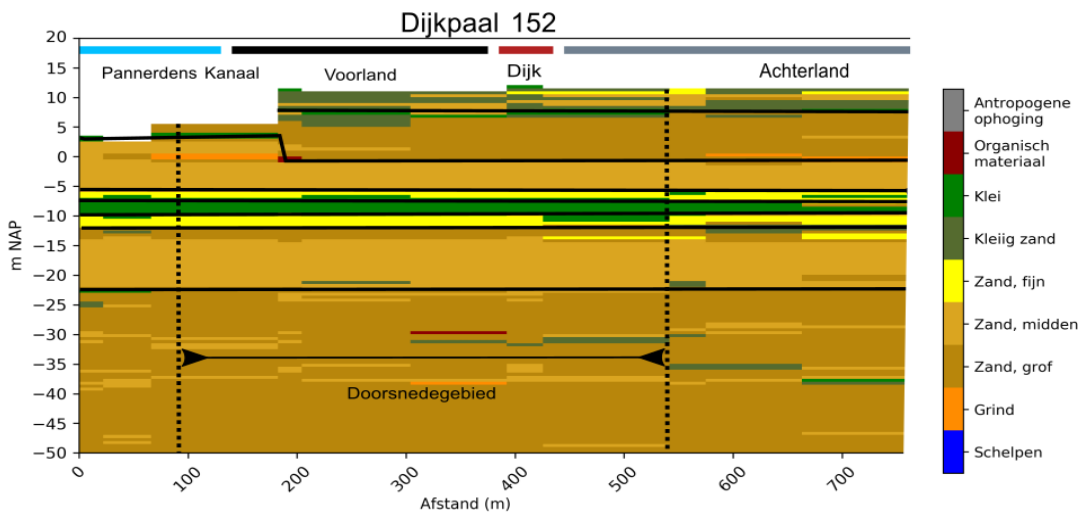
7.3 Uitgangspunten

Bodemopbouw en input parameters

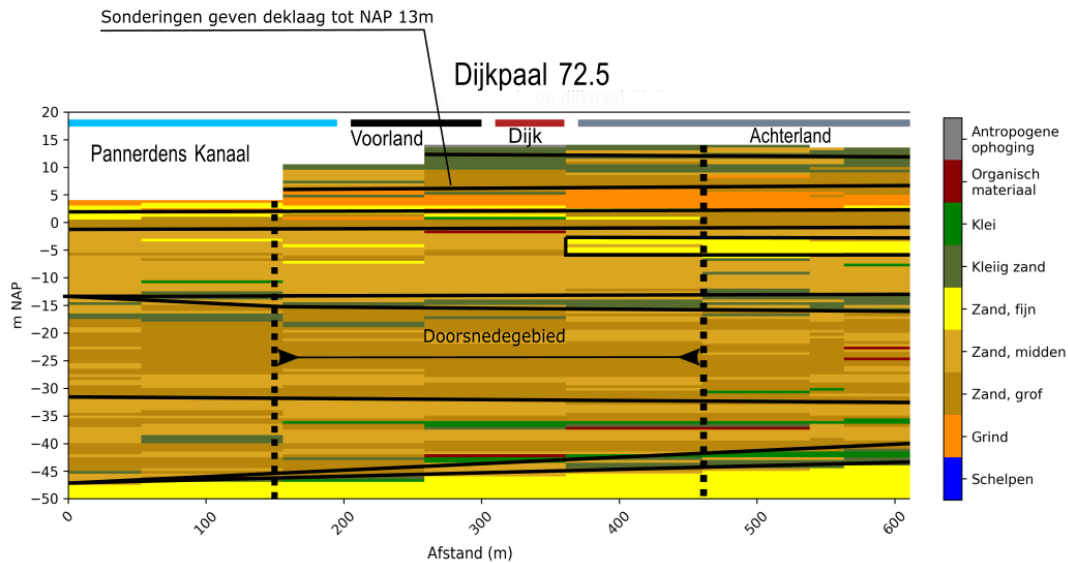
De schematisering van de ondergrond is uitgevoerd aan de hand van GeoTOP doorsnedes. In Figuur 93 tot en met Figuur 96 wordt de laagindeling bij de doorgerekende doorsnedes gegeven. Ten behoeve van deklagen is in de keuze voor een laagsplitsing met name gekeken naar voor en achterland. De input parameters voor de verschillende bodemklassen komen voort uit Hoofdstuk 3. Dit resulteert voor de D-Geo Flow sommen in het gebruik van karakteristieke en gemiddelde waarden voor de D70 en doorlatendheden.



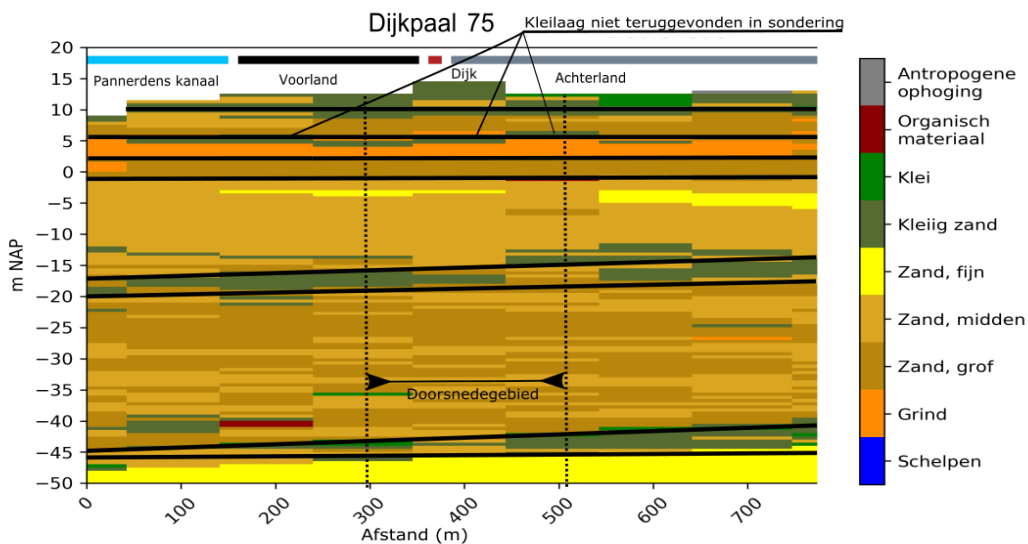
Figuur 93: Pannerden-Kandia dijkpaal 147 laagindeling D-Geo Flow met GeoTOP



Figuur 94: Pannerden-Kandia dijkpaal 152 D-Geo Flow met GeoTOP



Figuur 95: 's Gravenwaard dijkpaal 72 laagindeling D-Geo Flow met GeoTOP



Figuur 96: 's Gravenwaard dijkpaal 75 laagindeling D-Geo Flow met GeoTOP

Voor de parameter input is voornamelijk gebruik gemaakt van karakteristieke waarden. De gevoeligheidsanalyse en basismodellen worden daarnaast ook doorgerekend met gemiddelde waarden. Dit betreft het bepaalde basismodel met de, wanneer aanwezig, drie verschillende intrede locaties.

Om een vergelijking met de analytische Sellmeijer te realiseren zijn ook sommen gedraaid met een uniforme waarde voor het watervoerend pakket (WVP). Deze uniforme waarden zijn afgeleid uit laagopbouw onder de pipe in D-Geo Flow doorsnede. Dit gaat in combinatie met de gemiddelde of karakteristieke input voor de doorlatendheid. Daarnaast is de bijbehorende karakteristieke of gemiddelde waarde voor de D70 ingevoerd in de modellering. De berekende uniforme doorlatendheden van het watervoerend pakket voor de karakteristieke en gemiddelde waarden zijn gegeven in Tabel 28 en Tabel 29. Het resultaat is berekening van het kritieke verval met over de gehele diepte van het watervoerend pakket een uniforme input waarde voor de doorlatendheid en D70.

Tabel 28: Uniforme doorlatendheid watervoerend pakket bepaald uit karakteristieke waarden

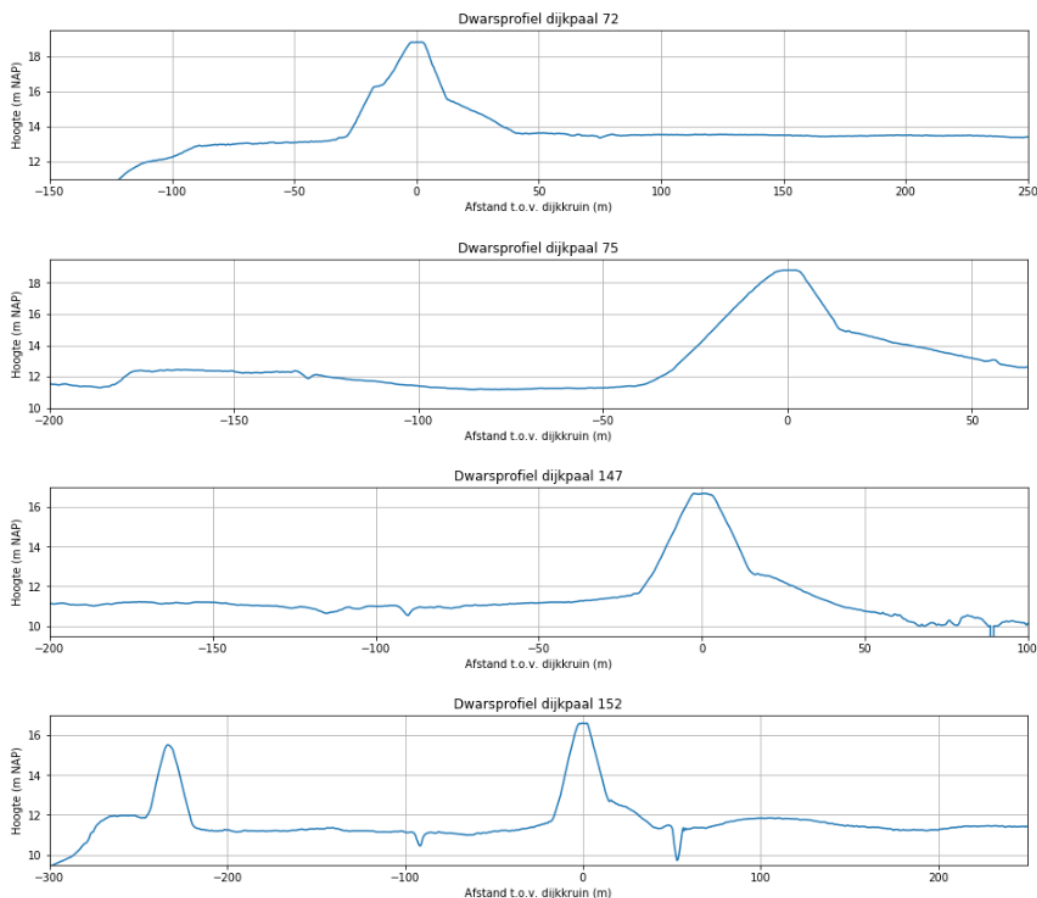
Dijkpaal	Uniforme horizontale doorlatendheid (m/dag)	Uniforme verticale doorlatendheid (m/dag)
72 ('s Gravenwaard)	333,1	111,6
75 ('s Gravenwaard)	377,3	126,4
147 (Pannerden-Kandia)	184,8	62,6
152 (Pannerden-Kandia)	187,4	63,6

Tabel 29: Uniforme doorlatendheid watervoerend pakket bepaald uit gemiddelde waarden

Dijkpaal	Uniforme horizontale doorlatendheid (m/dag)	Uniforme verticale doorlatendheid (m/dag)
72 ('s Gravenwaard)	171,4	57,3
75 ('s Gravenwaard)	194,0	64,9
147 (Pannerden-Kandia)	94,9	32,0
152 (Pannerden-Kandia)	96,3	32,5

Dwarsprofielen

Doordat het maaiveldniveau in GeoTOP te grof is, wordt gebruik gemaakt van dwarsprofielen met maaiveldhoogtes vanuit het AHN2 en DTM van het Waterschap Rijn en IJssel (6). Met behulp van deze dwarsprofielen is een detaillering in maaiveldniveau 's en dijkprofiel gedaan. De dwarsprofielen zijn gegeven in Figuur 97.



Figuur 97: Dwarsprofielen doorsnedes D-Geo Flow

Waterstanden

Aan de buitendijkse zijde, linkerzijde in de dwarsprofielen van Figuur 97, bestaat de oppervlaktewaterstand uit het hoogwater. Door het stapsgewijs verhogen van deze buitenwaterstand wordt gezocht naar het kritieke verval. De binnenwaterstand is gelijk gekozen aan het maaiveldniveau ten hoogte van het uittredepunt. Zoals in Hoofdstuk 2.3 bepaald, bestaan de gebieden om de trajecten uit vrij afwaterend gebieden en is er geen sprake van vaste polderpeilen achter de dijksecties.

Intrede- en uittredepunt

Wanneer in het D-Geo Flow model op de locatie van het intredepunt een deklaag aanwezig is, moet handmatig een aanpassing gemaakt worden. Een insnede in de eventuele deklaag tot de bovenkant van het watervoerend pakket is benodigd. Dit heeft te maken met het koppelen van de pipe aan de randvoorwaarde van het hoogwater. Een intredeweerstand is dus afwezig. Dit is een conservatieve benadering, aangezien hoogwater minder weerstand ondervindt bij het intredepunt. In dit geval geeft de berekeningen eerder piping als in de praktijksituatie.

De uittredepunten liggen onder een deklaag. Hierdoor is er gewerkt met de heave randvoorwaarde uit (10). Met behulp van deze randvoorwaarde wordt de uittredeweerstand met de 0.3D regel meegenomen.

Voor- en achterland

De lengte van het voor en achterland worden bepaald met enige consistentie. Het voorland heeft de lengte tot de oever van de aanwezige rivier of nevengeul. Voor het achterland is gekozen om minimaal 1x de kwellingte achter het uittredepunt aan te houden. Dit is belangrijk om niet welkome effecten van de opgegeven randvoorwaarden te vermijden.

Grid instellingen

In een iteratief proces zijn de stapgrootte en grid bepaald. Het oplopende hoogwater in combinatie met de tijdstappen is afgesteld op rekenstappen met 1 centimeter stijging van het buitenwater. Het model van dijkpaal 147 heeft een grote rekentijd. Om de rekentijd te beperken, is gebruik gemaakt van een rekenstap van 2 centimeter buitenwaterstandsverhoging. Voordat deze keuze gemaakt is, zijn controles uitgevoerd naar het verschil in resultaat. Geen significant verschil in resultaten werd gevonden.

Het grid heeft een fijne pipe coarsness. De inputwaarde betreft, afhankelijk van het model, 4 of 5. Dus veel detail. Aangezien veelal een dunne laag aan de bovenzijde van het model aanwezig is, wordt hiermee een goed gedetailleerd aantal cellen in het grid over het horizontaal rondom de pipe meegenomen. Voor het overige grid, default mesh coarsness, is een waarde tussen 1 en 3 meter gekozen. Dit resulteert in minder cellen in de grondlagen verder gelegen van de pipe, maar voldoende detail voor een stabiel resultaat. Met de mesh coarsness is iteratief een optimum gevonden voor het aantal grid cellen ten opzichte van de rekentijd. Hieruit komt naar voren dat minimaal twee lagen grid cellen per geschematiseerde laag veilig is. Er wordt in een aantal gevallen een gelijk resultaten gevonden voor enkele geschematiseerde lagen met een enkele laag grid cellen.

7.4 Randvoorwaarden

In de modellering is gebruik gemaakt van een vijftal randvoorwaarden. Een submerging, head, seepage, heave en no-flow randvoorwaarde. De submerging en head randvoorwaarde zijn respectievelijk buitendijks en binnendijks toegepast, waarbij de submerging randvoorwaarde het oplopende hoogwater representeert. Deze is toegepast over top van het model in het voorland tot de kruin van de dijk en over de linkerzijde van de modellen.

De head randvoorwaarde wordt over het gehele achterland op de top van het model toegepast met als input de binnendijkse grondwaterstand. In dit geval de maaiveldhoogte ter plaatse van het uittredepunt. Overig achterland wordt ingevuld met een seepage randvoorwaarde. Ook worden de binnendijkse zijde en de kruin ingevuld met een seepage randvoorwaarde.

De heave randvoorwaarde komt aan het rechter uiteinde van de pipe. De linkerzijde van de pipe grenst aan de randvoorwaarde van het hoogwater. Tot slot is een no-flow randvoorwaarde toegepast op de complete onderzijde en rechterzijde van de modellen. Bij het toepassen van een vaste head volgt een verlaging van een kritiek verval in relatie tot het verlengen van het achterland. Een verlengt achterland geeft bij een no-flow randvoorwaarde geen significante verschillen in kritiek verval en dus geen zogeheten boundary-effect.

7.5 Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse

In Tabel 30 zijn de uitgangspunten voor variatie in de gevoeligheidsanalyse gegeven. Het gekozen "basismodel" voor elk van de berekende dwarsprofielen wordt bij elk van de vier soorten scenario's als startpunt gebruikt.

Bij de variatie van de afstanden van in- en uittredepunt wordt bekeken wat de afstand tot binnen- of buitenteen voor invloed heeft op het kritieke verval. De variatie in doorlatendheid voor de watervoerende lagen geeft inzichten voor het eventueel belang van een modellering met een meerlaags watervoerend pakket. Tot slot wordt het belang van de doorlatendheid van de deklaag voor het kritieke verval bekeken. Dit voor zowel een aanpassing in de complete deklaag als voor een aanpassing in enkel het achterland.

Tabel 30: Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse

Scenario	Variatie	Opmerking
Intredepunt	Oever, neutraalpunt (150m uit buitenteen) en buitenteen	DP72 voorland korter als 150 meter, dus enkel oever en buitenteen
Uittredepunt	Binnenteen, binnenteen +25 meter en binnenteen + 50 meter	DP72 en DP147 hebben verdunning deklaag 25 meter uit de binnenteen
Doorlatendheid toplagen watervoerend pakket	Verkleining doorlatendheden opwaarts en verkleining benedenwaarts aan de hand van hoog en laag karakteristieken toplagen	Standaard benedenwaartse verkleining van de doorlatendheid aanwezig maar de extremen zijn opgezocht. Bij DP72 ondergrenswaarde grindlaag teruggebracht tot input midden grof zand.
Doorlatendheid deklaag	0.02, 0.1, 0.5, 1 en 5 meter per dag	0.02 meter per dag is de laagkarakteristiek van zandige Klei en 0.1 is de input van het basismodel.
Doorlatendheid deklaag achterland	0.02, 0.1, 0.5, 1 en 5 meter per dag voor enkel de deklaag in het achterland	Het voorland heeft de initiële doorlatendheid van de deklaag behouden van 0.1 meter per dag.

Het scenario met de verkleining van de doorlatendheid in de watervoerende lagen heeft wat aanvullende toelichting nodig. Voor zowel Dijkpaal 72 als 147 is gebruik gemaakt van de eerste drie geschematiseerde grondlagen in het watervoerende pakket. Deze zijn respectievelijk grof zand, grind en grof zand of middel grof zand, grof zand en middel grof zand. Gestreefd is naar een verkleining

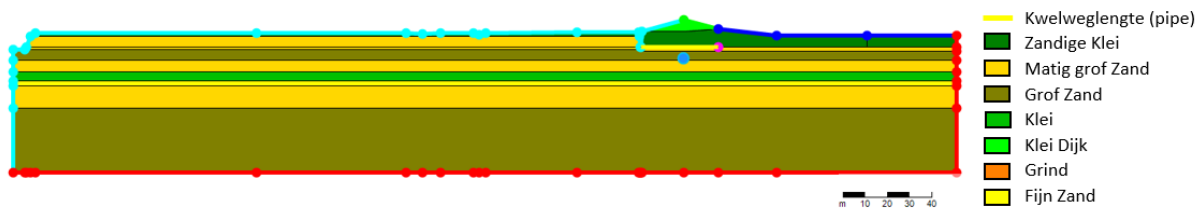
van de doorlatendheid opwaarts en benedenwaarts door hoog en laagkarakteristieken van de geschematiseerde watervoerende lagen in te vullen. Dit betekent, dat bij dijkpaal 147 de hoog karakteristiek van matig grof zand in combinatie met de laagkarakteristiek van grof zand. Dit resulteert vervolgens in een verkleining van de doorlatendheid benedenwaarts.

Het invullen van deze eigenschappen resulteert voor het verloop van de doorlatendheid in de ondergrond bij dijkpaal 147, vanuit deze variatie, direct in het gewenste opwaarts of benedenwaarts effect van verkleining. Voor dijkpaal 72 is, zoals in de opmerking bij Tabel 30 gegeven, dit benodigde effect geforceerd door de laagkarakteristiek van de grindlaag te vervangen door de inputwaarde van midden grof zand. Dit is benodigd door de initieel hoge doorlatendheid van het grind. Met behulp van deze aanpak kan een goede analyse en inzicht verkregen worden voor verschillende typen verkleining van de doorlatendheid in de bovenste regionen van het watervoerende pakket.

7.6 Resultaten

Gevoeligheidsanalyse Pannerden-Kandia dijkpaal 147

Het basismodel voor dijkpaal 147 is gegeven in Figuur 98. In dit model ontstond voor het optredende hoogwater enkel piping bij een kwallengte tussen binnenteen en buitenteen. Dit model is gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse, zoals gepresenteerd in Tabel 30. Bij de andere intredepunten is het hoogwater door gemodelleerd tot boven de kruinhoogte. Hiermee wordt een indicatie gegeven voor de oversterkte van de dijk ten opzichte de betreffende intredepunten.



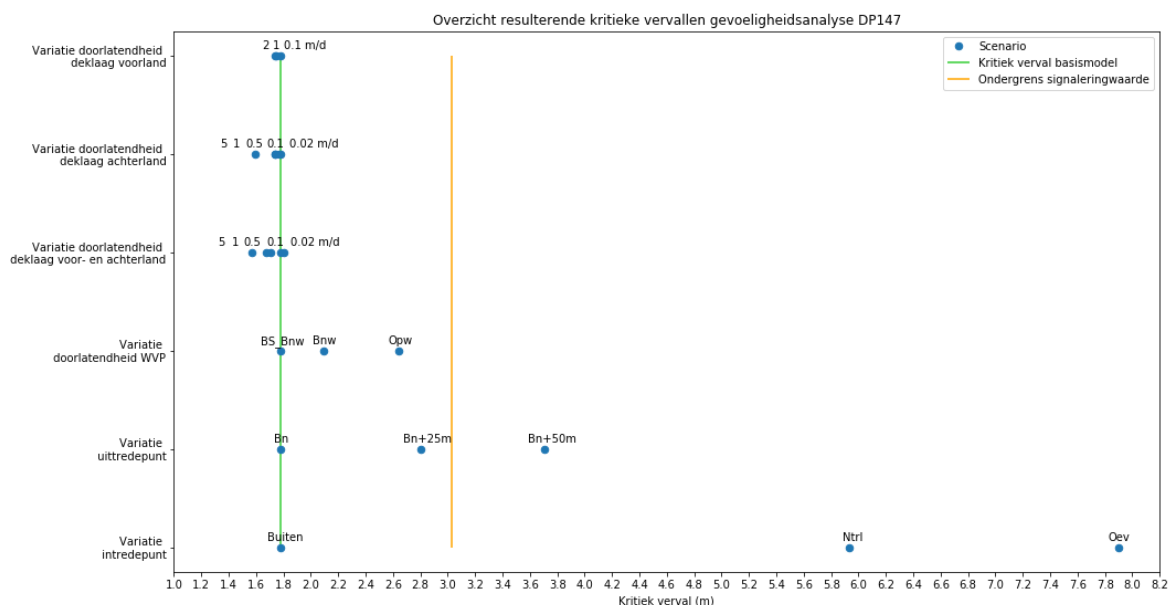
Figuur 98: Schematisatie basismodel dijkpaal 147 in D-Geo Flow

Bijlage 8 geeft de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor dijkpaal 147 op het traject Pannerden-Kandia. Een overzicht van de resultaten van alle scenario's is gegeven in Figuur 99. De berekende waarden van de kritieke vervallen zijn gegeven in Tabel 31. Het volgende wordt opgemerkt uit de resultaten van de berekeningen:

- Geen piping bij het neutraalpunt en de oever binnen de ondergrenswaarde voor hoogwater. Bij een intrede bij de buitenteen treedt piping wel op binnen de norm. Kleinere kwallengte geeft logischerwijs meer piping.
- Een verder gelegen uittredepunt geeft een grotere kwallengte en resulteert in een veiliger/hoger kritiek verval. Verdunning van de deklaag in het achterland is niet van een dergelijke grootte, dat dit een maatgevende situatie voor piping creëert.
- Een opwaartse of neerwaartse verkleining van de doorlatendheid in het watervoerend pakket heeft zijn invloeden op het kritiek verval. Verkleining opwaarts geeft een hoger kritiek verval dan een verkleining benedenwaarts. Verkleining opwaarts zal veiliger zijn ten behoeve van piping. D-Geo Flow kan op dit punt zijn waarde laten zien.
- Verhoging van de doorlatendheid van de complete deklaag geeft een onveiligere situatie. Veiligere situatie bij verlaging van de doorlatendheid. De situatie van 5 meter per dag representeert een aanwezige holocene zandige deklaag, waarbij in de praktijk meerdere factoren als kwallengtes een rol kunnen gaan spelen. Hetzelfde geldt voor wijzigingen van de doorlatendheid in de deklaag van het voorland.
- Voor dijkpaal 147 is het doorlatend maken van de deklaag in het achterland negatief voor het kritieke verval. Deze wordt een aantal centimeter lager en piping zal net iets sneller

optreden. Enkel de doorlatendheid van 5 meter per dag geeft een groter verschil. Hier moet gesteld worden, dat met deze waarde voor de doorlatendheid in de praktijk geen deklaag aanwezig is. In het algemeen is een lage gevoeligheid aanwezig.

- Op de gevallen met een ver gelegen intredepunt na, wordt niet voldaan aan de ondergrenswaarde voor hoogwater. Dit betekent dat met een berekening voor karakteristieke waarden de dijk op dijkpaal 147 afgekeurd wordt.

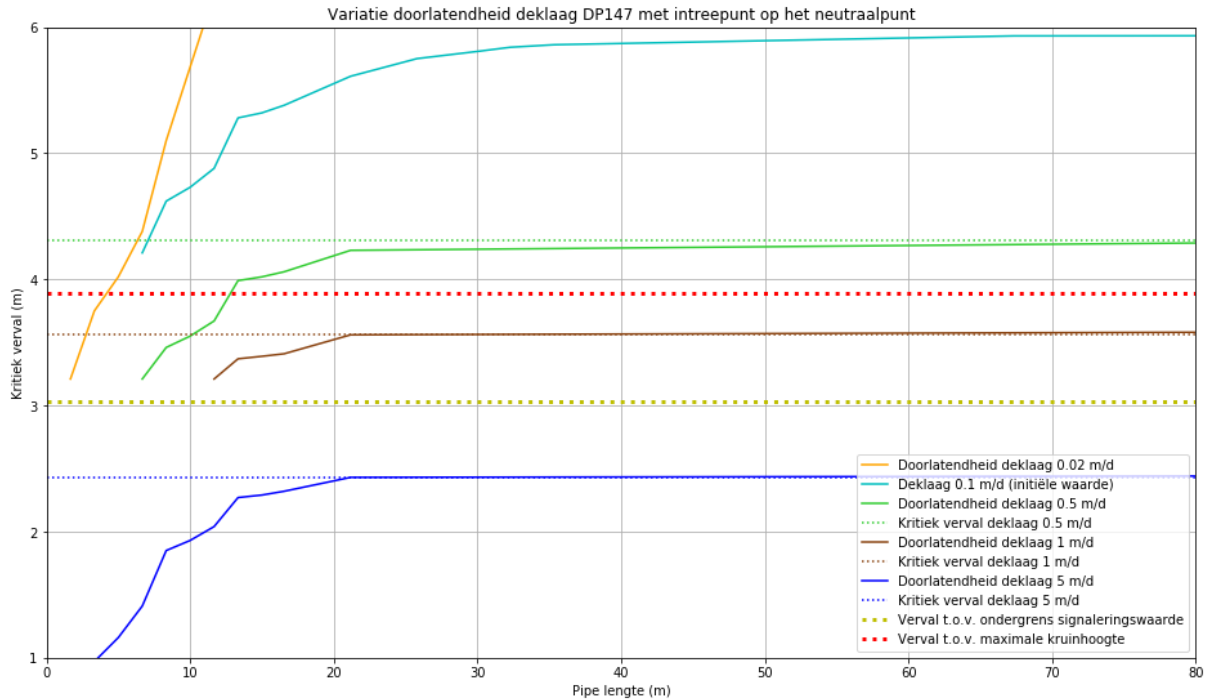


Figuur 99: Overzichtsweergave scenario's gevoeligheidsanalyse dijkpaal 147

Tabel 31: Resulterende kritieke vervallen gevoeligheidsanalyse dijkpaal 147

Scenario Dijkpaal147	Kritiek verval (m)
Intredepunt: Binnenteen (<u>Basismodel</u>)	1,78
Intredepunt: Neutraalpunt	5,93
Intredepunt: Oever	7,90
Uittredepunt: Buitenteen (<u>Basismodel</u>)	1,78
Uittredepunt: Buitenteen + 25 meter	2,80
Uittredepunt: Buitenteen + 50 meter	3,71
Doorlatendheden WVP: Verkleining doorlatendheid opwaarts	2,64
Doorlatendheden WVP: Verkleining doorlatendheid benedenwaarts	2,09
Doorlatendheid deklaag: 0,02 meter per dag	1,8
Doorlatendheid deklaag: 0,1 meter per dag (<u>Basismodel</u>)	1,78
Doorlatendheid deklaag: 0,5 meter per dag	1,71
Doorlatendheid deklaag: 1 meter per dag	1,67
Doorlatendheid deklaag: 5 meter per dag	1,57
Doorlatendheid dek achterland: 0,02 meter per dag	1,74
Doorlatendheid dek achterland: 0,1 meter per dag (<u>Basismodel</u>)	1,78
Doorlatendheid dek achterland: 0,5 meter per dag	1,77
Doorlatendheid dek achterland: 1 meter per dag	1,74
Doorlatendheid dek achterland: 5 meter per dag	1,59
Doorlatendheid deklaag voorland: 0,1 meter per dag (<u>Basismodel</u>)	1.78
Doorlatendheid deklaag voorland: 1 meter per dag	1.75
Doorlatendheid deklaag voorland: 2 meter per dag	1.74

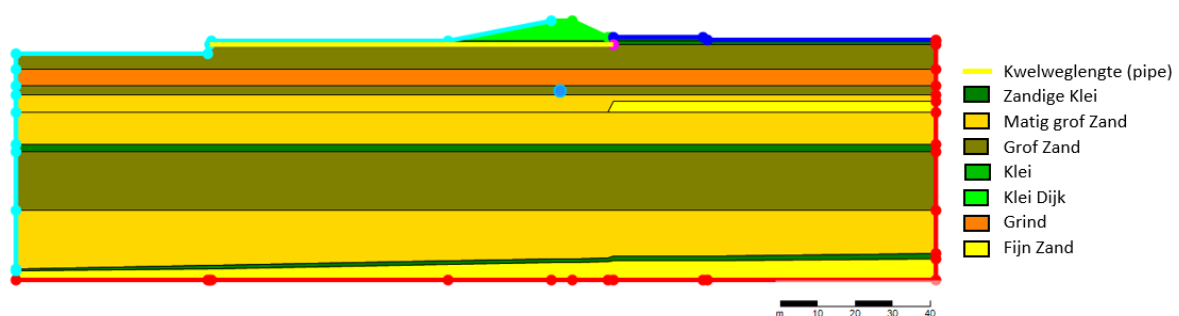
Voor dijkpaal 147 is een extra analyse met de doorlatendheid van de deklaag gedaan voor het model met een intredepunt op het neutraalpunt 150 meter uit de buitenteen. Dit is gepresenteerd in Figuur 100. Er wordt weergegeven wat het belang is van de deklaag ten behoeve van de mogelijke kwelengtes op basis van intredelocaties. Bij een doorlatendheid van het laagkarakteristiek en de initiële inputwaarde van het basismodel vindt geen piping plaats. In het geval van doorlatendheden vanaf 0,5 meter per dag kan echter wel piping optreden.



Figuur 100 Grafiek DP147 kritiek verval variatie doorlatendheid met intreepunt op het neutraalpunt

Gevoeligheidsanalyse 's Gravenwaard dijkpaal 72

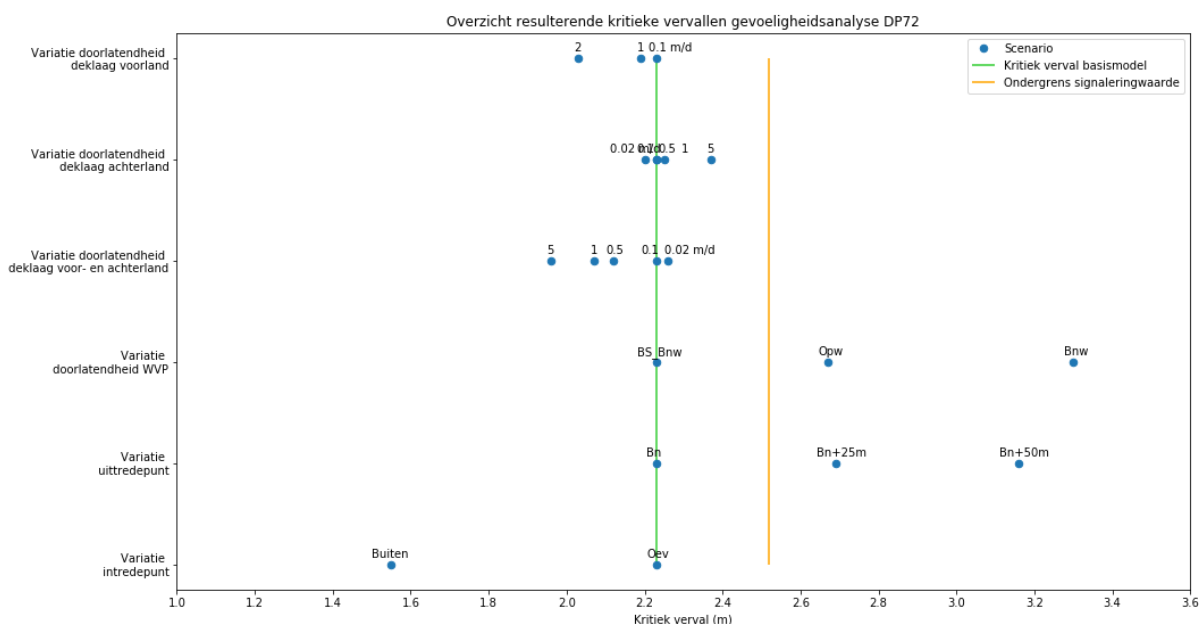
Het basismodel voor dijkpaal 72 is gegeven in Figuur 101. In dit model ontstond voor het optredende hoogwater piping voor alle gevallen. Het gebruikte basismodel heeft een kwelengte vanaf de oever tot en met de binnenteen van de dijk. Dit model is gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse, zoals gepresenteerd in Tabel 30.



Figuur 101: Schematisatie basismodel dijkpaal 72 in D-Geo Flow

Bijlage 8 geeft de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor dijkpaal 72 op het traject Pannerden-Kandia. Een overzicht van de resultaten van alle scenario's is gegeven in Figuur 102. De berekende waarden van de kritieke vervallen zijn gegeven in Tabel 32. Het volgende wordt opgemerkt uit de resultaten van de berekeningen:

- Er is een grote overeenkomst met de bevindingen voor de gevoeligheidsanalyse bij dijkpaal 147 voor intredepunt, uittredepunt en variatie in doorlatendheid voor de complete deklaag en het voorland. De invloed van de kwallengte is wederom duidelijk aanwezig. Het verder leggen van het uittredepunt in combinatie met verdunning van de deklaag zorgt ook voor dijkpaal 72 niet voor een maatgevende situatie. Ondanks grotere verschillen voor dit dwarsprofiel. Verschillen bij de doorlatendheid van de complete deklaag zijn kleiner, doordat de deklaag dunner is en in eerste instantie al minder invloed op het systeem uitoefent. Als enkel de doorlatendheid in het voorland wordt verhoogt worden juist grotere, onveiligere, verschillen gevonden.
- Een opwaartse of neerwaartse verkleining van de doorlatendheid in het watervoerend pakket heeft ook hier zijn invloeden op het kritiek verval. De verschillen zijn door de aanwezige grindlaag nog groter. Dit toont nogmaals de grote gevoeligheid voor een verschil in doorlatendheden in het watervoerend pakket aan. De potentie voor D-Geo Flow op dit gebied wordt wederom bewezen.
- Uitgaande van de input met karakteristieke waarden ligt voor dijkpaal 72 het kritiek verval al dicht bij en vaker boven de signaleringswaarden. Echter wordt voor de maatgevende situatie niet voldaan en zal de dijk afgekeurd moeten worden.
- In tegenstelling tot bij dijkpaal 147 resulteert, ten behoeve van piping, een toename van de doorlatendheid van de deklaag in het achterland in een veiligere situatie. Een ondoorlatende deklaag in het achterland geeft voor deze doorsnede dus een lager kritiek verval van enkele centimeters. Wederom is een lage gevoeligheid waarneembaar, behalve bij een inputwaarde van 5 meter per dag. Deze 5 meter per dag schematiseert in de praktijk wederom een afwezige deklaag. Het algemeen beeld voor een variatie in de kleiige deklaag van het achterland is daarom een lage gevoeligheid.



Figuur 102: Overzichtswaergave scenario's gevoeligheidsanalyse dijkpaal 72

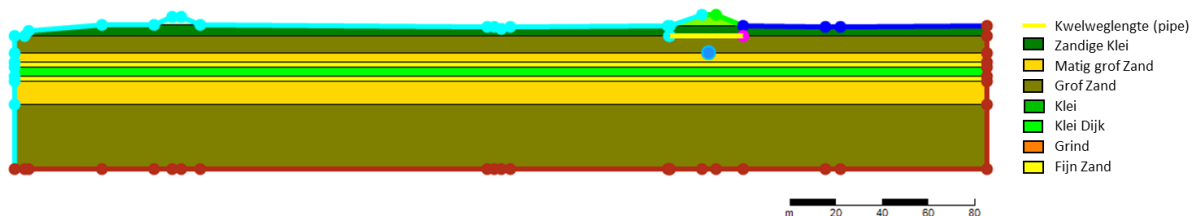
Tabel 32: Resulterende kritieke vervallen gevoeligheidsanalyse dijkpaal 72

Scenario DP72	Kritiek verval (m)
Intredepunt: Binnenteen	1,55
Intredepunt: Oever (Basismodel)	2,23
Uittredepunt: Buitenteen (Basismodel)	2,23

Scenario DP72	Kritiek verval (m)
Uittredepunt: Buitenteen + 25 meter	2,69
Uittredepunt: Buitenteen + 50 meter	3,16
Doorlatendheden WVP: Verkleining doorlatendheid opwaarts	2,67
Doorlatendheden WVP: Verkleining doorlatendheid benedenwaarts	3,30
Doorlatendheid deklaag: 0,02 meter per dag	2,26
Doorlatendheid deklaag: 0,1 meter per dag (Basismodel)	2,23
Doorlatendheid deklaag: 0,5 meter per dag	2,12
Doorlatendheid deklaag: 1 meter per dag	2,07
Doorlatendheid deklaag: 5 meter per dag	1,96
Doorlatendheid deklaag achterland: 0,02 meter per dag	2.20
Doorlatendheid deklaag achterland: 0,1 meter per dag (Basismodel)	2.23
Doorlatendheid deklaag achterland: 0,5 meter per dag	2.23
Doorlatendheid deklaag achterland: 1 meter per dag	2.25
Doorlatendheid deklaag achterland: 5 meter per dag	2.37
Doorlatendheid deklaag voorland: 0,1 meter per dag (Basismodel)	2.23
Doorlatendheid deklaag voorland: 1 meter per dag	2.19
Doorlatendheid deklaag voorland: 2 meter per dag	2.03

Basismodellen Pannerden-Kandia dijkpaal 152

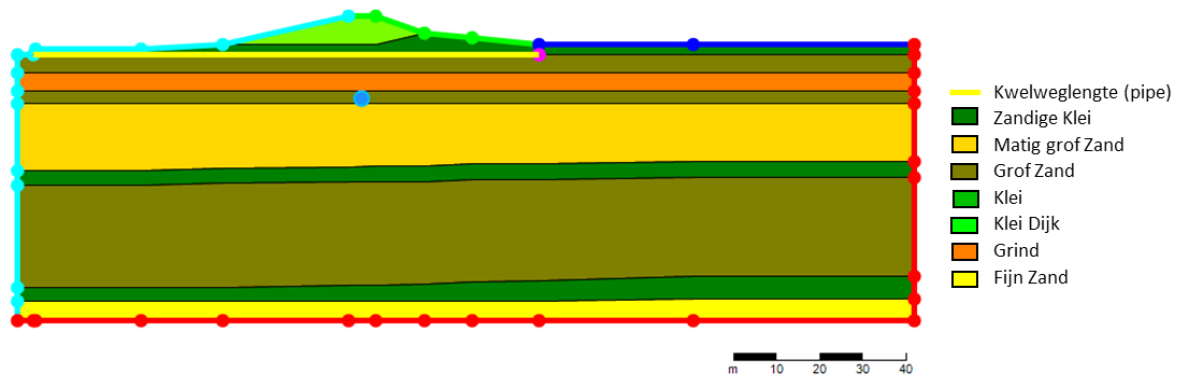
De doorsnede voor dijkpaal 152 heeft een lang voorland inclusief de groene rivier in de uiterwaarde. De D-Geo Flow schematisatie is gegeven in Figuur 103. Op basis van ervaring is beoordeeld dat de resultaten van het D-Geo Flow model niet realistisch zijn, het berekende kritieke verval is meer dan 10 m. Daarom zijn de resultaten niet opgenomen in de rapportage. Helaas is het niet gelukt om binnen de planning van het project de reden van deze resultaten te achterhalen.



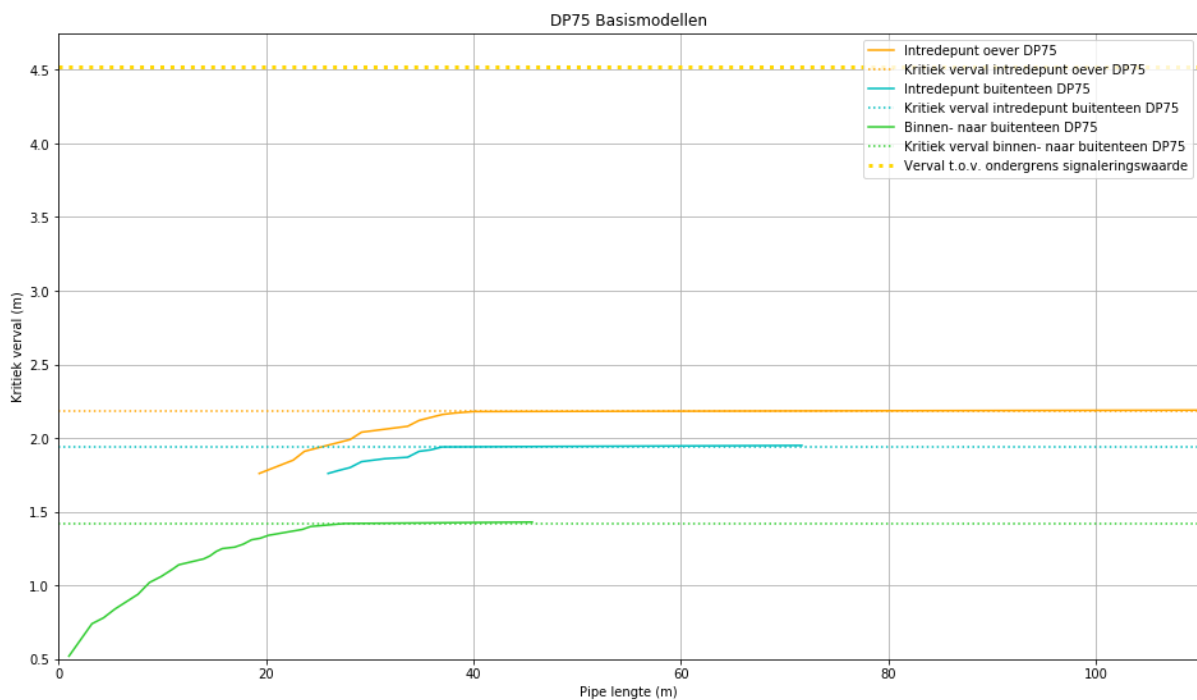
Figuur 103: Schematisatie basismodel dijkpaal 152 in D-Geo Flow

Basismodellen 's Gravenwaard dijkpaal 75

De schematisatie voor het basismodel bij dijkpaal 75 is gegeven in Figuur 104. In dit dwarsprofiel is het lager gelegen uittredepunt circa 25 meter uit de binnenteen maatgevend voor piping. Dit heeft te doen met de dunnere deklaag verder gelegen in het achterland. Het basismodel maakt gebruik van een intredepunt bij de rivieroever. Voor alle locaties van het intredepunt treedt piping op binnen de hoogwaternorm. Het kritieke verval wordt lager berekend als de signaleringswaarde. Dit is weergegeven in Figuur 105 en Tabel 33. Het berekende dwarsprofiel op dijkpaal 75 geeft volgens D-Geo Flow een onveilige situatie bij hoogwater.



Figuur 104: Schematisatie basismodel dijkspaal 75 in D-Geo Flow



Figuur 105: Grafieken DP75 kritiek verval variatie intredepunten

Tabel 33: Resulterende kritieke vervallen variatie intredepunten DP75

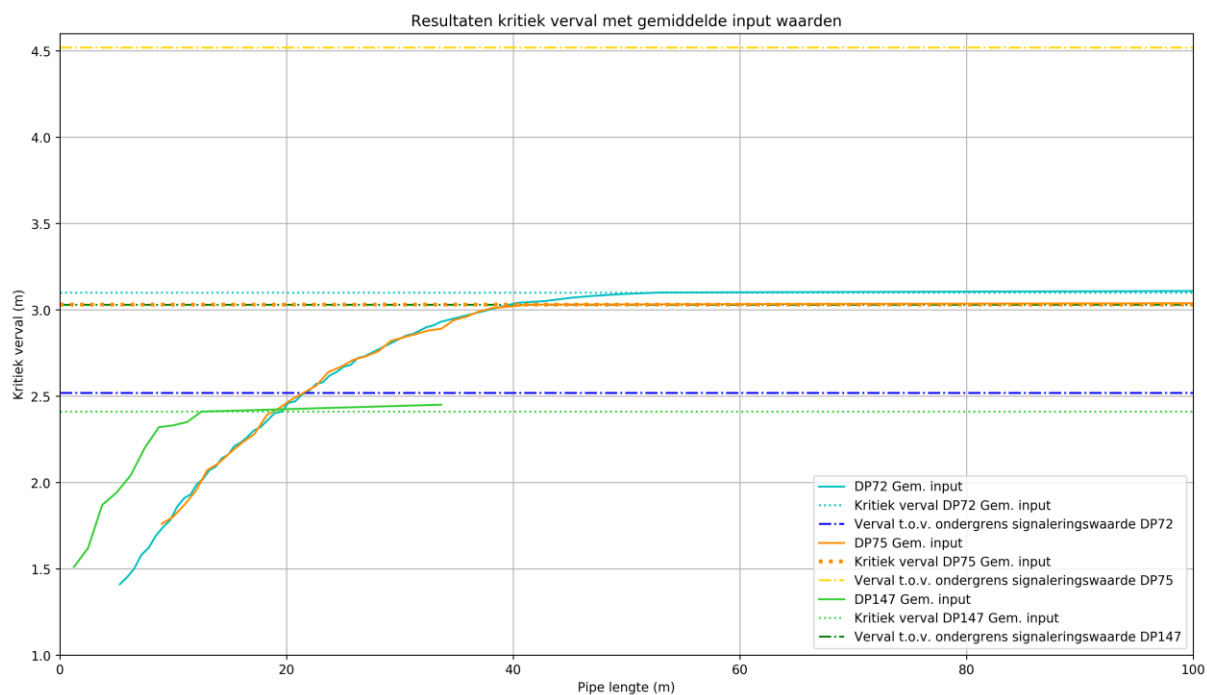
Dijkspaal & inputvariant	Kritiek verval (m)
DP75 intredepunt oever	2,18
DP75 intredepunt buitenteen	1,94
DP75 buiten- naar binnenteen	1,42

Basismodellen met gemiddelde input waarde

Naast een input van karakteristieke waarden voor alle individuele bodemlagen zijn ook berekeningen gedraaid met gemiddelde waarden. Deze input waarden zijn te vinden in Hoofdstuk 3. In de modellering is nog steeds de gelaagdheid met verschillende bodemtypes aanwezig. De resultaten zijn gegeven in Figuur 106 en Tabel 34.

De signaleringswaarde van dijkspaal 147 komt overeen. Met de gemiddelde waarden als input voldoet dijkspaal 72 aan de signaleringswaarde. Als in Tabel 34 gekeken wordt, valt op dat voor een input met

karacteristieke waarden dijkpaal 72 niet meer aan de signaleringswaarde voldoet. Er zijn daarbij aanzienlijke verschillen in kritiek verval tussen de variatie in input waarden.



Figuur 106: Grafieken resulterende kritieke vervallen bij gemiddelde D70 en doorlatendheid input waarden

Tabel 34: Resulterende kritieke vervallen dijken met gemiddelde D70 en doorlatendheid input waarden

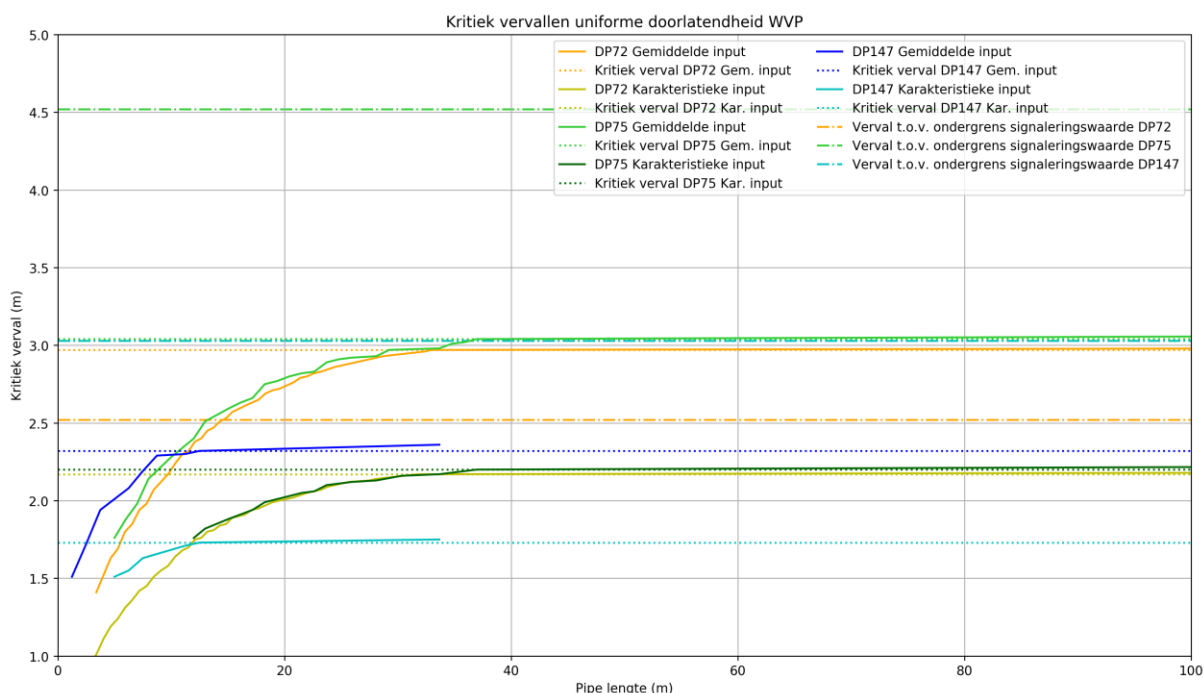
Dijkpaal	Kritiek verval gemiddelde input (m)	Kritiek verval karakteristieke input (m)	Bijbehorende verval t.o.v. signaleringshoogte (m)
DP72 's Gravenwaard	3,1	2,23	2,52
DP75 's Gravenwaard	3,03	2,18	4,52
DP147 Pannerden-Kandia	2,41	1,78	3,03

Basismodellen met uniforme karakteristieke en gemiddelde inputwaarde WVP

In Figuur 107 en Tabel 35 zijn de resultaten gegeven voor de berekeningen van D-Geo Flow met een enkel laag uniform watervoerend pakket. Hierbij zijn zowel berekeningen uitgevoerd met karakteristieke als gemiddelde doorlatendheden en D70's. Binnen de resultaten kan wederom het verschil tussen een gemiddelde en een karakteristieke input waarde waargenomen worden.

Voor deze berekening heeft een afstemming plaatsgevonden met de berekeningen van Sellmeijer. Het uniform ingevulde watervoerend pakket reikt tot en met de klei en zandige kleilagen net boven het midden van de diepte in de dwarsdoorsnedes van Figuur 98, Figuur 101, Figuur 103 en Figuur 104.

Een vergelijking van de resulterende kritieke vervallen tussen D-Geo Flow en Sellmeijer is opgenomen in Sectie 7.8.



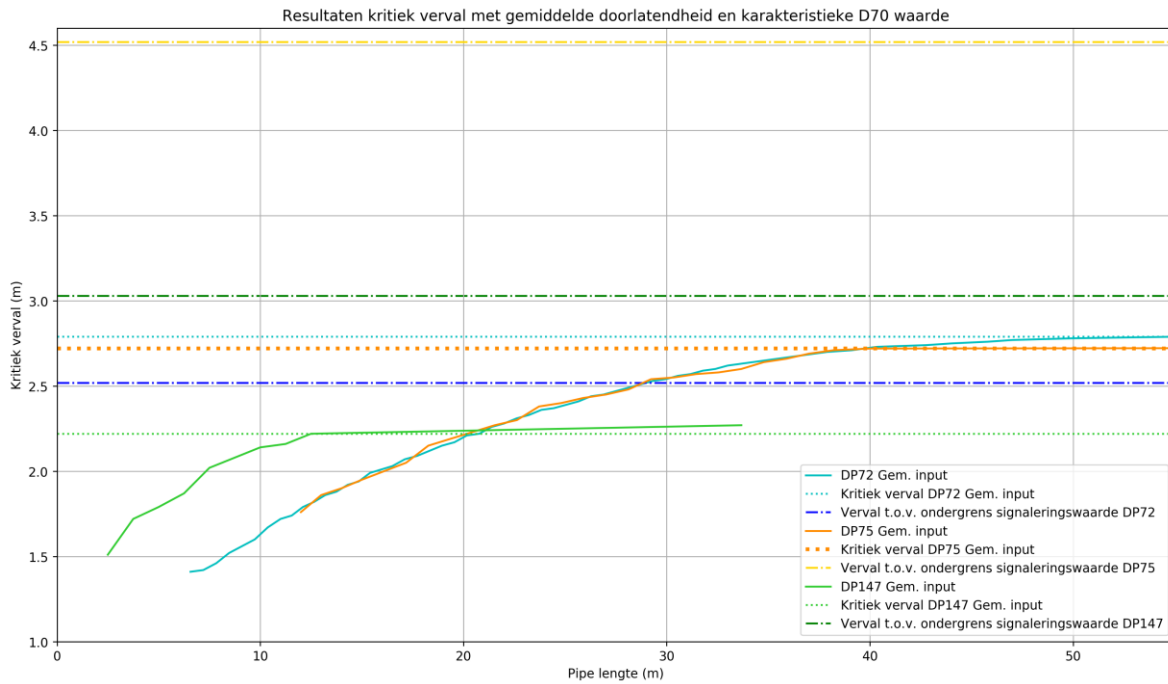
Figuur 107: Grafieken kritieke vervallen voor uniforme input watervoerend pakket

Tabel 35: Resultaten kritieke vervallen voor uniforme watervoerende pakketten

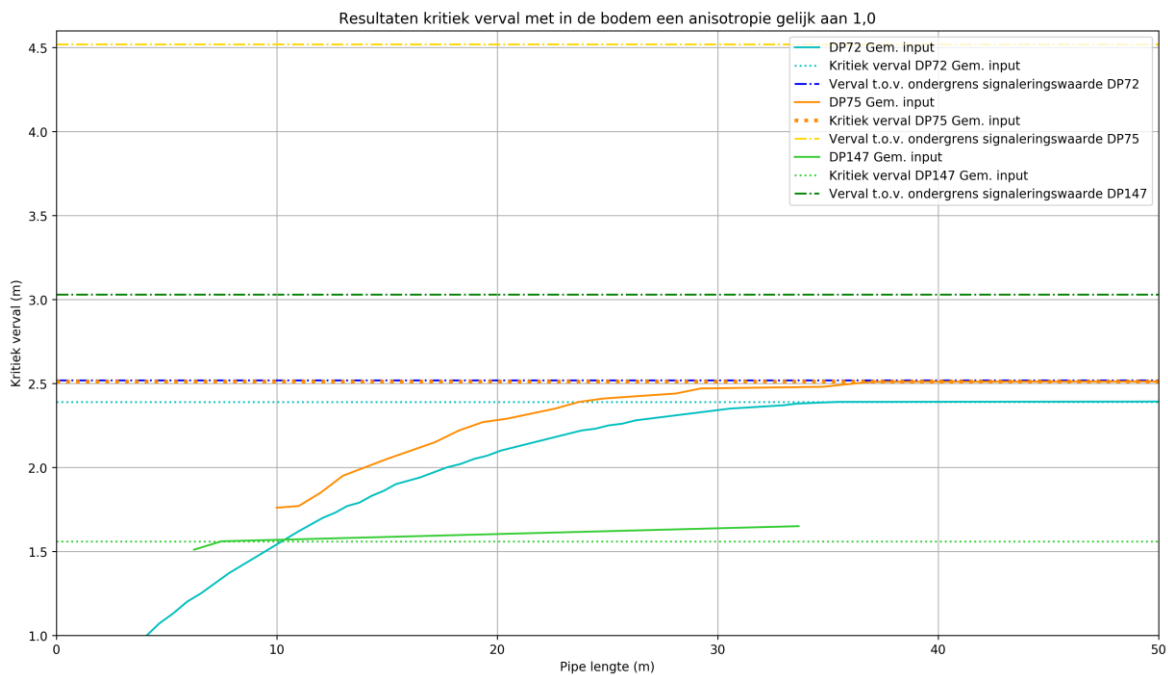
Dijkpaal & inputvariant	Kritiek verval (m)	Bijbehorende verval t.o.v. signaleringshoogte (m)
DP72 karakteristiek	2,17	2,52
DP72 gemiddelden	2,97	2,52
DP75 karakteristiek	2,20	4,52
DP75 gemiddelden	3,04	4,52
DP147 karakteristiek	1,73	3,03
DP147 gemiddelden	2,32	3,03

Anisotropie 1 vs. gemiddelde doorlatendheid & karakteristiek D70 vs. Initieel basismodel

In Figuur 108 en Figuur 109 zijn analyses gegeven van respectievelijk een modellering met gemiddelde inputwaarden voor de doorlatendheid en een modellering met een in de bodem toegepaste anisotropie waarde van 1,0. De initiële modellen, basismodellen, bevatten een input van karakteristieke waarden voor de doorlatendheid. Voor de anisotropie is in de watervoerende lagen een waarde van 3,0 toegepast. Voor de kleiige lagen is reeds een anisotropie van 1,0 aanwezig. In Tabel 36 is een overzicht gegeven van de exact resulterende kritieke vervallen. Deze zijn uitgezet tegen de kritieke vervallen van de basismodellen.



Figuur 108: Grafieken kritieke vervallen voor een gemiddelde doorlatendheid en karakteristieke waarde D70



Figuur 109: Grafieken kritieke vervallen met in de bodem een anisotropie gelijk aan 1,0

Tabel 36: Vergelijking initiële modelresultaten vs. anisotropie 1,0 vs. gemiddelde input doorlatendheid

Dijkpaal	Kritiek verval Initieel basismodel; karakteristiek (m)	Kritiek verval anisotropie 1,0; karakteristiek (m)	kritiek verval gemiddelde doorlatendheid & karakteristieke D70 (m)
DP72 's Gravenwaard	2,23	2,39	2,79
DP75 's Gravenwaard	2,18	2,51	2,72
DP147 Pannerden-Kandia	1,78	1,56	2,22

Uit de analyse voor anisotropie volgt een veiligere situatie bij een waarde van 1,0 voor dijkpaal 72 en 75. Door de aanwezige grindlaag is de initiële doorlatendheid al groot. Bij een anisotropie van 1,0 vergroot de verticale doorlatendheid van het watervoerende pakket ten opzichte van het basismodel met een factor 3. Voor deze twee doorsnedes bevinden de doorlatendheden zich zeer waarschijnlijk al in het gebied, waarbij een dergelijke doorlatendheidsverhoging extra veiligheid meegeeft aan het kritieke verval.

De doorsnede bij dijkpaal 147 geeft een situatie met lagere initiële doorlatendheden. De verandering voor anisotropie vergroot wederom de verticale doorlatendheid van het watervoerende pakket. Echter vindt in deze doorsnede een omgekeerd effect op het kritieke verval plaats. De lagere verticale doorlatendheid bij een anisotropie van 3,0 (basismodel) ten opzichte van 1,0 geeft meer verticale begrenzing aan de grondwaterstroming. Pipe progressie vindt dus moeilijker plaats. Een veiliger kritiek verval resulteert dus bij een hogere anisotropie.

Het invullen van een gemiddelde doorlatendheid geeft een afname in de doorlatendheid van de bodemlagen. Dit resulteert in een verlaging van de algemene stroomsnelheid. Het bemoeilijkt de progressie van de pipe. Voor de doorsnedes wordt een toename, en dus extra veiligheid, van minimaal 50 centimeter waargenomen.

Analyse grondwaterpeilverhoging achterland

In deze paragraaf wordt een opkisting in het achterland geanalyseerd. Stapsgewijs is de heave randvoorwaarde in het achterland opgevoerd. Deze randvoorwaarde maakt gebruik van de 0.3D regel. Een opkisting zorgt voor een toename in tegendruk, waarop deze extra verhoging in pakket ingevuld kan worden in de 0.3D-regel. In kolom 2 uit Tabel 37 is de ingevoerde druk bij de heave randvoorwaarde gegeven. De analyse is gedaan voor de doorsnede van dijkpaal 75. De uitgangspunten voor het model zijn het aanhouden van de neutrale lijn (in dit geval de oever), karakteristieke waardes grondparameters, meerlaagsheid en inclusief de anisotropie zoals meegenomen in de basismodellen. Een verlaging van 0,5 meter en verhoging van 0.5, 1.0, 1.5 meter ten opzichte van het maaiveld in het model zijn berekend. De resultaten zijn gegeven in Tabel 37.

Tabel 37 Resultaten grondwaterpeilverhoging achterland

Opkisting	Input heave randvoorwaarde (Pa)	Berekend kritiek verval D-Geo Flow (m)
Min 0,5 meter	25506,0	2,18
Basismodel	31882,5	2,18
Plus 0,5 meter	38259,0	2,18
Plus 1,0 meter	44635,5	2,19
Plus 1,5 meter	51012,0	2,19

Uit de resultaten volgt een nagenoeg gelijk kritiek verval voor alle uitgevoerde berekeningen. De vervolgstappen tonen een lineair effect voor een te keren hoogwaterhoogte in relatie tot binnen- en buitenwaterstanden. Dit wordt verklaard aan de nagenoeg constante uitkomst in het kritiek verval. De hoogte aan opkisting bij een wel in het achterland staat dus lineair tegenover de extra mogelijke te keren waterhoogte na de opkisting.

7.7 Conclusies gevoeligheidsanalyse D-Geo Flow

Uit de gevoeligheidsanalyses komen een aantal algemene conclusies naar voren voor de locaties met de eigenschappen van Pannerden en 's Gravenwaard. Het is niet zonder meer mogelijk om deze conclusies op een locatie met andere eigenschappen toe te passen zonder een aanvullende analyse.

Het volgende kan geconcludeerd worden aan de hand van de uitgevoerde analyses:

- Logischerwijs wordt bij een grotere kwellingte een hoger kritiek verval gevonden. Kortere kwellingtes leveren een lager kritiek verval.
- Opwaartse verkleining van de doorlatendheid in de bodemlagen geeft een hoger kritiek verval ten behoeve van piping. Een benedenwaartse verkleining geeft een onveiligere resultaat.
- Verhoging van de doorlatendheid van de complete deklaag geeft een onveiligere situatie. Hetzelfde geldt voor een verlaging van de doorlatendheid in enkel het voor- of achterland. Aanpassingen in het achterland heeft een lage gevoeligheid. De gevoeligheid van het voorland is een stuk groter. De grootste gevoeligheid wordt gevonden in aanpassingen bij de complete deklaag.
- Aanzienlijke aanwezige verschillen komen voort tussen berekeningen met karakteristieke en gemiddelde input waarden. De gemiddelde inputwaarden geven tientallen centimeters toename in kritiek verval.
- Het toepassen van een uniform enkel laags watervoerend pakket in D-Geo Flow, zoals toegepast in de analytische Sellmeijer som, berekend een lager kritiek verval. Het behalen van winst door middel van een detaillering in bodemlagen wordt waargenomen.
- Het toepassen van een anisotropiefactor van 3 in het watervoerend pakket geeft bij s 'Gravenwaard een lager kritiek verval dan een anisotropiefactor van 1.
- Het toepassen van een anisotropiefactor van 3 in het watervoerend pakket geeft bij Pannerden-Kandia een hoger kritiek verval. Aanwezige doorlatendheden zijn hier lager als bij s 'Gravenwaard.
- Het opkisten van een wel in het achterland heeft geen effect op het resulterende kritieke verval. Een lineaire relatie is aanwezig tussen opkisten en te keren waterhoogte door de dijk.

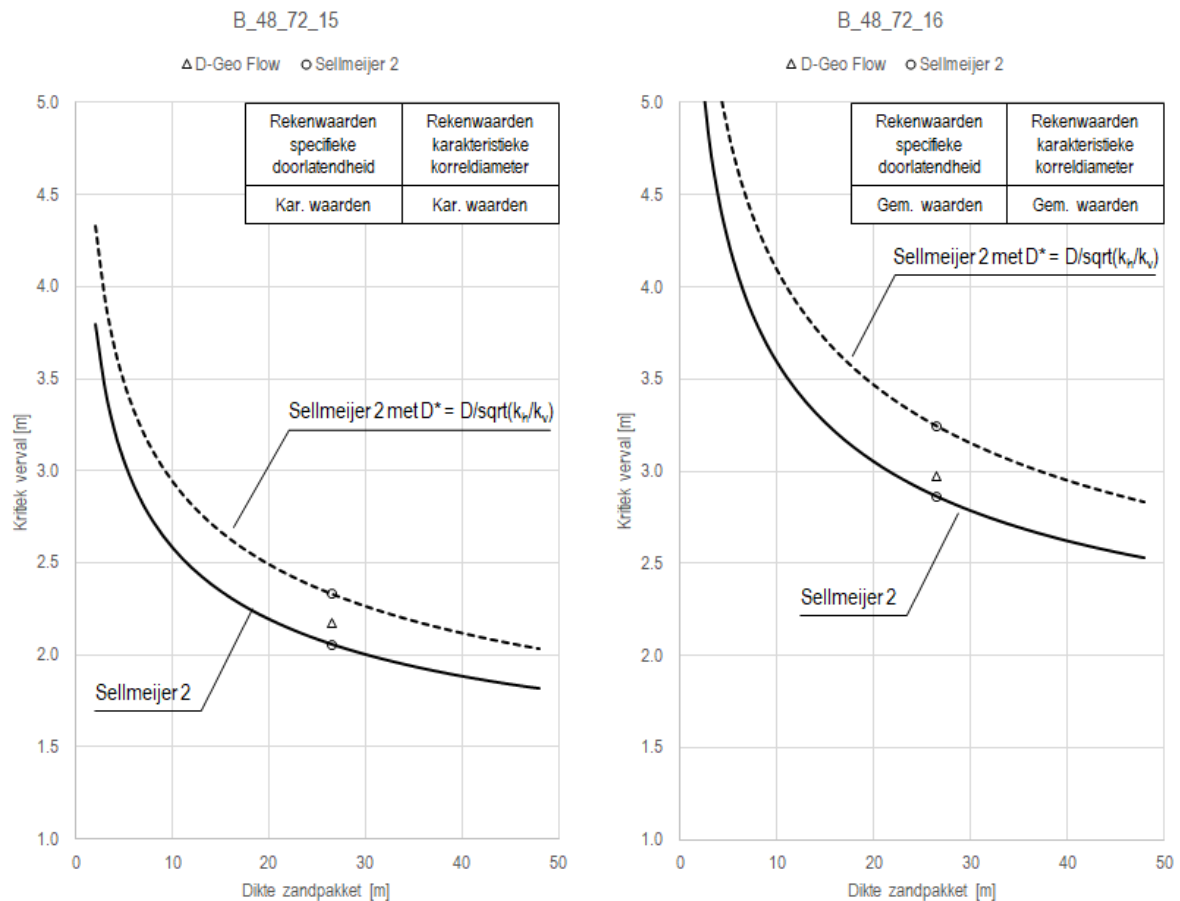
7.8 Vergelijking met kritiek verval volgens analytische berekening

De kritieke vervallen voor de hierboven beschreven D-Geo Flow berekeningen zijn ter vergelijking tevens analytisch berekend met toetsregel Sellmeijer 2. Parameters voor de analytische berekeningen zijn bepaald aan de hand van de invoer van de D-Geo Flow berekeningen. Voor de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige zandlaag is de gewogen gemiddelde waarde van de doorlatendheid van het zandpakket gehanteerd. Opgemerkt moet worden dat de doorlatendheid van de deklaag niet als een parameter in de toetsregel Sellmeijer 2 voorkomt.

Om te beoordelen of het effect van anisotropie met deze methode kan worden verwerkt in analytische berekeningen met toetsregel Sellmeijer 2 zijn de berekeningen tevens uitgevoerd voor een equivalente dikte van het zandpakket, berekend als de dikte van het zandpakket gedeeld door de wortel van de anisotropiefactor (verhouding van de horizontale doorlatendheid tot de verticale doorlatendheid).

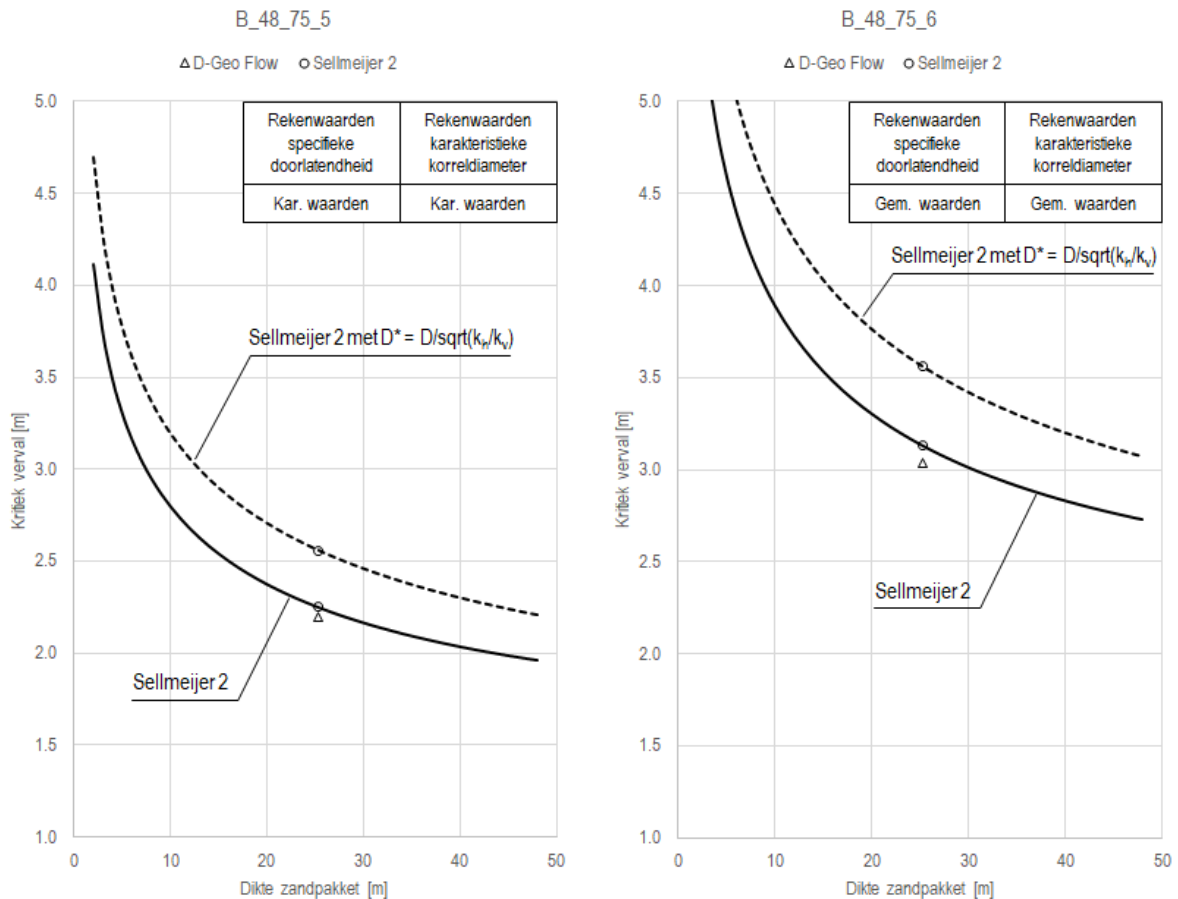
's Gravenwaard

De ten behoeve van de vergelijking uitgevoerde analytische berekeningen met toetsregel Sellmeijer 2 zijn opgenomen in Bijlage 9. Het verschil tussen het kritieke verval volgens D-Geo Flow en het kritieke verval volgens de analytische berekening is veelal beperkt tot 0.3 m, zowel voor berekeningen waarin een enkellaags watervoerend pakket is aangenomen in D-Geo Flow als berekeningen waarin een meerlaags systeem is aangenomen in D-Geo Flow. Het landwaarts verplaatsen van het intredepunt neigt tot onderschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow.



Figuur 110: Vergelijking tussen kritiek verval volgens D-Geo Flow en kritiek verval volgens analytische berekening met toetsregel Sellmeijer 2 voor berekeningen B_48_72_15 (links) en B_48_72_16 (rechts)

De resultaten van berekeningen waarin een enkellaags watervoerend pakket is aangenomen zijn gegeven in Figuur 110 en Figuur 111. Het verschil in kritiek verval is ongeveer 0.1 m. Voor het profiel bij dp 72 geldt dat het kritieke verval volgens D-Geo Flow groter is dan die volgens de analytische berekening met toetsregel Sellmeijer 2, terwijl voor het profiel bij dp 75 geldt dat het kritieke verval volgens D-Geo Flow kleiner is dan die volgens de analytische berekening met toetsregel Sellmeijer 2. Voor het profiel bij dp 75 is een kleiner doorlaatvermogen van het watervoerend pakket (-11%), een grotere dikte van de deklaag (+25%) en een langere kwelweglengte (+7%) ingevoerd dan voor het profiel bij dp 72. Indien met gemiddelde waarden van de specifieke doorlatendheid en de korrel diameter D_{70} wordt gerekend (in plaats van met karakteristieke waarden), neemt het kritieke verval toe met ongeveer 0.8 m (+37%). Het rekenen met een equivalente dikte van het zandpakket in analytische berekeningen met toetsregel Sellmeijer 2 leidt voor beide profielen tot een overschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow.

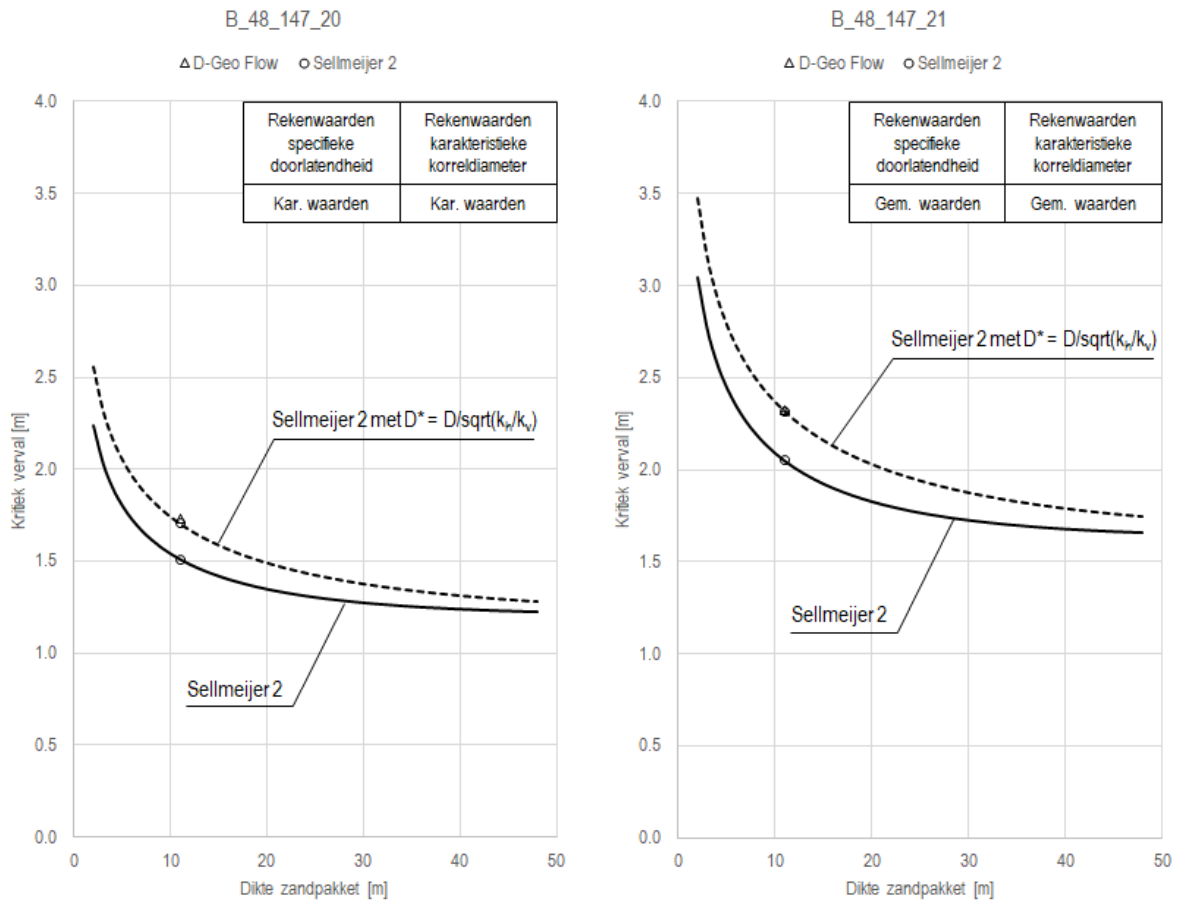


Figuur 111: Vergelijking tussen kritiek verval volgens D-Geo Flow en kritiek verval volgens analytische berekening met toetsregel Sellmeijer 2 voor berekeningen B_48_75_5 (links) en B_48_75_6 (rechts)

Pannerden-Kandia

De ten behoeve van de vergelijking uitgevoerde analytische berekeningen met toetsregel Sellmeijer 2 zijn opgenomen in Bijlage 9. Het verschil tussen het kritieke verval volgens D-Geo Flow en het kritieke verval volgens de analytische berekening is veelal beperkt tot 0.3 m, zowel voor berekeningen waarin een enkellaags watervoerend pakket is aangenomen in D-Geo Flow als berekeningen waarin een meerlaags systeem is aangenomen in D-Geo Flow. Het rivierwaarts verplaatsen van het intredepunt neigt tot overschatting van het kritiek verval volgens D-Geo Flow.

De resultaten van berekeningen waarin een enkellaags watervoerend pakket is aangenomen zijn gegeven in Figuur 112. Het verschil in kritiek verval is ongeveer 0.2-0.3 m. Voor het profiel bij dp 147 geldt dat het kritieke verval volgens D-Geo Flow groter is dan die volgens de analytische berekening met toetsregel Sellmeijer 2. Het verschil in kritiek verval kan mogelijk worden verklaard door de in de berekeningen aangenomen relatief dikke deklaag. Indien met gemiddelde waarden van de specifieke doorlatendheid en de korreldiameter D_{70} wordt gerekend (in plaats van met karakteristieke waarden), neemt het kritieke verval toe met ongeveer 0.6 m (+34%).



Figuur 112: Vergelijking tussen kritiek verval volgens D-Geo Flow en kritiek verval volgens analytische berekening met toetsregel Sellmeijer 2 voor berekeningen B_48_147_20 (links) en B_48_147_21 (rechts)

8 Analytische berekeningen met fictieve lengte voorland

8.1 Bepaling kritieke buitenwaterstand

Aanvullend op de analytische berekeningen in hoofdstuk 5 (Stap 1 t/m Stap 6) zijn berekeningen uitgevoerd waarbij de fictieve lengte van het voorland in rekening is gebracht (Stap 7). Hierbij zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Bepalen verticale doorlatendheid deklaag in voorland
2. Bepalen lengte voorland en dikte deklaag
3. Bepalen doorlaatvermogen watervoerend pakket
4. Bepalen lek lengte voorland
5. Bepalen fictieve lengte voorland
6. Bepalen aanwezige kwelweglengte
7. Berekenen kritiek verval
8. Bepalen kritieke buitenwaterstand
9. Vergelijken kritieke buitenwaterstand met voorspelde en in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden

De lek lengte en de fictieve lengte van het voorland zijn berekend conform [15], Bijlage E. De berekening van de lek lengte en de fictieve lengte van het voorland is opgenomen in Bijlage 11.

De doorlatendheid van de deklaag in het voorland is ontleend aan beschikbare grondwatermodellen voor de locaties Lobith (dp 72), Pannerden (dp 150) en Westervoort (dp 230). Na kalibratie van de bestaande grondwatermodellen aan de hand van peilbuismetingen tijdens het hoogwater van januari 2018 is een intreeweerstand van 2-8 dagen voorgesteld voor de locatie Lobith (dp 72) en is een intreeweerstand van 1.5-3 dagen voorgesteld voor de locatie Westervoort (dp 230). Omdat de geul niet meestroomde, kon de intreeweerstand van het voorland bij Pannerden (dp 150) niet worden bepaald [16]. De boorstaten laten een duidelijk kleiige deklaag zien in het voorland bij Lobith (dp 72), en een relatief zandige deklaag in het voorland bij Westervoort (dp 230). Op basis van de grondsoortclassificatie in de boorstaten wordt een verticale doorlatendheid van ongeveer 0.2 m/d verwacht voor de deklaag in het voorland bij Pannerden (dp 150).

Op basis van het bovenstaande is een verticale doorlatendheid van 0.2 m/d aangenomen in geval van een duidelijk kleiige deklaag en is een verticale doorlatendheid van 0.4 m/d aangenomen in geval van een enigszins meer zandige deklaag zoals aangetroffen in het Rijnstrangengebied.

De in rekening te brengen lengte van het voorland en dikte van de deklaag zijn bepaald op basis van beschikbare boringen en sonderingen, de zandbanenkaart en de resultaten van het geofysisch onderzoek, en is maximaal gelijk aan de breedte van de strook waar geofysisch onderzoek heeft plaatsgevonden. Bij bepalen van de lengte van het voorland en de dikte van de deklaag is rekening gehouden met de in [15] genoemde vereiste minimale laagdikte van 1.0 m plus 0.3-0.5 m toplaag.

Het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket is ontleend aan de invoer van de analytische berekeningen in Stap 6.

De aanwezige kwelweglengte is gelijkgesteld aan de dijkbasis (horizontale afstand tussen buitenteen en uittredepunt) plus de fictieve lengte van het voorland, mits niet langer dan de neutrale kwelweglengte en niet langer dan twee maal de dijkbasis.

Het kritieke verval is vervolgens berekend met de toetsregel Sellmeijer 2, zowel met karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige zandlaag (Stap 7A) als met gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid

van de pipinggevoelige zandlaag (Stap 7B), waarbij er in alle berekeningen van uitgegaan is dat het freatische niveau bij het uittredepunt gelijk is aan de hoogte van het maaiveld. Daarnaast zijn voor de volgende parameters vaste waarden gehanteerd:

- Gemiddelde korreldiameter schaalproeven $D_{70m} = 208 \mu\text{m}$.
- Volumiek gewicht water = 10 kN/m^3 .
- Kinematische viscositeit water = $1.33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.
- Coëfficiënt White = 0.25.
- Rolweerstandshoek zandkorrels = 37° .
- Volumiek gewicht zandkorrels onder water = 16.5 kN/m^3 .

De berekeningen van de kritieke buitenwaterstand in Stap 7A en Stap 7B zijn opgenomen in Bijlage 12.

8.2 Resultaten

's Gravenwaard

De berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid is gegeven in Tabel 38.

Tabel 38: Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid; 's Gravenwaard

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid [m+NAP]			
	Maatgevend profiel		Representatief profiel	
	Stap 7A: Fictieve lengte voorland + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid	Stap 7B: Fictieve lengte voorland + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid	Stap 7A: Fictieve lengte voorland + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid	Stap 7B: Fictieve lengte voorland + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid
GRA_V1	16.25	17.02	16.97	17.95
GRA_V2	18.09	19.73	18.60	20.53
GRA_V3	15.51	16.38	15.79	16.82
GRA_V4	16.34	17.70	16.52	17.89
GRA_V5	15.72	16.80	15.95	17.10
GRA_V6	15.79	16.97	15.94	17.20
GRA_V7	15.17	16.15	15.54	16.69
GRA_V8	15.21	16.05	15.86	16.91
GRA_V9	15.74	16.77	15.94	17.09
GRA_V10	14.94	16.06	15.32	16.45
GRA_V11	15.50	16.74	15.89	17.27

Pannerden-Kandia

De kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid is gegeven in Tabel 39.

Tabel 39: Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid; Pannerden-Kandia

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid [m+NAP]			
	Maatgevend profiel		Representatief profiel	
	Stap 7A: Fictieve lengte voorland + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid	Stap 7B: Fictieve lengte voorland + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid	Stap 7A: Fictieve lengte voorland + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid	Stap 7B: Fictieve lengte voorland + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid
PAN_V1	16.79	18.42	17.13	18.87
	17.80	19.79	18.27	20.41
PAN_V2	16.23	17.88	16.75	18.54
	17.25	19.27	17.92	20.13
PAN_V3	15.28	16.44	15.72	16.98
PAN_V4	14.75	16.00	14.96	16.22
PAN_V5	14.31	15.40	14.54	15.87
PAN_V6	14.78	15.94	14.71	15.86
PAN_V7	14.37	15.41	14.53	15.59
PAN_V8	14.72	16.03	14.72	16.04
PAN_V9	14.71	15.68	14.98	16.04
PAN_V10	13.39	14.30	14.24	15.32
	13.28	14.15	14.09	15.13
PAN_V12	14.66	15.86	15.21	16.48
	14.50	15.64	15.02	16.24
PAN_V13	14.46	15.74	14.51	15.71
	14.28	15.50	14.34	15.48
PAN_V14	14.12	15.17	14.49	15.66
	13.98	14.98	14.32	15.44

8.3 Evaluatie

De resultaten van de berekeningen van de kritieke buitenwaterstand in Stap 7A en Stap 7B worden vergeleken met voorspelde en in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden.

Extreme waterstanden berekend met behulp van Hydra-NL zijn gegeven in Tabel 40 en Tabel 41. De berekeningen zijn uitgevoerd conform WBI2017 en daarmee met onzekerheid in de waterstand (de parameterwaarden van de modelonzekerheid zijn uit de database afkomstig). Een overzicht van in het verleden opgetreden extreme waterstanden van de Boven-Rijn bij Lobith is gegeven in Tabel 42.

Bij het evalueren van de resultaten moet rekening worden gehouden met het volgende:

- De wellenkaart lijkt incompleet en is soms onverklaarbaar. Zo bevat de wellenkaart geen informatie over het voorkomen van wellen tijdens de hoogwaters van maart 2001 en januari 2003, en zijn volgens de wellenkaart bij dp 88+090 en dp 143+085 wellen opgetreden tijdens het hoogwater van januari 2011, maar niet tijdens de meer extreme hoogwaters van januari/februari 1995 en oktober/november 1998.
- De lokale buitenwaterstanden tijdens de hoogwaters van december 1993, januari/februari 1995, oktober/november 1998 en januari 2011 zijn bepaald op basis van betrekkinglijnen

2010. De werkelijk opgetreden buitenwaterstanden kunnen naar verwachting tot 0.3 m afwijken.

- Omdat de breedte van de strook voorland waar geofysisch onderzoek heeft plaatsgevonden beperkt is, kan voor bepaalde profielen de kritieke buitenwaterstand zijn onderschat door onderschatting van de aanwezige kwelweglengte.

Tabel 40: Extreme waterstanden op basis van Hydra-NL; 's Gravenwaard

Terug-keertijd [jr]	Waterstand [m+NAP]									
	dp 62	dp 67	dp 72	dp 77	dp 82	dp 87	dp 92	dp 97	dp 102	dp 107
10	14.93	14.93	14.93	14.93	14.93	14.93	14.93	14.93	14.92	14.92
20	15.32	15.32	15.32	15.32	15.32	15.32	15.32	15.31	15.30	15.29
50	15.74	15.74	15.74	15.74	15.74	15.74	15.74	15.74	15.72	15.69
100	16.04	16.04	16.04	16.04	16.04	16.04	16.04	16.04	16.01	15.96
250	16.34	16.34	16.34	16.34	16.34	16.33	16.33	16.33	16.30	16.25
500	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.50	16.49	16.47	16.41
1000	16.64	16.64	16.64	16.64	16.64	16.64	16.64	16.64	16.61	16.55
1250	16.68	16.68	16.68	16.68	16.68	16.68	16.68	16.68	16.65	16.60
2500	16.81	16.81	16.81	16.81	16.81	16.81	16.80	16.80	16.78	16.71
5000	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.89	16.81
10000	17.01	17.01	17.01	17.01	17.01	17.01	17.01	17.01	16.98	16.89

Tabel 41: Extreme waterstanden op basis van Hydra-NL; Pannerden-Kandia

Terug-keertijd [jr]	Waterstand [m+NAP]									
	dp 135	dp 140	dp 145	dp 150	dp 155	dp 160	dp 165	dp 170	dp 173	dp 175
10	13.79	13.76	13.75	13.74	13.73	13.72	13.71	13.68	13.63	13.62
20	14.28	14.20	14.18	14.16	14.14	14.12	14.10	14.05	13.97	13.96
50	14.71	14.62	14.58	14.54	14.52	14.49	14.45	14.38	14.30	14.28
100	15.00	14.89	14.85	14.81	14.77	14.73	14.68	14.59	14.51	14.50
250	15.30	15.18	15.13	15.08	15.03	14.97	14.92	14.82	14.74	14.73
500	15.47	15.35	15.29	15.24	15.19	15.12	15.06	14.95	14.88	14.87
1000	15.62	15.49	15.44	15.38	15.33	15.24	15.18	15.07	15.00	14.99
1250	15.66	15.54	15.49	15.42	15.36	15.28	15.22	15.11	15.04	15.02
2500	15.81	15.67	15.62	15.55	15.48	15.39	15.32	15.21	15.14	15.13
5000	15.98	15.82	15.76	15.67	15.60	15.50	15.42	15.30	15.23	15.22
10000	16.16	15.98	15.90	15.80	15.71	15.60	15.52	15.39	15.33	15.31

Tabel 42: Hoogste gemeten waterstand Boven-Rijn bij Lobith per jaar in periode 1950-augustus 2018

Rangorde	Waterstand [m+NAP]	Datum en tijd
1	16.66	31/01/1995
2	16.39	25/12/1993
3	16.12	27/02/1970
4	16.08	30/03/1988
5	15.98	21/01/1955
6	15.88	01/03/1958
7	15.87	31/05/1983
8	15.74	04/11/1998
9	15.73	06/01/2003
10	15.68	09/02/1980
11	15.39	11/02/1984
12	15.38	27/03/2001
13	15.37	27/12/1952
14	15.33	08/03/1956
15	15.24	10/01/1982
16	15.21	06/01/1966
17	15.15	16/01/2011
18	15.13	20/01/1968
18	15.13	09/01/1994
20	15.09	22/12/1965
21	15.06	26/02/1999
21	15.06	01/03/2002
23	15.04	03/03/1957
24	14.95	05/01/1987
25	14.90	25/01/1951
26	14.73	18/03/1979
27	14.72	03/01/1967
28	14.66	20/02/1990
29	14.64	10/01/2018
30	14.61	06/12/1950
31	14.56	12/12/1981
32	14.54	02/03/1997
33	14.47	24/02/1977
34	14.42	29/12/1954
35	14.39	07/01/1991

Rangorde	Waterstand [m+NAP]	Datum en tijd
36	14.35	28/05/1978
37	14.29	18/01/2004
38	14.28	21/12/1974
39	14.26	05/04/1962
40	14.20	09/01/2012
41	14.18	28/01/1986
42	14.15	05/02/1961
42	14.15	01/01/2000
44	14.04	01/01/2013
45	14.03	12/01/1959
46	13.91	25/11/1963
47	13.87	01/01/1953
48	13.82	02/01/1975
49	13.80	06/03/2007
50	13.75	18/03/1969
51	13.61	23/11/1972
52	13.57	08/12/1960
53	13.55	13/12/2010
54	13.52	14/03/2006
55	13.37	17/02/2005
56	13.10	27/11/1992
57	12.95	26/04/1989
57	12.95	13/02/2016
59	12.87	06/02/1985
60	12.76	18/12/2017
61	12.42	06/12/1996
62	12.36	14/01/2015
63	12.34	25/03/2008
64	12.31	31/01/1971
65	12.27	14/03/2009
66	12.09	13/12/1973
67	11.98	27/01/1976
68	11.69	22/11/1964
69	10.95	23/12/2014

's Gravenwaard

Voor maatgevende profielen geldt dat de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7B) 0.8-1.6 m hoger is dan bij toepassing van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7A) (Tabel 38).

Voor representatieve profielen geldt dat de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7B) 1.0-1.9 m hoger is dan bij toepassing van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7A) (Tabel 38).

De berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid voor het representatieve profiel is tot 0.7 m (Stap 7A) en tot 0.9 m (Stap 7B) hoger dan die voor het maatgevende profiel binnen het betrokken dijkvak (Tabel 38).

Vergelijkingen van de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid voor maatgevende profielen met voorspelde en in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden zijn gegeven in Tabel 43 (Stap 7A) en Tabel 44 (Stap 7B).

Bij toepassing van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7A) varieert de frequentie van de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid tussen kleiner dan 1/10000 per jaar en groter dan 1/10 per jaar. Voor meerdere profielen geldt dat de kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid zou zijn overschreden tijdens de hoogwaters van december 1993 en januari/februari 1995, veelal ook voor dijkvakken waar volgens de wellenkaart geen wellen zijn opgetreden (Tabel 43).

Bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7B) varieert de frequentie van de berekende kritieke buitenwaterstand tussen kleiner dan 1/10000 per jaar en 1/100 per jaar. Voor alle profielen geldt dat de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid niet is overschreden tijdens de hoogwaters van december 1993, januari/februari 1995, oktober/november 1998 en januari 2011 (Tabel 44). Dit komt overeen met de tijdens de hoogwaters getoonde prestaties van de dijkvakken.

Tabel 43: Vergelijking kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid maatgevende profielen berekend met karakteristieke waarden van korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid (Stap 7A) met voorspelde en in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden; 's Gravenwaard

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid [m+NAP]	Frequentie kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid (indicatief) [1/jr]	Hoogwater dec 1993		Hoogwater jan/feb 1995		Hoogwater okt/nov 1998		Hoogwater jan 2011	
			Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?
GRA_V1	16.25	1/190	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V2	18.09	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V3	15.51	1/30	J	J	J	J	J	N	N	N
GRA_V4	16.34	1/250	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V5	15.72	1/50	N	N	N	J	N	N	N	N
GRA_V6	15.79	1/60	N	N	N	J	N	N	N	N
GRA_V7	15.17	1/20	J	J	N	J	N	N	J	N
GRA_V8	15.21	1/20	N	J	N	J	N	N	N	N
GRA_V9	15.74	1/50	N	N	N	J	N	N	N	N
GRA_V10	14.94	1/10	N	J	N	J	N	N	N	N
GRA_V11	15.50	1/30	N	J	N	J	N	N	N	N

Tabel 44: Vergelijking kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid maatgevende profielen berekend met gemiddelde waarden van korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid (Stap 7B) met voorspelde en in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden; 's Gravenwaard

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid [m+NAP]	Frequentie kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid (indicatief) [1/jr]	Hoogwater dec 1993		Hoogwater jan/feb 1995		Hoogwater okt/nov 1998		Hoogwater jan 2011	
			Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?
GRA_V1	17.02	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V2	19.73	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V3	16.38	1/300	J	N	J	N	J	N	N	N
GRA_V4	17.70	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V5	16.80	1/2320	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V6	16.97	1/7690	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V7	16.15	1/140	J	N	N	N	N	N	J	N
GRA_V8	16.05	1/100	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V9	16.77	1/2110	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V10	16.06	1/110	N	N	N	N	N	N	N	N
GRA_V11	16.74	1/2840	N	N	N	N	N	N	N	N

Pannerden-Kandia

Voor maatgevende profielen geldt dat de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7B) 0.9-2.0 m hoger is dan bij toepassing van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7A) (Tabel 39).

Voor representatieve profielen geldt dat de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7B) 1.0-2.2 m hoger is dan bij toepassing van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7A) (Tabel 39).

De berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid voor het representatieve profiel is tot 0.8 m (Stap 7A) en tot 1.0 m (Stap 7B) hoger dan die voor het maatgevende profiel binnen het betrokken dijkvak (Tabel 39).

Vergelijkingen van de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid voor maatgevende profielen met voorspelde en in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden zijn gegeven in Tabel 45 (Stap 7A) en Tabel 46 (Stap 7B).

Bij toepassing van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7A) varieert de frequentie van de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid tussen kleiner dan 1/10000 per jaar en groter dan 1/10 per jaar. Voor meerdere profielen geldt dat de kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid zou zijn overschreden tijdens de hoogwaters van december 1993, januari/februari 1995, oktober/november 1998 en januari 2011, in enkele gevallen ook voor dijkvakken waar volgens de wellenkaart geen wellen zijn opgetreden (Tabel 45).

Bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7B) varieert de frequentie van de berekende kritieke buitenwaterstand tussen kleiner dan 1/10000 per jaar en 1/30 per jaar. Voor bijna alle profielen geldt dat de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid niet is overschreden tijdens de hoogwaters van december 1993, januari/februari 1995, oktober/november 1998 en januari 2011. Uitzondering is het maatgevende profiel binnen dijkvak PAN_V10, waarvoor geldt dat de kritieke buitenwaterstand zou zijn overschreden tijdens de hoogwaters van december 1993 en januari/februari 1995 (Tabel 46).

Tabel 45: Vergelijking kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid maatgevende profielen berekend met karakteristieke waarden van korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid (Stap 7A) met voorspelde en in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden; Pannerden-Kandia

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid [m+NAP]	Frequentie kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid (indicatief) [1/jr]	Hoogwater dec 1993		Hoogwater jan/feb 1995		Hoogwater okt/nov 1998		Hoogwater jan 2011	
			Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?
PAN_V1	16.79	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
	17.80	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
PAN_V2	16.23	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
	17.25	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
PAN_V3	15.28	1/430	N	N	N	N	N	N	N	N
PAN_V4	14.75	1/80	J	N	N	J	N	N	J	N
PAN_V5	14.31	1/30	J	J	J	J	J	N	N	N
PAN_V6	14.78	1/90	J	N	J	N	J	N	N	N
PAN_V7	14.37	1/40	N	J	N	J	N	N	N	N
PAN_V8	14.72	1/90	N	N	N	N	N	N	N	N
PAN_V9	14.71	1/100	J	N	J	N	N	N	N	N
PAN_V10	13.39	>1/10	J	J	J	J	J	J	N	J
	13.28	>1/10	J	J	J	J	J	J	N	J
PAN_V12	14.66	1/170	J	N	J	N	N	N	N	N
	14.50	1/90	J	N	J	N	N	N	N	N
PAN_V13	14.46	1/80	N	N	N	N	N	N	N	N
	14.28	1/50	N	N	N	J	N	N	N	N
PAN_V14	14.12	1/30	N	J	N	J	N	N	N	N
	13.98	1/20	N	J	N	J	N	N	N	N

Tabel 46: Vergelijking kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid maatgevende profielen berekend met gemiddelde waarden van korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid (Stap 7B) met voorspelde en in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden; Pannerden-Kandia

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid [m+NAP]	Frequentie kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid (indicatief) [1/jr]	Hoogwater dec 1993		Hoogwater jan/feb 1995		Hoogwater okt/nov 1998		Hoogwater jan 2011	
			Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?
PAN_V1	18.42	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
	19.79	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
PAN_V2	17.88	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
	19.27	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
PAN_V3	16.44	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
PAN_V4	16.00	<1/10000	J	N	N	N	N	N	J	N
PAN_V5	15.40	1/880	J	N	J	N	J	N	N	N
PAN_V6	15.94	<1/10000	J	N	J	N	J	N	N	N

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid [m+NAP]	Frequentie kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid (indicatief) [1/jr]	Hoogwater dec 1993		Hoogwater jan/feb 1995		Hoogwater okt/nov 1998		Hoogwater jan 2011	
			Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?	Wel opgetreden volgens wellenkaart?	Kritieke buitenwaterstand overschreden?
PAN_V7	15.41	1/1860	N	N	N	N	N	N	N	N
PAN_V8	16.03	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
PAN_V9	15.68	<1/10000	J	N	J	N	N	N	N	N
PAN_V10	14.30	1/40	J	N	J	J	J	N	N	N
	14.15	1/30	J	J	J	J	J	N	N	N
PAN_V12	15.86	<1/10000	J	N	J	N	N	N	N	N
	15.64	<1/10000	J	N	J	N	N	N	N	N
PAN_V13	15.74	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
	15.50	<1/10000	N	N	N	N	N	N	N	N
PAN_V14	15.17	1/3300	N	N	N	N	N	N	N	N
	14.98	1/920	N	N	N	N	N	N	N	N

9 Conclusies

9.1 Algemeen

De conclusies uit deze proeftoetsing zijn alleen van toepassing op de trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia. Het is niet mogelijk om deze conclusies zonder een aanvullende analyse toe te passen op locaties met eigenschappen die afwijken van die op de trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia.

9.2 Analytische berekeningen

De trajecten 's Gravenwaard en Pannerden-Kandia zijn opgedeeld in vakken met uniforme geometrie en ondergrond. De indeling is gemaakt op basis van variaties in geometrie (aanwezigheid van sloten of open water, aanwezige kwelweglengte en hoogte van het maaiveld) en variaties in ondergrond (dikte van de deklaag, en aard en samenstelling van het watervoerend pakket). Om inzicht in de consequenties van de aanpassing van de rekenregel van Sellmeijer (2013) en in de invloed van nieuw vergaarde informatie te verkrijgen is vervolgens per vak de kritieke kwelweglengte in opeenvolgende stappen berekend:

- Stap 1: Invoer op basis van derde toetsronde en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 1
- Stap 2: Invoer op basis van derde toetsronde en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2
- Stap 3: Aanpassen geometrie (niveau van de buitenwaterstand en hoogte van het maaiveld) en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2
- Stap 4: Aanpassen dikte deklaag op basis van beschikbare grondonderzoeken en zandbanenkaart en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2
- Stap 5: Aanpassen watervoerend pakket op basis van SOS segmenten en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2
- Stap 6: Aanpassen watervoerend pakket op basis van beschikbare onderzoeken en GeoTOP en controle op piping met toetsregel Sellmeijer 2

Op basis van de resultaten van de berekeningen kan het volgende worden geconcludeerd:

- De kritieke kwelweglengte bij Stap 6 is een veelvoud van die bij Stap 1 (een factor 3.0-7.5 (gemiddeld 5.5) langer voor representatieve profielen binnen het traject 's Gravenwaard en een factor 2.3-4.6 (gemiddeld 3.1) langer voor representatieve profielen binnen het traject Pannerden-Kandia).
- Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 2 met die bij Stap 1 volgt dat het controleren op piping met toetsregel Sellmeijer 2 leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte (gemiddeld 30 m voor representatieve profielen binnen het traject 's Gravenwaard en gemiddeld 33 m voor representatieve profielen binnen het traject Pannerden-Kandia).
- Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 4 met die bij Stap 2 volgt dat het aanpassen van de geometrie en de dikte van de deklaag gemiddeld genomen leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte (gemiddeld 36 m voor representatieve profielen binnen het traject 's Gravenwaard en gemiddeld 50 m voor representatieve profielen binnen het traject Pannerden-Kandia). Dit duidt erop dat in de derde toetsronde niet altijd een veilige schematisatie is gegeven.
- Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 5 met die bij Stap 4 volgt dat het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van Stochastische Ondergrond Schematisatie leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte (gemiddeld 50 m voor representatieve profielen binnen het traject 's Gravenwaard en gemiddeld 70 m voor representatieve profielen binnen het traject Pannerden-Kandia). De toename in kritieke

kwelweglengte is het gevolg van het hanteren van een grotere doorlatendheid van het zandpakket in de berekeningen bij Stap 5.

- Uit een vergelijking tussen de resultaten bij Stap 6 met die van Stap 5 volgt dat het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van beschikbare onderzoeken en GeoTOP voor het traject 's Gravenwaard gemiddeld genomen leidt tot een toename in kritieke kwelweglengte, terwijl er voor bepaalde profielen sprake is van een afname in kritieke kwelweglengte. De toename in kritieke kwelweglengte (gemiddeld 67 m voor representatieve profielen binnen het traject 's Gravenwaard) is het gevolg van het hanteren van een kleinere korreldiameter D_{70} in combinatie met een groter doorlaatvermogen van het zandpakket in de berekeningen bij Stap 6. Het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van beschikbare onderzoeken en GeoTOP leidt voor het traject Pannerden-Kandia tot een afname in kritieke kwelweglengte. De afname in kritieke kwelweglengte (gemiddeld 25 m voor representatieve profielen binnen het traject Pannerden-Kandia) is hoofdzakelijk het gevolg van het hanteren van een kleinere doorlatendheid van het zandpakket in de berekeningen bij Stap 6.
- De kritieke kwelweglengte voor het representatieve profiel (bij Stap 5 en Stap 6) is gemiddeld genomen nagenoeg gelijk aan die voor het maatgevende profiel binnen het betrokken dijkvak. De verschillen in berekende kritieke kwelweglengte zijn kleiner dan 10%. Dit duidt erop dat de vakindeling zodanig is gekozen dat ieder vak een behoorlijk uniforme geometrie en ondergrond kent.

9.3 D-Geo Flow berekeningen

Voor de profielen bij dp 72, dp 75 en dp 147 zijn D-Geo Flow berekeningen uitgevoerd. Onderzocht zijn de gevoeligheden van de kwelweglengte, de gelaagdheid van de grondopbouw, de anisotropie van de grondlagen in het watervoerend pakket, de doorlatendheid van de bovenste grondlagen in het watervoerend pakket en de doorlatendheid van de deklaag in het voor- en achterland.

Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsberekeningen voor de profielen bij dp 72, dp 75 en dp 147 kan het volgende worden geconcludeerd:

- Het verlengen van de kwelweglengte leidt tot een toename in kritiek verval. Het verkorten van de kwelweglengte leidt tot een afname in kritiek verval.
- Het op- of neerwaarts verfijnen van de doorlatendheid van de bovenste grondlagen in het watervoerend pakket leidt tot een toename in kritiek verval. Bij opwaarts verfijnen is de toename in kritiek verval in de regel groter dan bij neerwaarts verfijnen.
- Het vergroten van de doorlatendheid van de deklaag in het voor- en achterland leidt tot een afname in kritiek verval. Hetzelfde geldt voor het vergroten van de doorlatendheid van de deklaag in enkel het voorland. De gevoeligheid van het aanpassen van de doorlatendheid in enkel het achterland is kleiner dan die van het aanpassen van de doorlatendheid in enkel het voorland. De gevoeligheid is grootst bij het aanpassen van de doorlatendheid in het voor- en achterland.
- Het toepassen van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de doorlatendheid (in plaats van het toepassen van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de doorlatendheid) leidt tot een aanzienlijke toename in kritiek verval.
- Het aannemen van een enkellaags watervoerend pakket in D-Geo Flow leidt tot een afname in kritiek verval. Detaillering van de grondlagen in het watervoerend pakket in de schematisatie in D-Geo Flow levert profijt op bij het toetsen van de veiligheid tegen piping.
- Voor het profiel bij dp 147 geldt dat het verlagen van de anisotropiefactor van de grondlagen in het watervoerend pakket van 3 naar 1 (door het vergroten van de verticale doorlatendheid van de grondlagen met een factor 3) tot een afname in kritiek verval leidt. Dit als gevolg van verticale begrenzing van de grondwaterstroming door de kleinere initiële verticale doorlatendheid.

- Voor de profielen bij dp 72 en dp 75 geldt dat het verlagen van de anisotropiefactor van de grondlagen in het watervoerend pakket van 3 naar 1 (door het vergroten van de verticale doorlatendheid van de grondlagen met een factor 3) tot een toename in kritiek verval leidt, waarschijnlijk als gevolg van de aanwezigheid van grindlagen in het watervoerend pakket, waardoor de initiële doorlatendheid reeds relatief groot is.
- Het opkisten van een wel in het achterland (in D-Geo Flow geschematiseerd door het opvoeren van de heave randvoorwaarde in het achterland) heeft geen effect op het resulterende kritieke verval. De toename in kritieke buitenwaterstand is recht evenredig met de toename in hoogte van de opkisting.

Vergelijking met kritiek verval volgens analytische berekening

De kritieke vervallen voor de D-Geo Flow berekeningen zijn ter vergelijking tevens analytisch berekend met toetsregel Sellmeijer 2. Voor de specifieke doorlatendheid is hierbij de gewogen gemiddelde waarde van de doorlatendheid van het zandpakket gehanteerd.

Op basis van de resultaten van de analytische controleberekeningen voor de profielen bij dp 72, dp 75 en dp 147 kan het volgende worden geconcludeerd:

- De kritieke vervallen voor de D-Geo Flow berekeningen zijn ter vergelijking tevens analytisch berekend met toetsregel Sellmeijer 2. Voor de specifieke doorlatendheid is hierbij de gewogen gemiddelde waarde van de doorlatendheid van het zandpakket gehanteerd. Voor de beschouwde profielen geldt dat het verschil tussen het kritiek verval volgens D-Geo Flow en het kritiek verval volgens de analytische berekening veelal beperkt is tot 0.3 m, zowel voor berekeningen met een enkellaags watervoerend pakket in D-Geo Flow als voor berekeningen met een meerlaags watervoerend pakket in D-Geo Flow. Dit duidt erop dat het effect van een meerlaags watervoerend pakket redelijkerwijs kan worden meegenomen in analytische berekeningen door het toepassen van de gewogen gemiddelde waarde van de doorlatendheid van het zandpakket.
- Het rivierwaarts verplaatsen van het intredepunt neigt tot onderschatting van het kritiek verval volgens D-Geo Flow. Het landwaarts verplaatsen van het intredepunt neigt tot overschatting van het kritiek verval volgens D-Geo Flow.
- Het rekenen met een equivalente dikte van het zandpakket (berekend als de dikte van het zandpakket gedeeld door de wortel van de anisotropiefactor) leidt voor bepaalde profielen tot een overschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow. Dit duidt erop dat het effect van anisotropie niet met deze methode kan worden verwerkt in analytische berekeningen.

9.4 Analytische berekeningen met fictieve lengte voorland

Aanvullend op de bovengenoemde analytische berekeningen zijn berekeningen uitgevoerd waarbij de fictieve lengte van het voorland in rekening is gebracht. Het kritieke verval is berekend met toetsregel Sellmeijer 2, zowel met karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige zandlaag (Stap 7A) als met gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige zandlaag (Stap 7B). De berekende kritieke buitenwaterstanden zijn vergeleken met voorspelde en in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden.

Op basis van de resultaten van de analytische berekeningen waarbij de fictieve lengte van het voorland in rekening is gebracht kan het volgende worden geconcludeerd:

- Bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7B) is de berekende kritieke buitenwaterstand significant (0.8-2.2 m) hoger dan bij toepassing van karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7A).

- Bij toepassing van karakteristieke waarden van de korreldiameter D70 en de specifieke doorlatendheid (Stap 7A) zou de kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid voor meerdere profielen zijn overschreden tijdens de hoogwaters van december 1993, januari/februari 1995, oktober/november 1998 en januari 2011, in sommige gevallen ook voor dijkvakken waar volgens de wellenkaart geen wellen zijn opgetreden.
- Bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D70 en de specifieke doorlatendheid (Stap 7B) is de kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid voor (bijna) alle profielen niet overschreden tijdens de hoogwaters van december 1993, januari/februari 1995, oktober/november 1998 en januari 2011. Dit komt overeen met de tijdens de hoogwaters getoonde prestaties van de dijkvakken.

Bij het beoordelen van de resultaten moet worden opgemerkt dat de wellenkaart incompleet lijkt en soms onverklaarbaar is, dat rekening moet worden gehouden met onzekerheden in (op basis van betrekkinglijnen afgeleide) lokale hoogwaterstanden en dat de kritieke buitenwaterstand voor bepaalde profielen mogelijk is onderschat door onderschatting van de aanwezige kwelweglengte (omdat de breedte van de strook voorland waar geofysisch onderzoek heeft plaatsgevonden beperkt is).

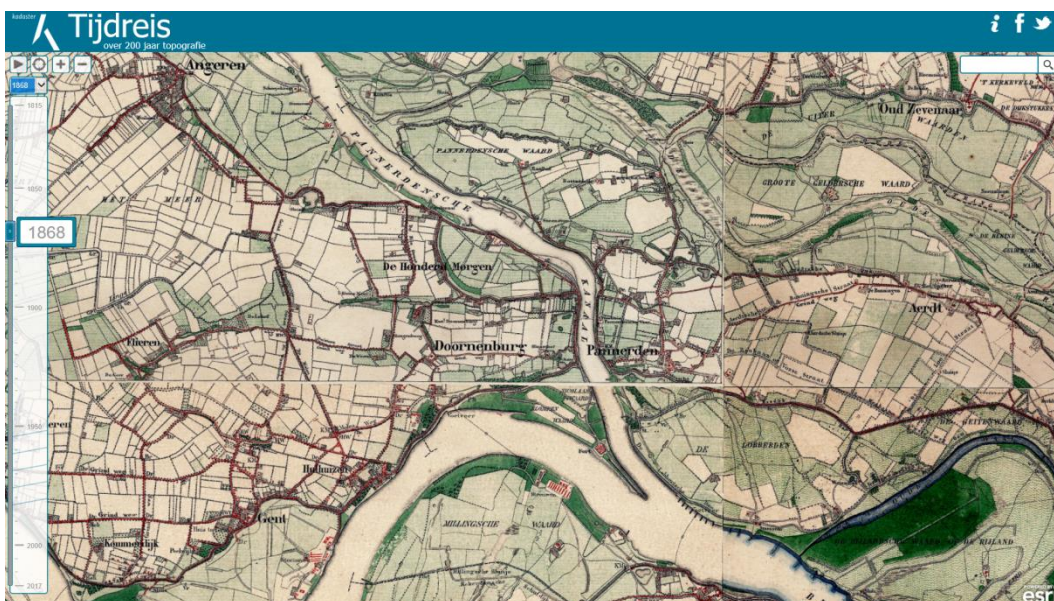
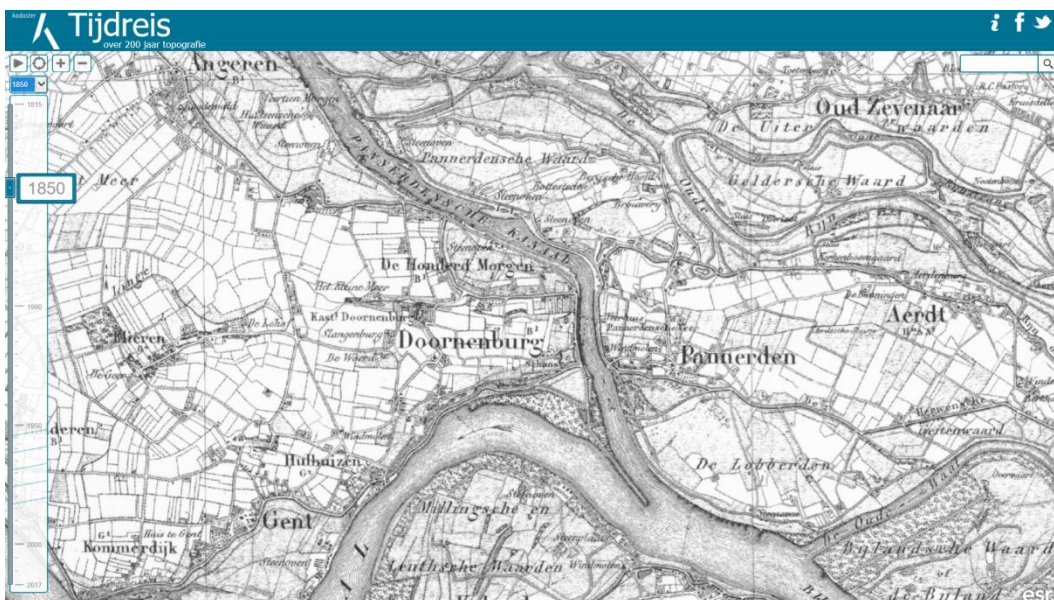
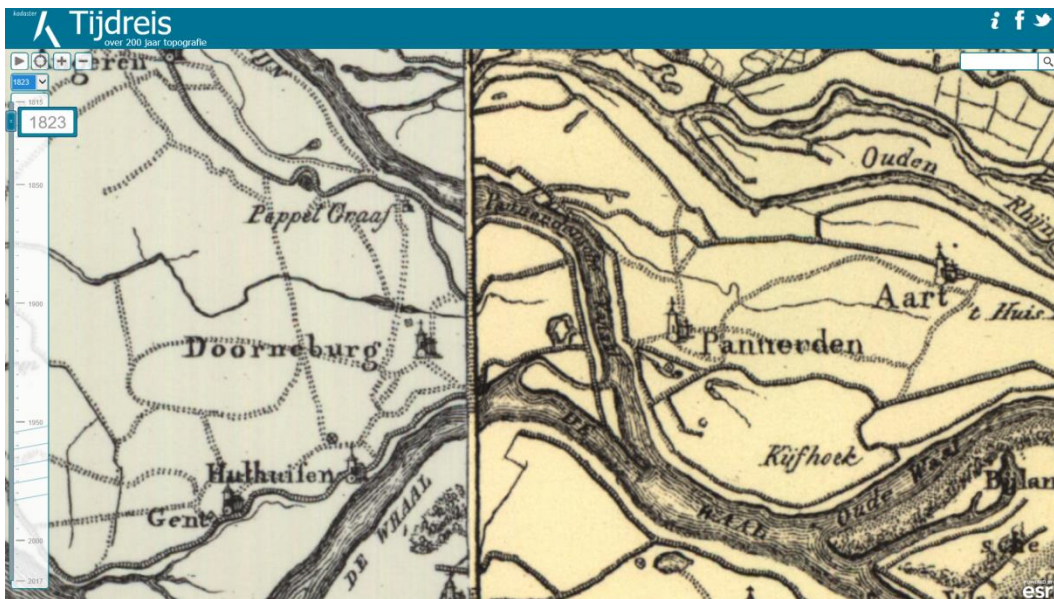
10 Referenties

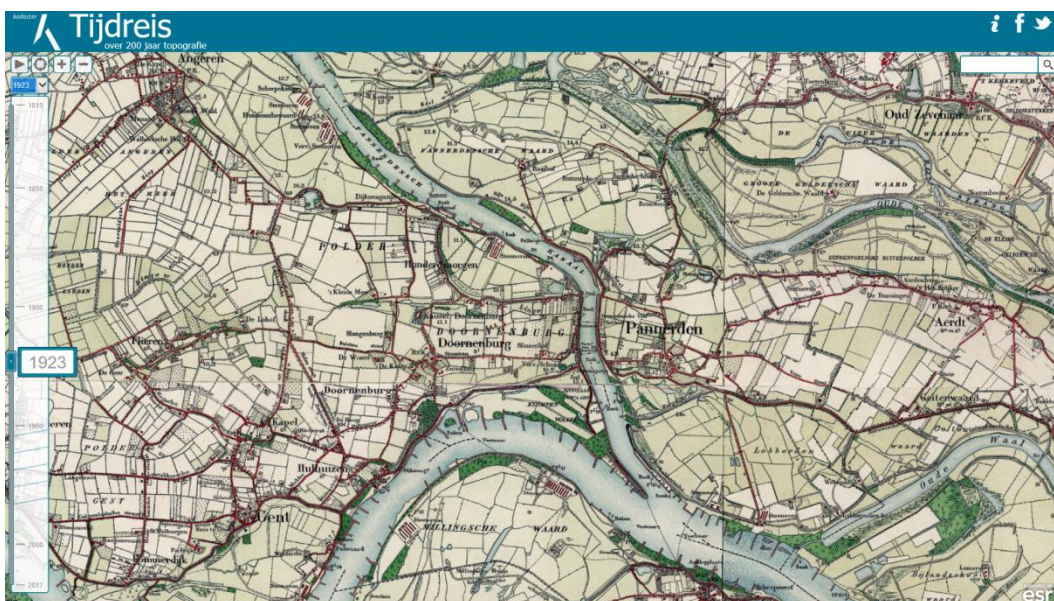
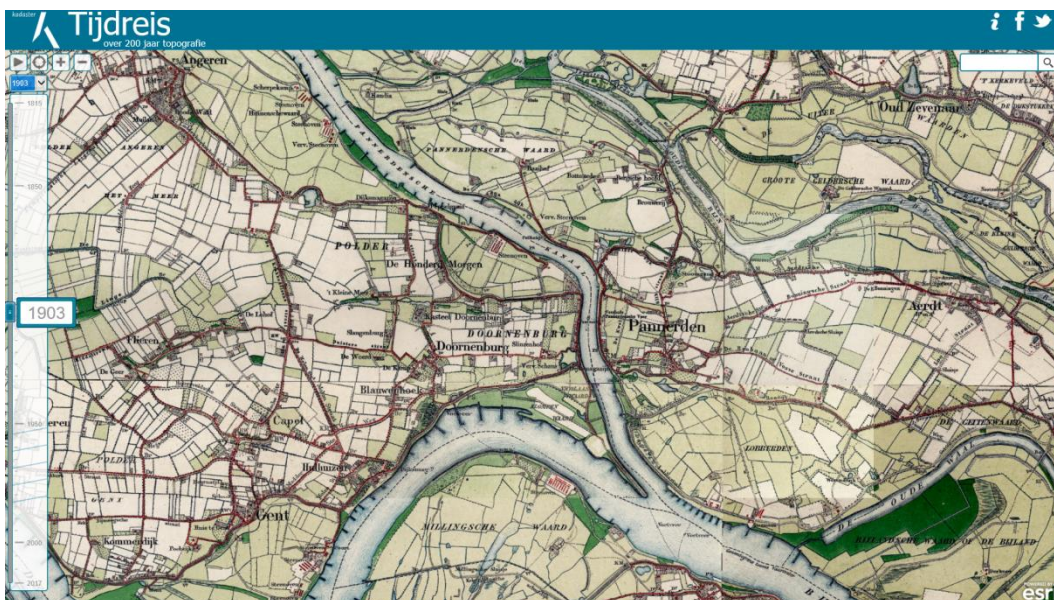
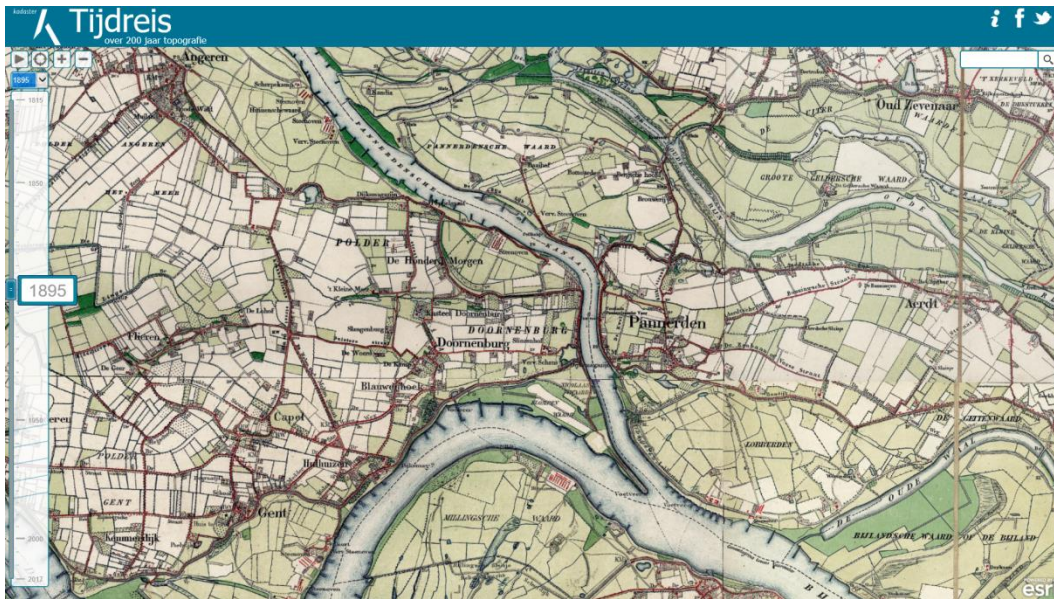
- [1] Hoogwaterbeschermingsprogramma, *Factsheet Beslisboom Piping (concept)*, 2017.
- [2] POV-piping portaal, sl: Waterschap Rivierenland, HaskoningDHV Nederland b.v., 2018.
- [3] Ondergrondgegevens Dinoloket, www.dinoloket.nl, 24 april 2018.
- [4] Bodemonderzoek ten behoeve van project “POV piping, intredeweerstand voorlanden”; Pompproef Pannerden nabij dijkpaal km 149, Multiconsult, augustus 2015.
- [5] Doorlatendheidsonderzoek Westervoort, Pannerden en Lobith; 1215-0050-00_21, waterschap Rijn en IJssel, 2016.
- [6] GeoData WRIJ, waterschap Rijn en IJssel, 10 mei 2018.
- [7] Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2011.
- [8] Grondwaterzakboekje, Bot Raadgevend Ingenieur, 2011.
- [9] Zand in Banen; Zanddiepte kaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel, K.M. Cohen, E. Stouthamer, W.Z. Hoek, H.J.A. Berendsen en H.F.J. Kempen, 2009.
- [10] Use of the 0.3D rule in D-Geo Flow, V. van Beek; 11200575-028-GEO-003. Deltares, 2018.
- [11] Verbetering Waalbandijk traject Rossum - Zaltbommel, Grontmij n.v., sl: Polderdistrikt Bommelerwaard, 1980.
- [12] Toelichting behorende bij het plan tot verhoging en verzwaring van de Pannerdense Dijk van dijkpaal 72 + 30 m tot dijkpaal 80 en van de Dijk loangs de Pannerdense Waard van dijkpaal 80 tot dijkpaal 102, Rijkswaterstaat, Directie Gelderland, november 1984.
- [13] Bodemonderzoek ten behoeve van project “POV piping, intredeweerstand voorlanden”; Pompproef Lobith nabij dijkpaal km 72 's Gravenwaardse dam, Multiconsult, augustus 2015.
- [14] Doorlatendheidsonderzoek Westervoort, Pannerden en Lobith; Rapportage geotechnisch veldwerk, Fugro, februari 2016.
- [15] Schematiseringshandleiding piping; WBI 2017, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017.
- [16] Modelstudie hoogwater Rijn januari 2018; POV-piping: intreeweerstand, Arcadis, juli 2018.

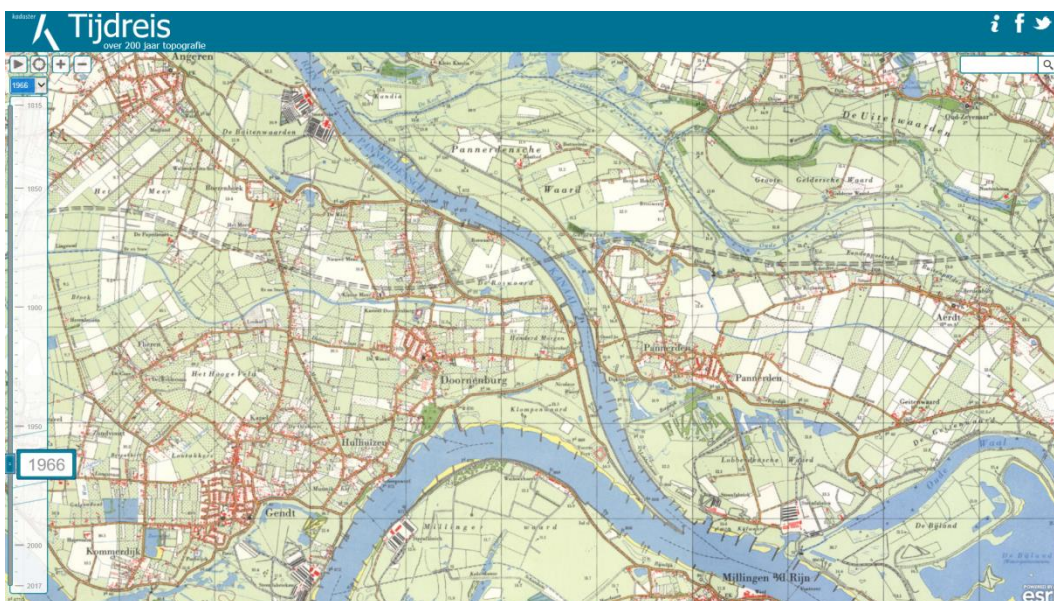
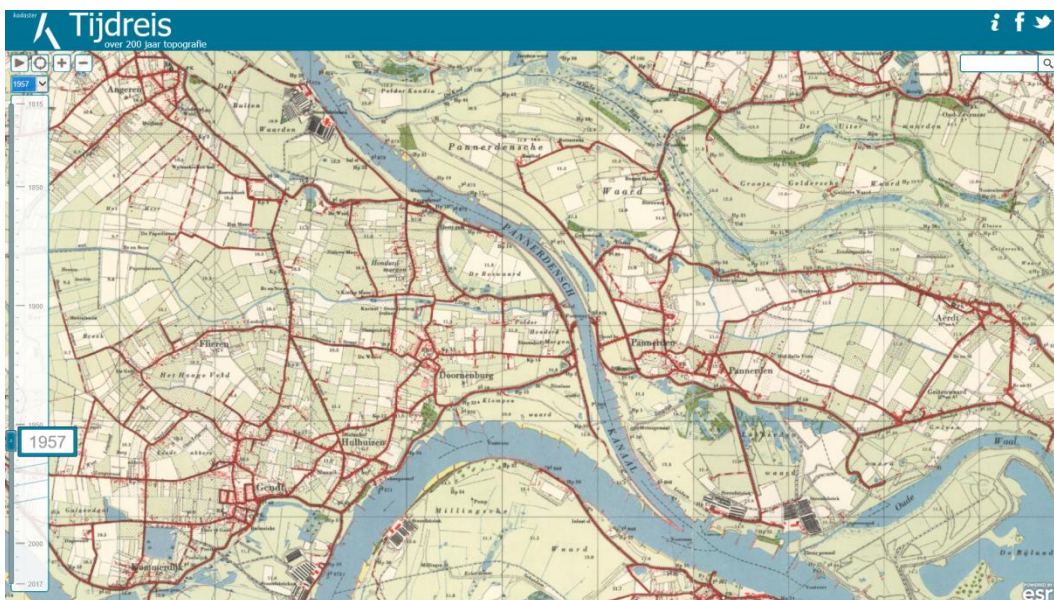
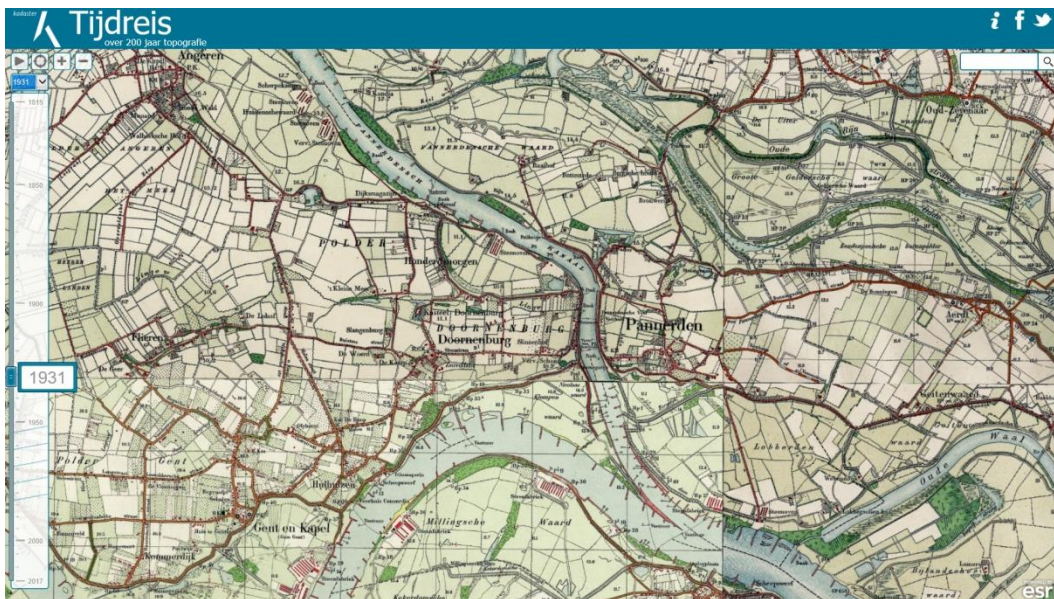
Bijlagen

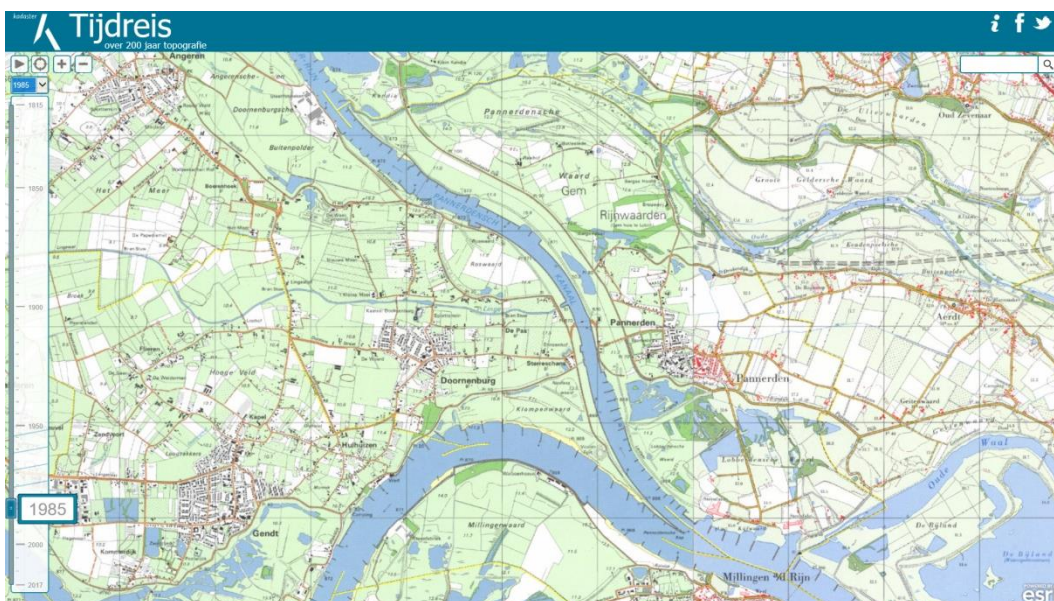
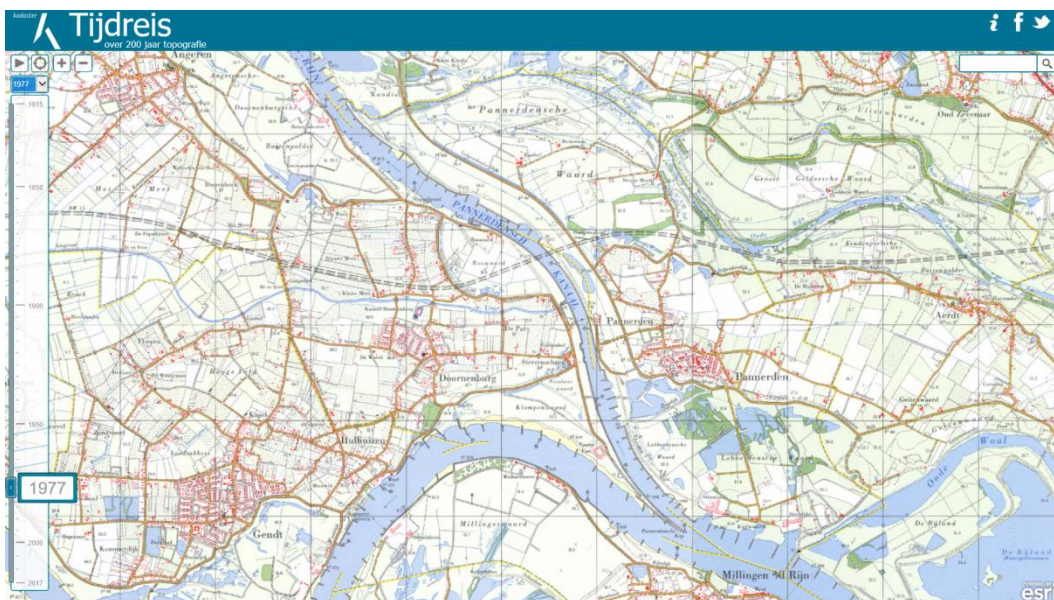
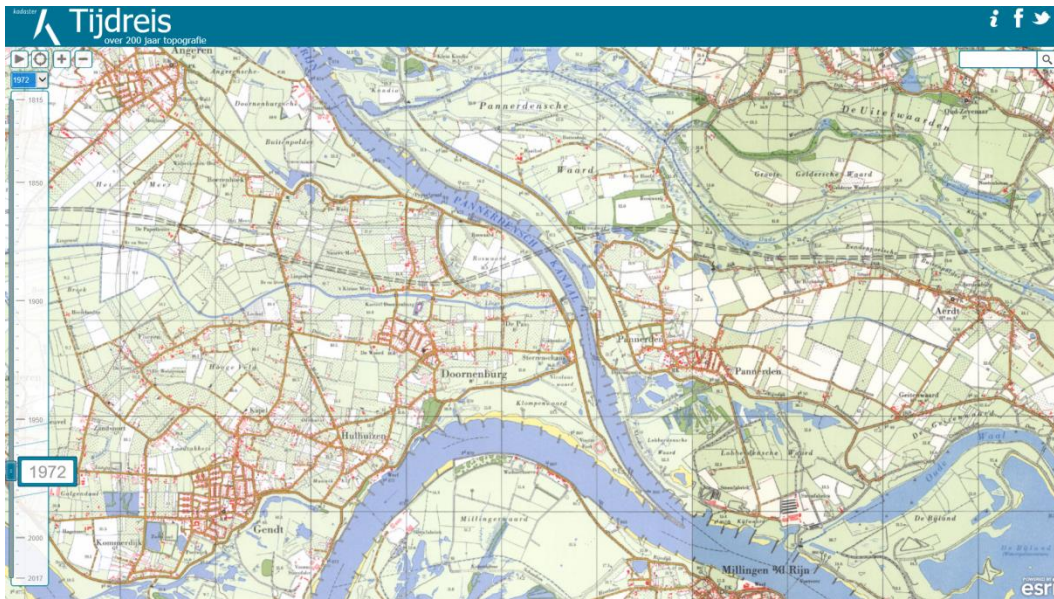
Bijlage 1	Historische kaarten
Bijlage 2	GeoTOP doorsnedes
Bijlage 3	Maatgevende profielen 's Gravenwaard
Bijlage 4	Maatgevende profielen Pannerden-Kandia
Bijlage 5	Bepaling effectieve doorlatendheid
Bijlage 6	Resultaten analytische berekeningen
Bijlage 7	Processchema Beslisboom Piping
Bijlage 8	Resultaten D-Geo Flow berekeningen
Bijlage 9	Resultaten analytische berekeningen vergelijking met D-Geo Flow
Bijlage 10	Toelichting rechter randvoorwaarde D-Geo Flow
Bijlage 11	Berekeningen fictieve lengte voorland
Bijlage 12	Resultaten analytische berekeningen met fictieve lengte voorland

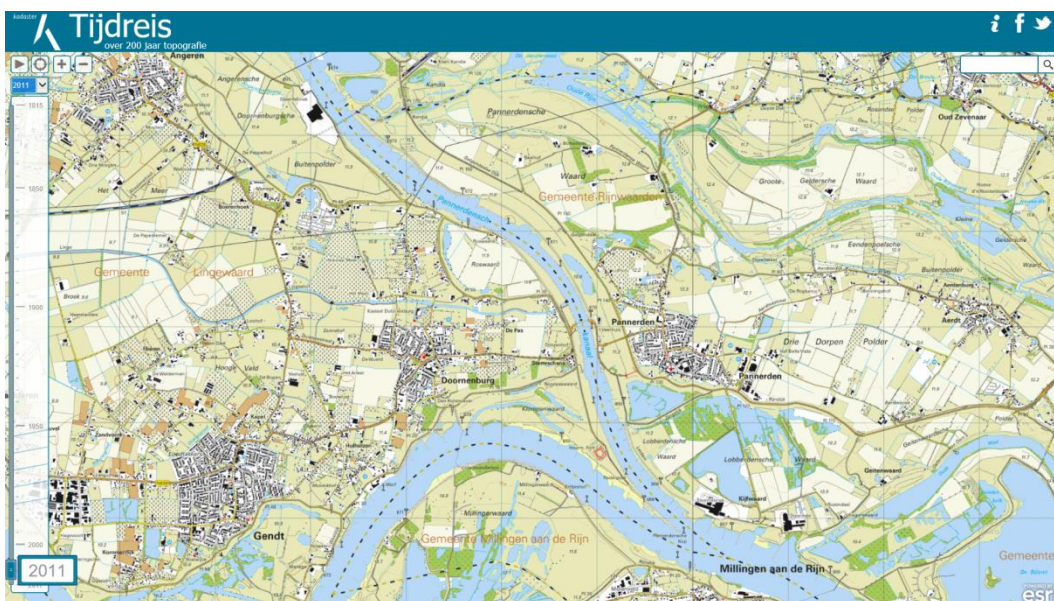
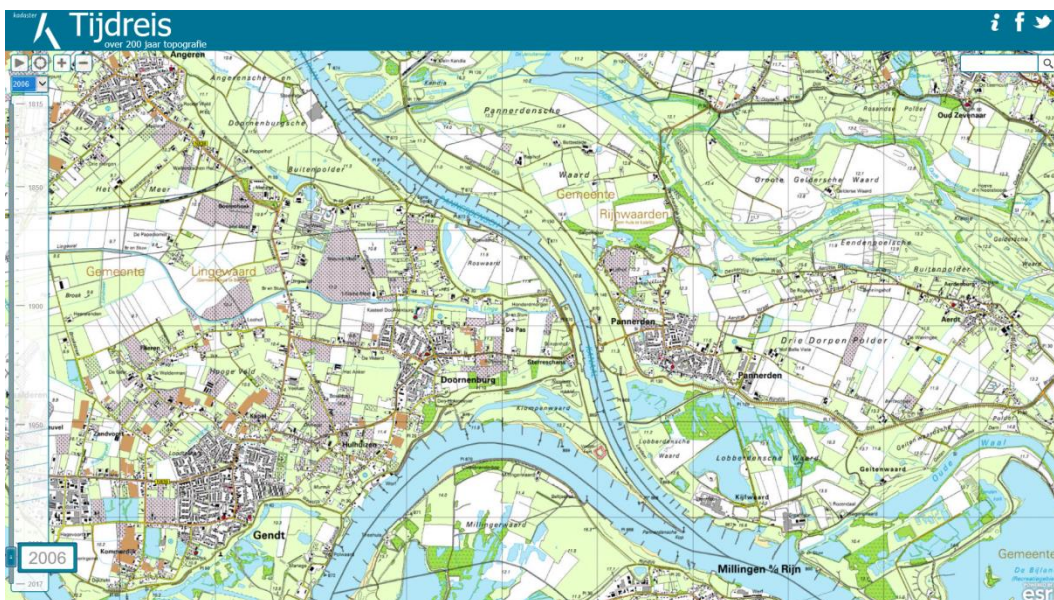
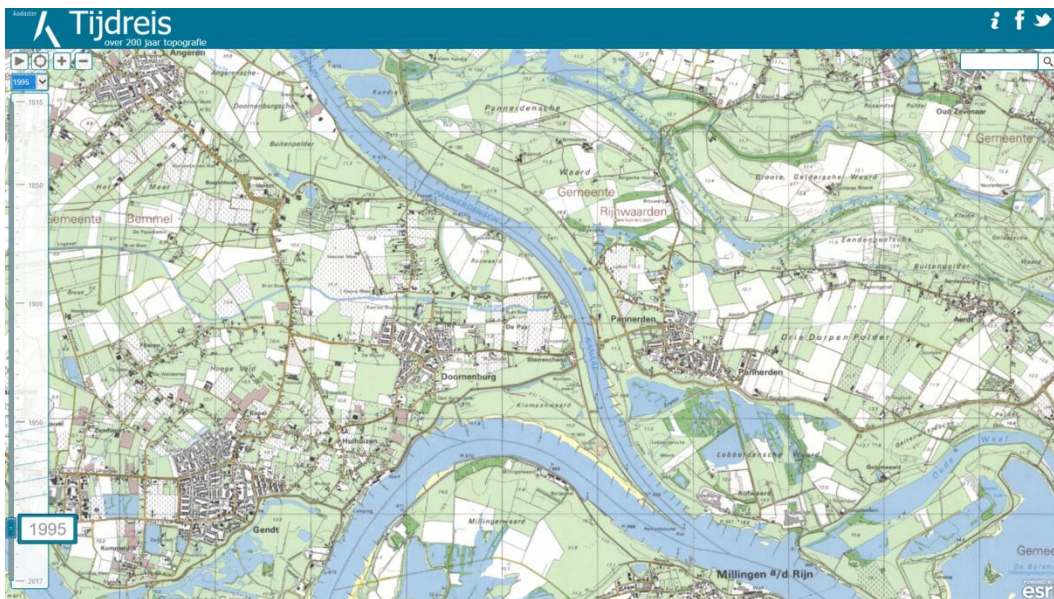
Bijlage 1 Historische kaarten



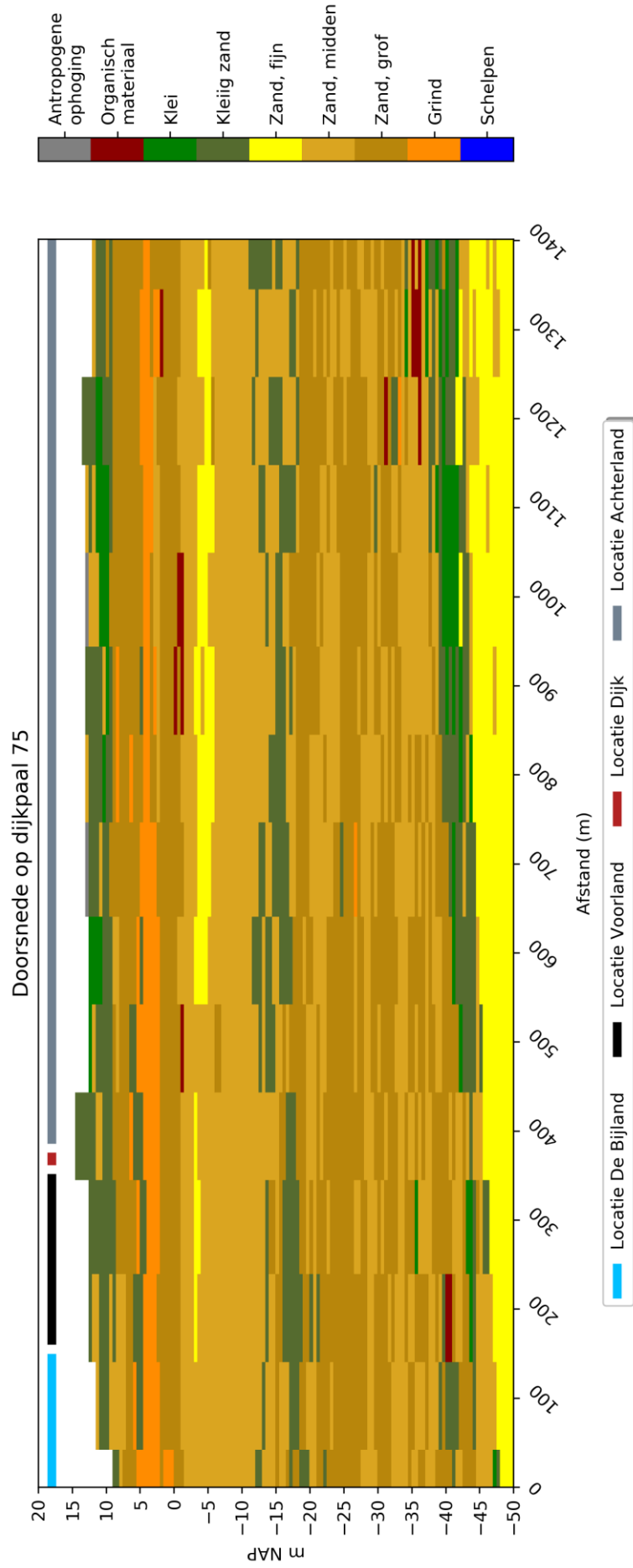


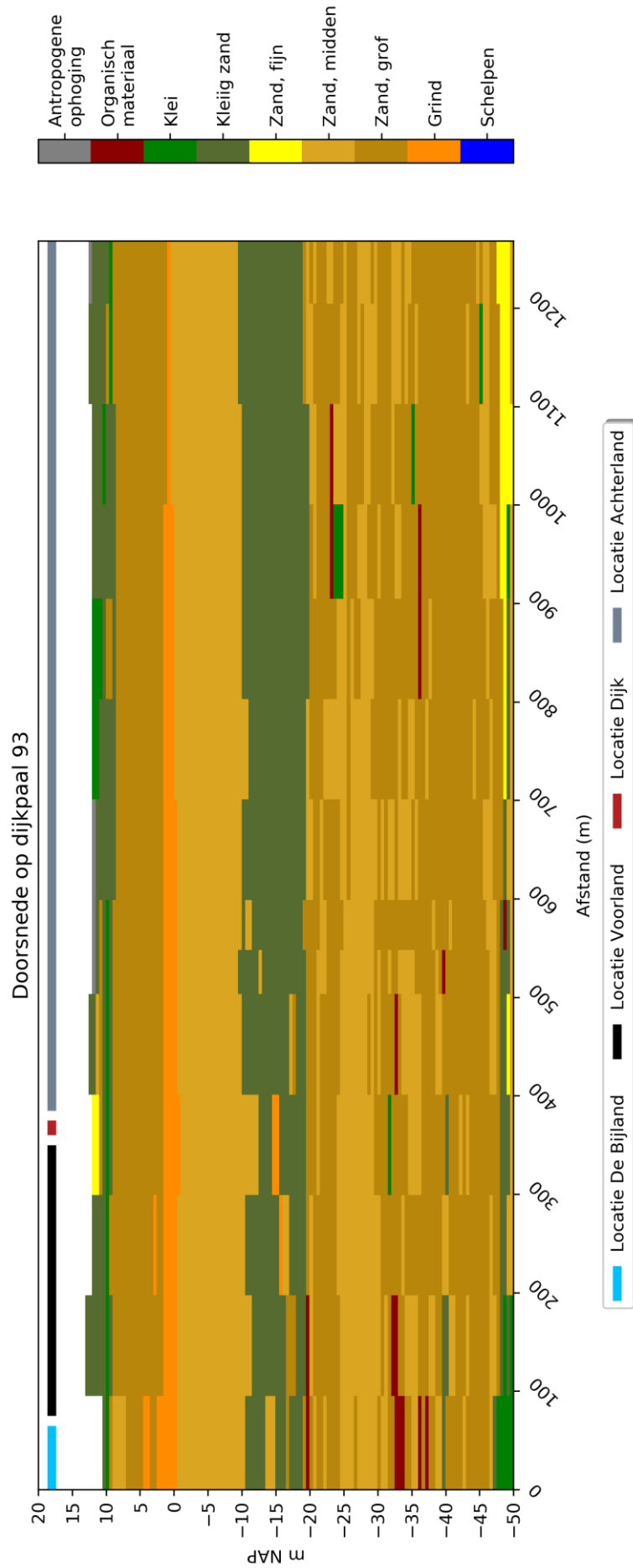


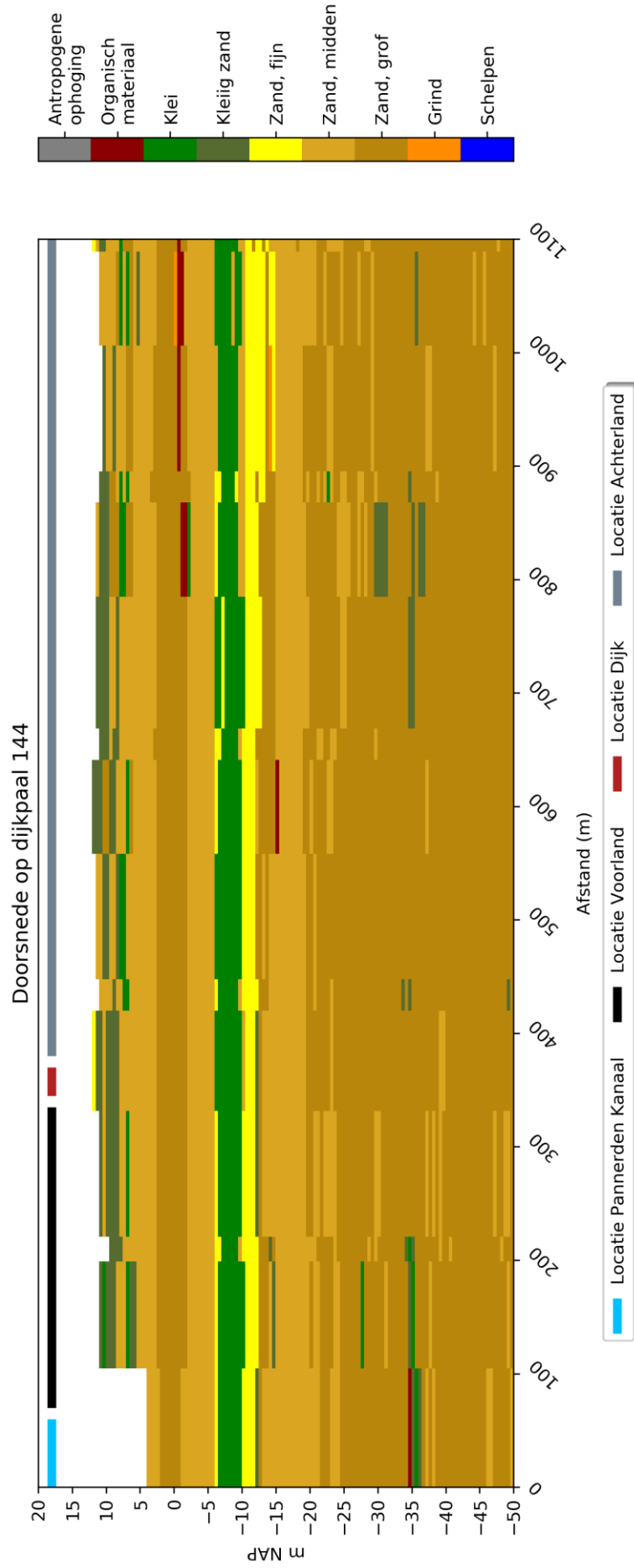


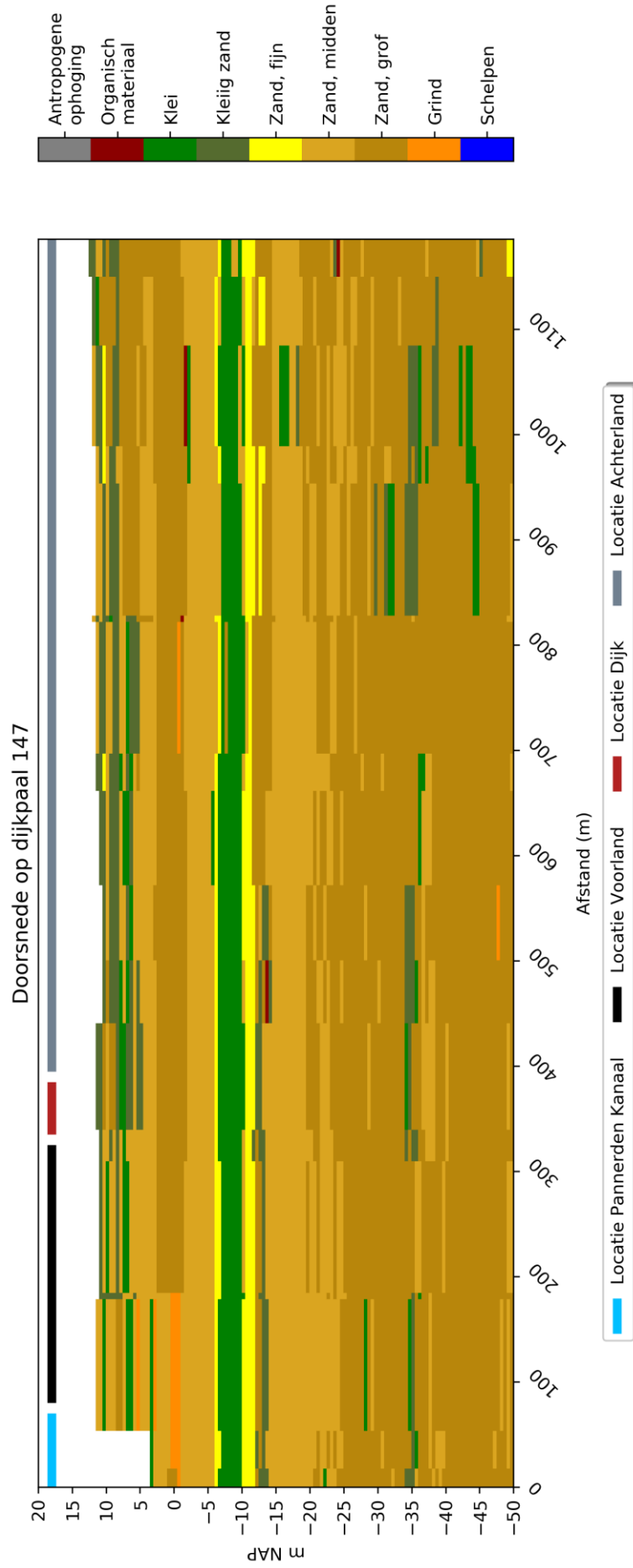


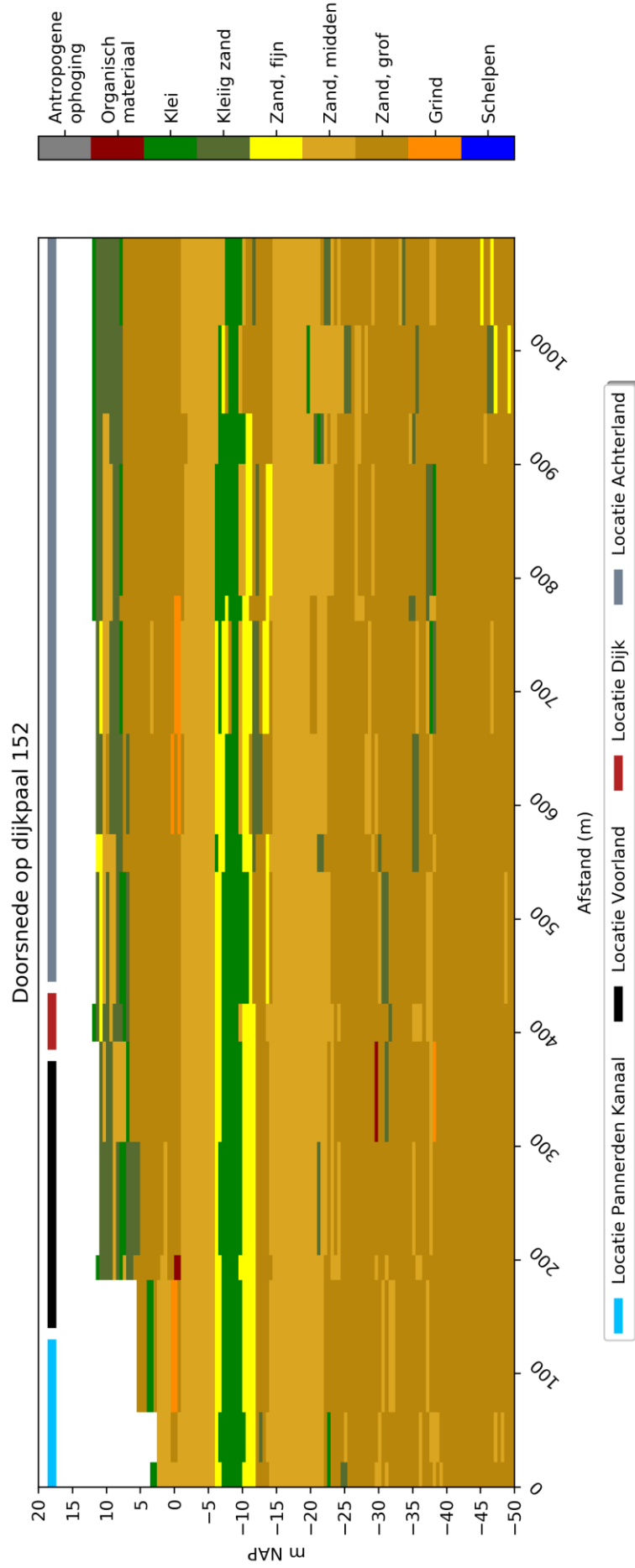
Bijlage 2 GeoTOP doorsnedes





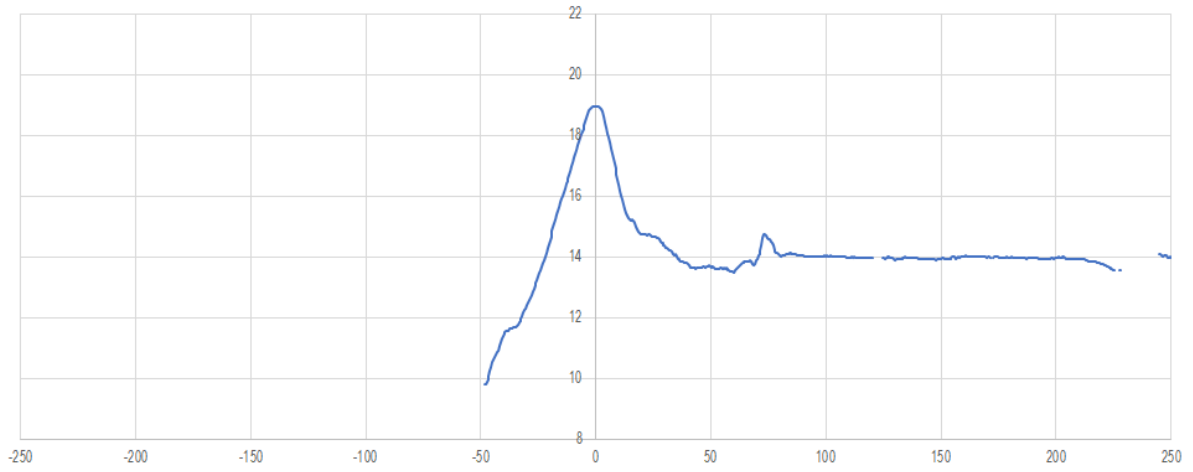




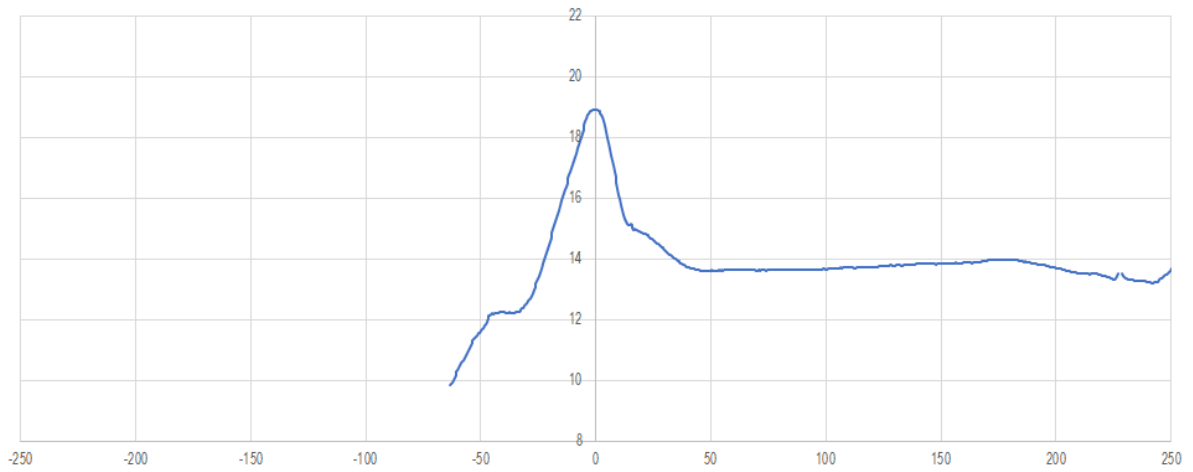


Bijlage 3 **Maatgevende profielen 's Gravenwaard**

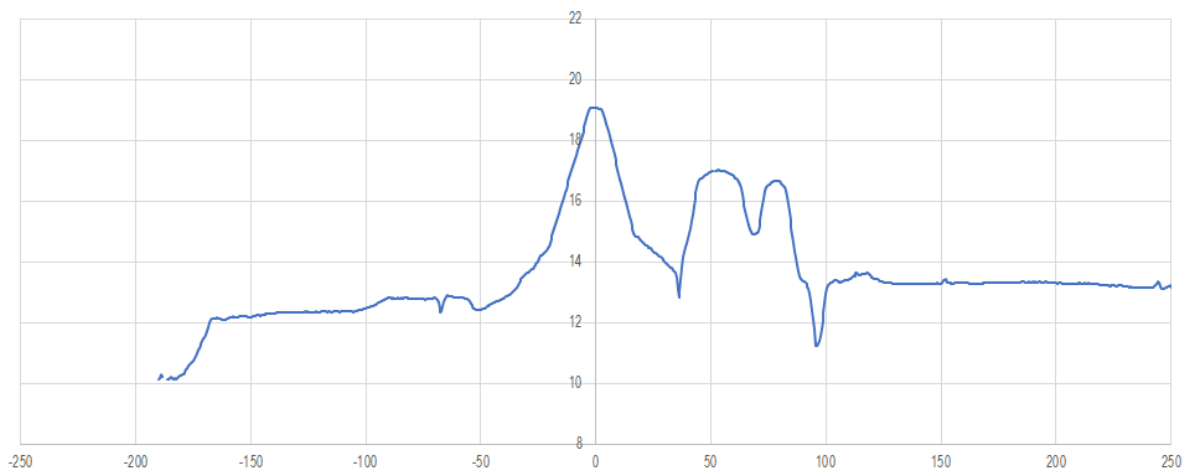
P_48_062+100



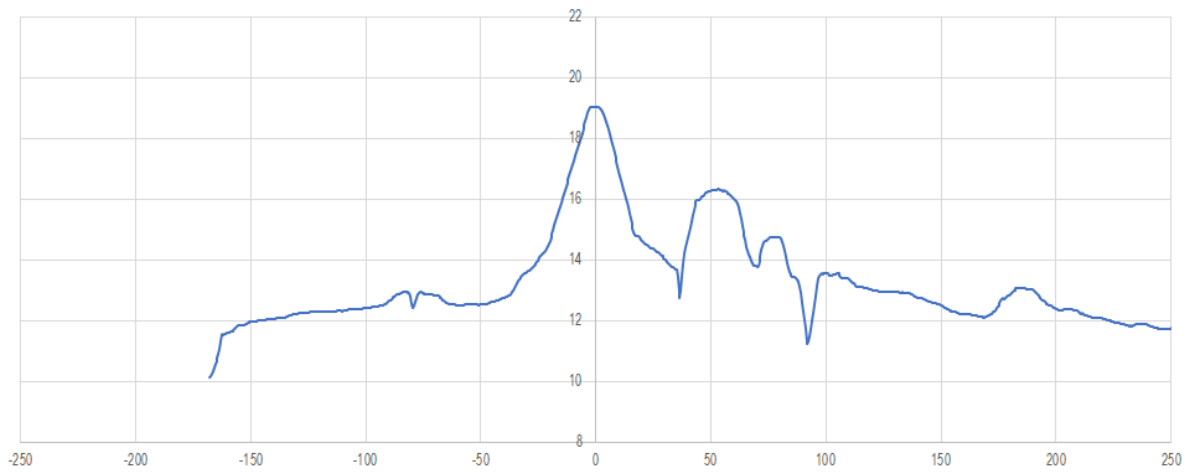
P_48_066+080



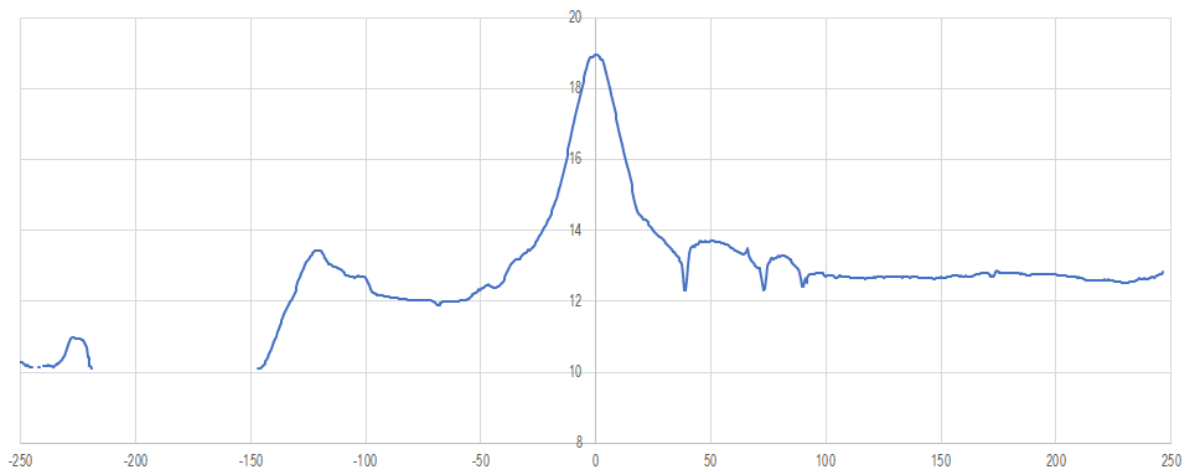
P_48_076+074



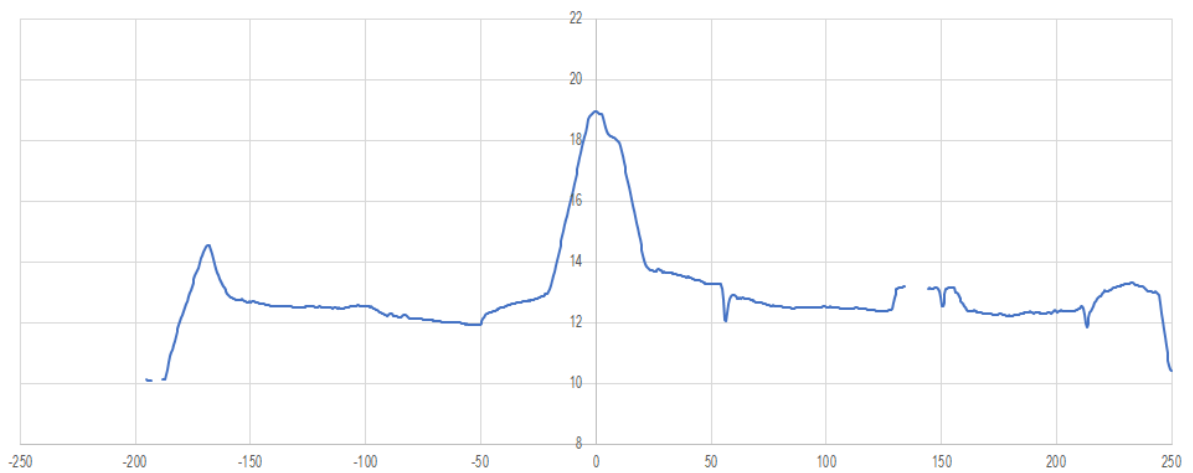
P_48_077+035



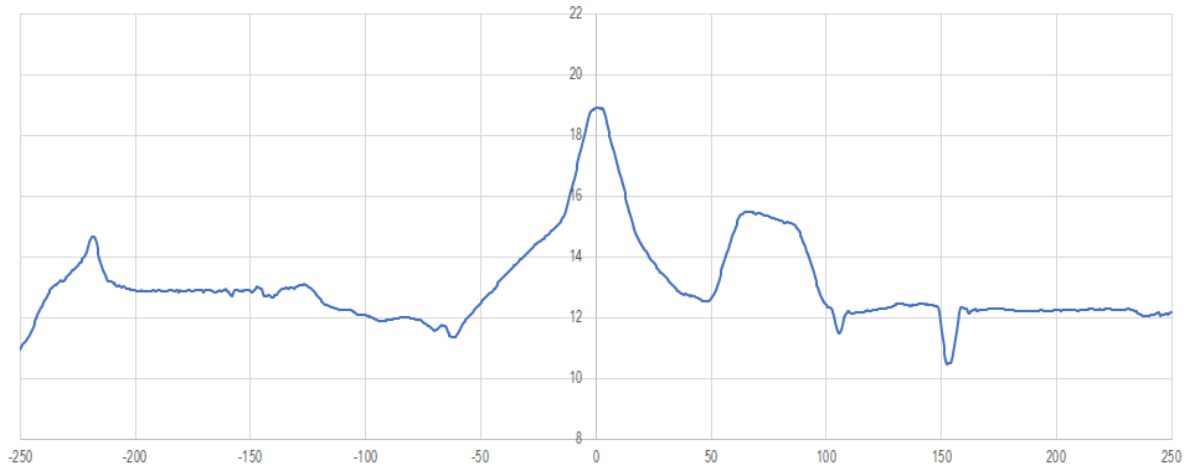
P_48_083+054



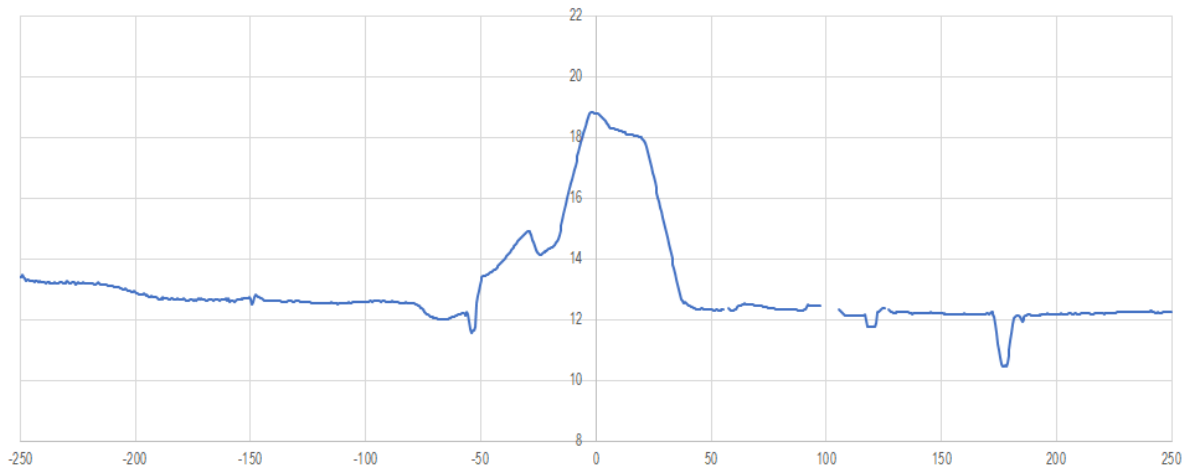
P_48_087+026



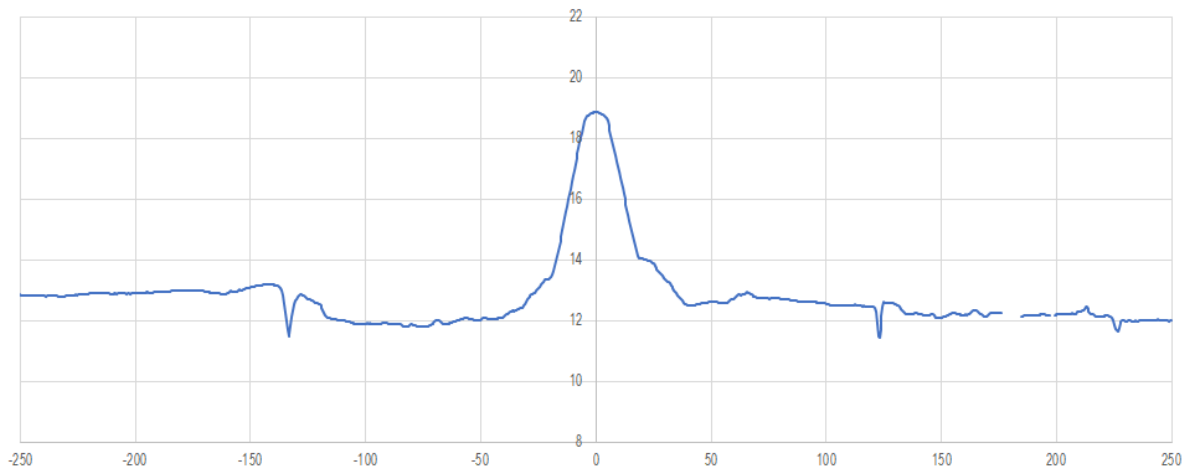
P_48_089+014



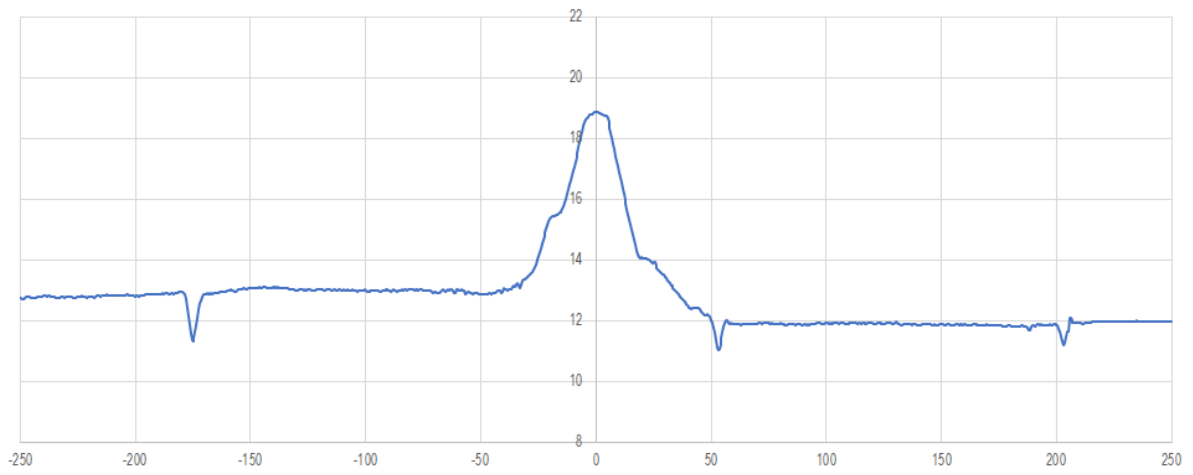
P_48_090+015



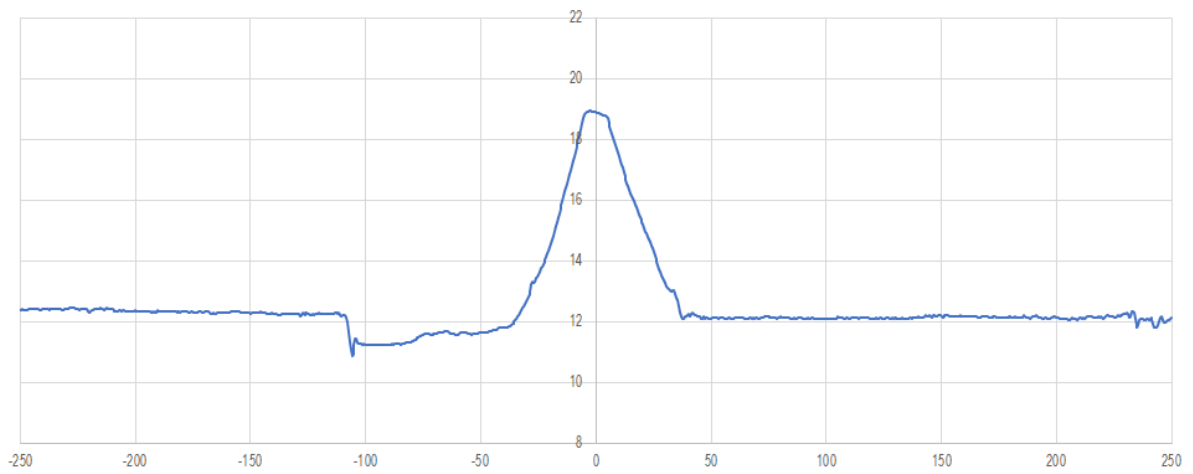
P_48_093+063



P_48_096+024

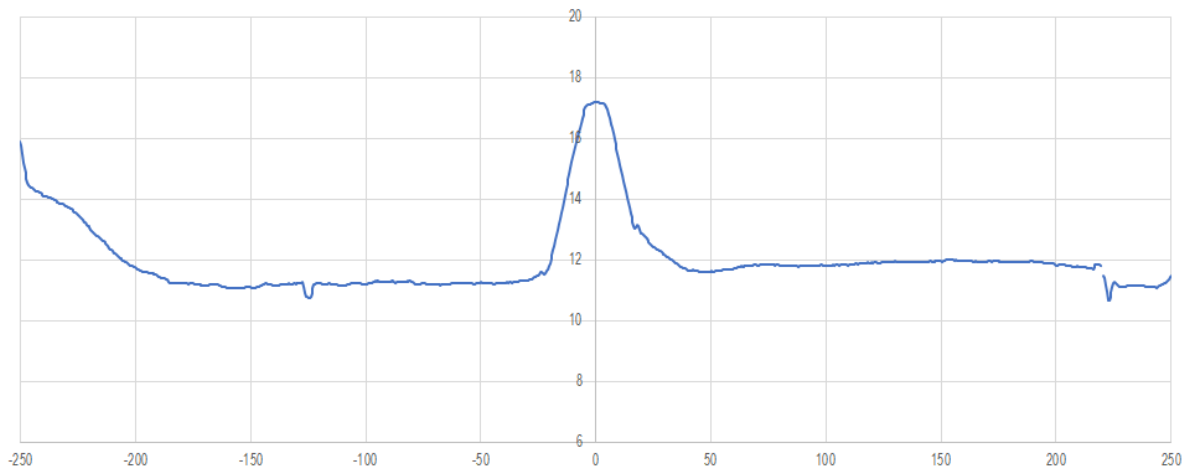


P_48_106+025

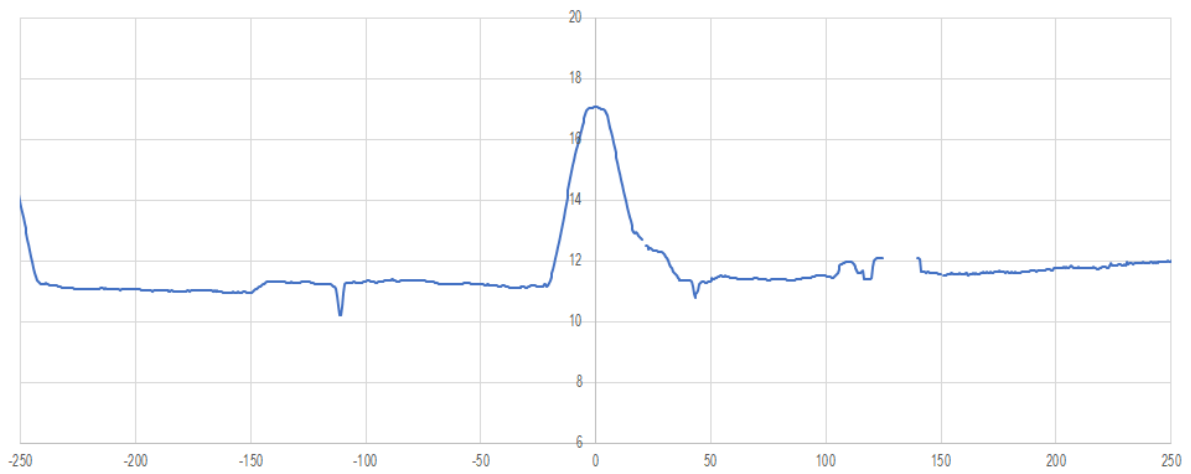


Bijlage 4 **Maatgevende profielen Pannerden-Kandia**

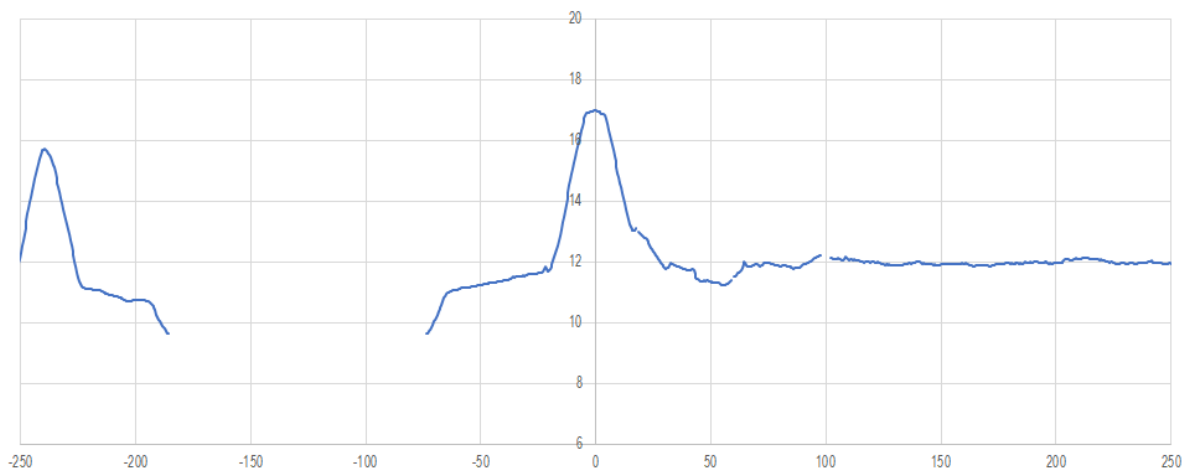
P_48_137+039



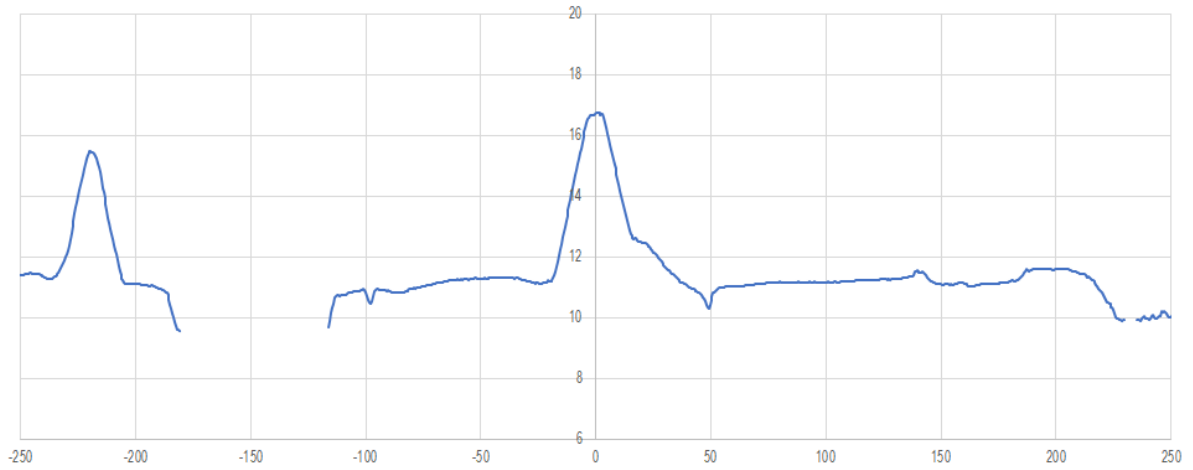
P_48_140+018



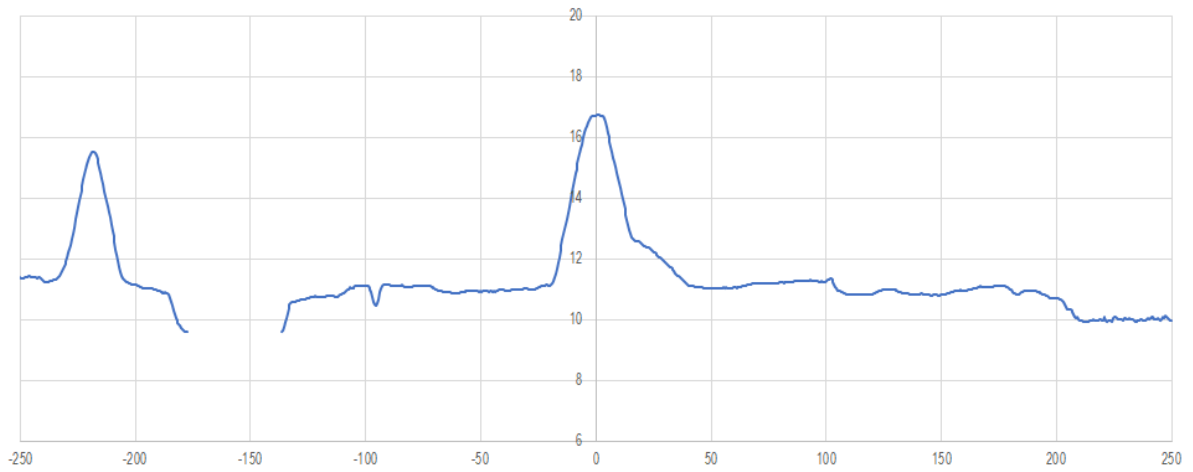
P_48_142+059



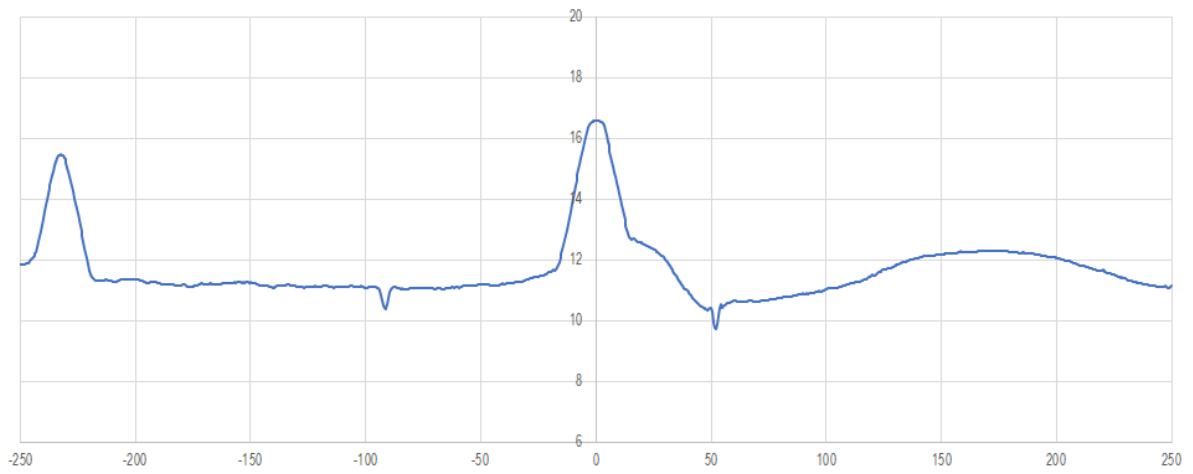
P_48_145+079



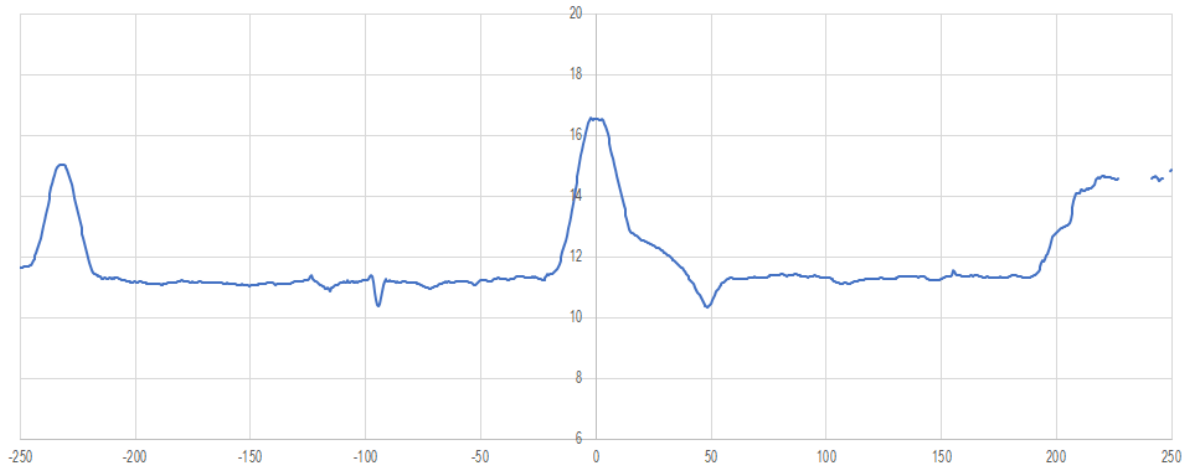
P_48_146+019



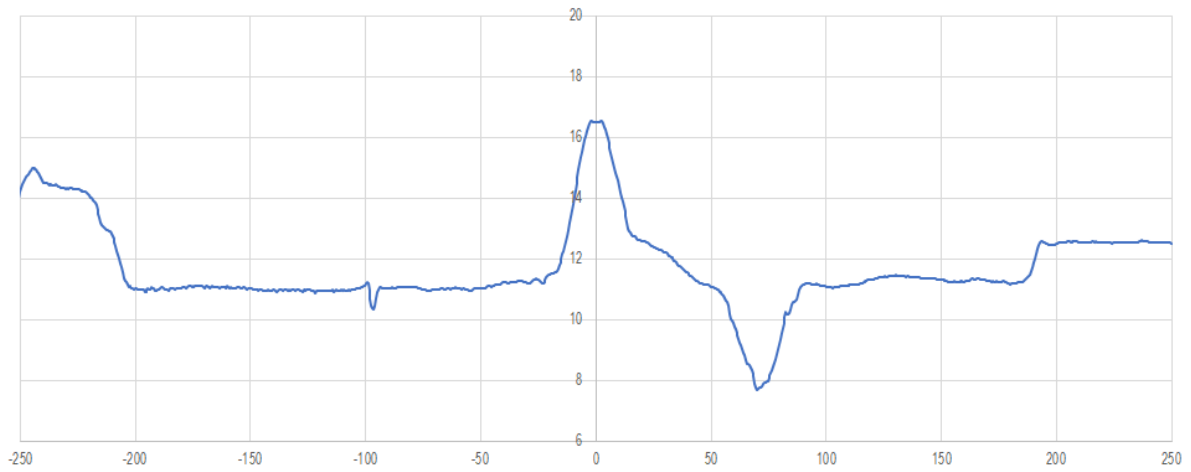
P_48_151+058



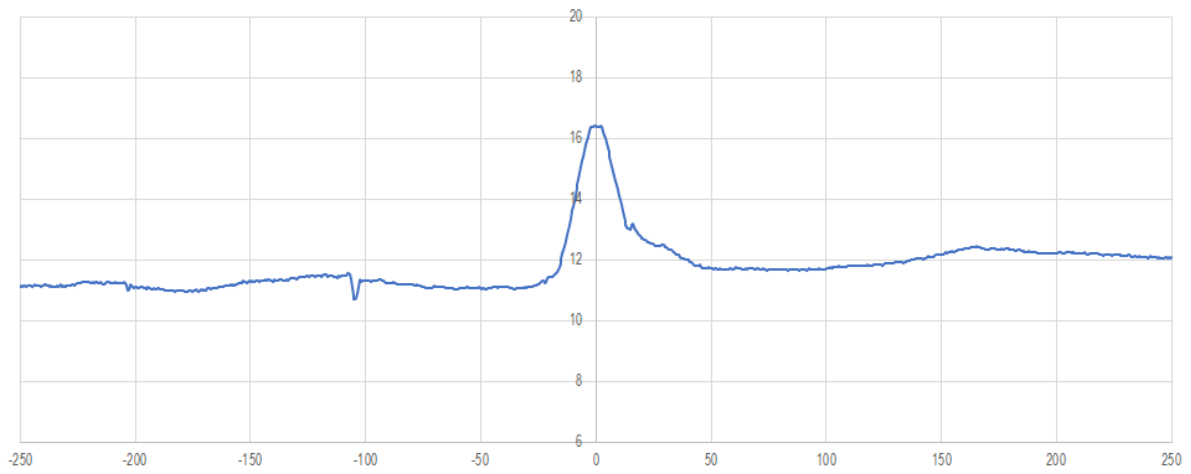
P_48_156+038



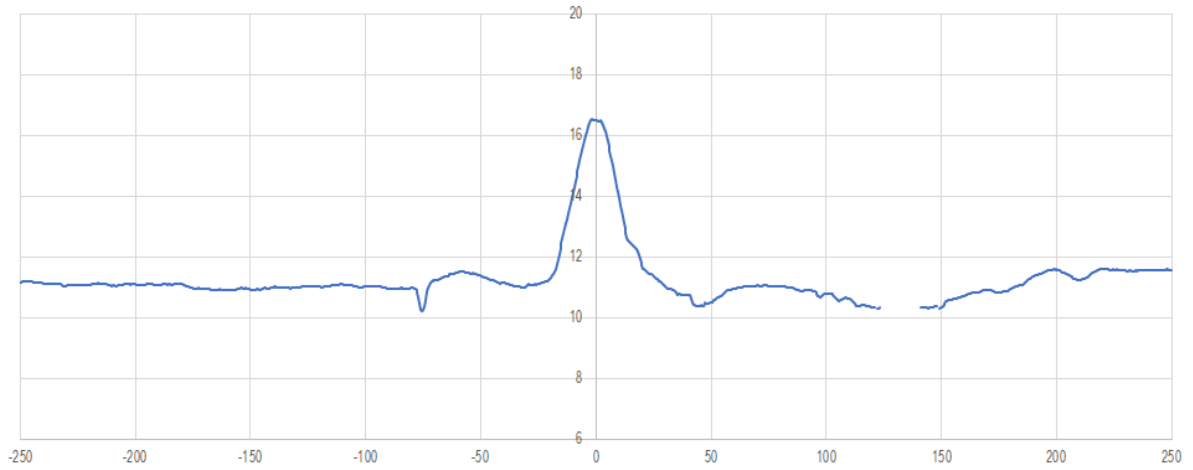
P_48_157+060



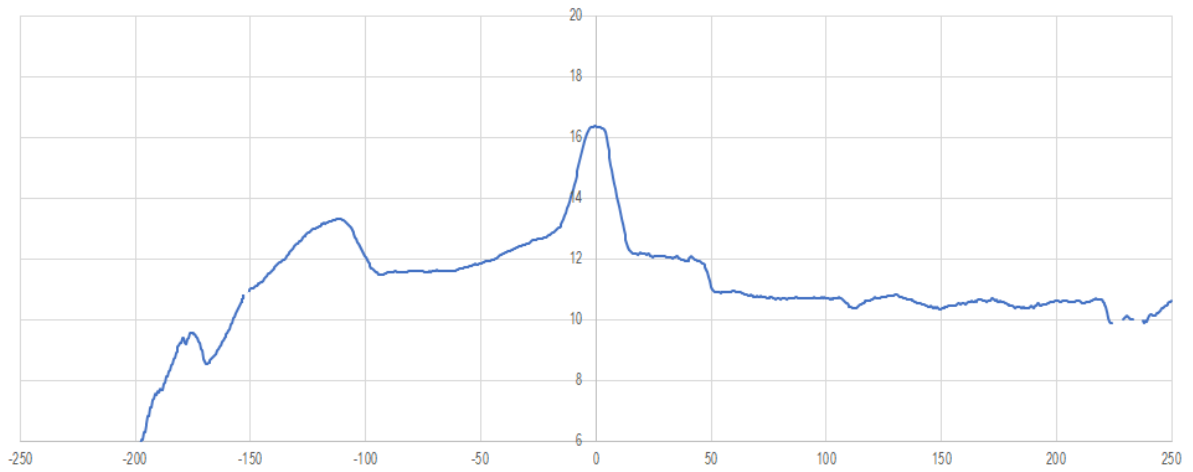
P_48_161+039



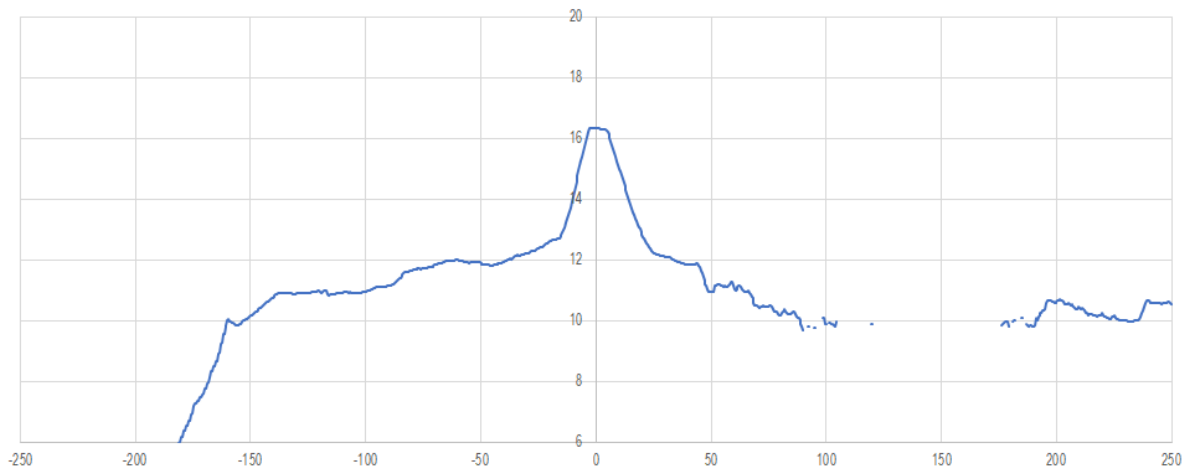
P_48_167+078

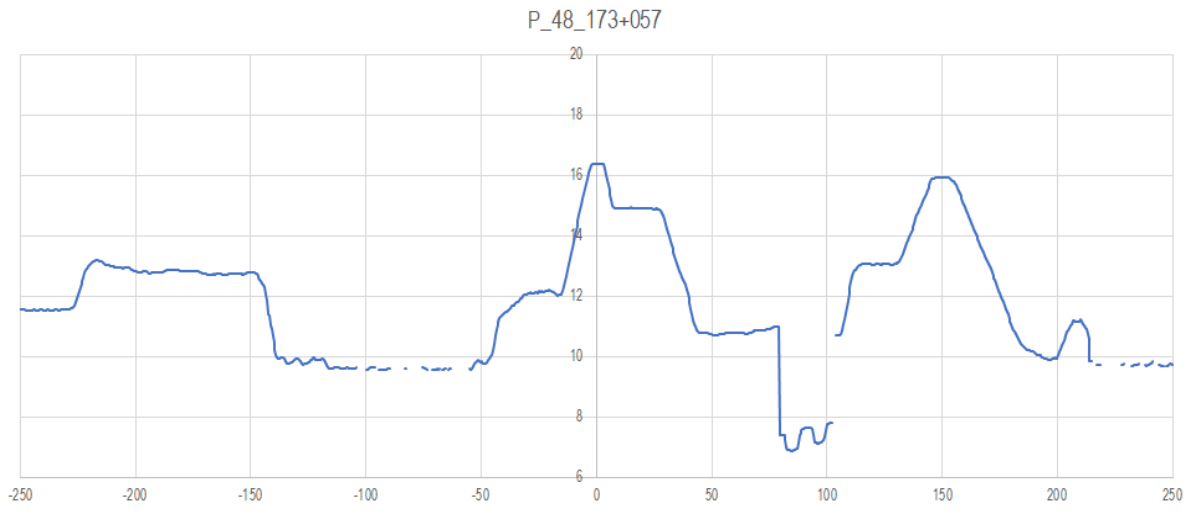


P_48_172+018



P_48_172+038





Bijlage 5 Bepaling effectieve doorlatendheid

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Lokaal scenario	Hoogte maaiveld	Hoogte onderkant deklaag	Grondsoort zandlaag 1	Bovenkant zandlaag 1	Onderkant zandlaag 1	Doorlatendheid zandlaag 1	Dikte zandlaag 1	Grondsoort zandlaag 2	Bovenkant zandlaag 2	Onderkant zandlaag 2	Doorlatendheid zandlaag 2	Dikte zandlaag 2
				[m+NAP]	[m+NAP]				k_1 [m/d]	d_1 [m]				k_2 [m/d]	d_2 [m]
GRA_V1	57+000	63+050	L1	14.09	12.90	Zand, midden	12.90	9.00	40	3.90	Zand, grof	9.00	6.00	120	3.00
GRA_V2	63+050	73+050	L1	13.39	12.51	Zand, midden	12.51	7.00	40	5.51	Zand, grof	7.00	5.00	120	2.00
GRA_V3	73+050	77+000	L1	13.15	12.05	Zand, midden	12.05	9.00	40	3.05	Zand, grof	9.00	5.00	120	4.00
GRA_V4	77+000	81+000	L1	13.00	12.48	Zand, midden	12.48	9.00	40	3.48	Zand, grof	9.00	4.50	120	4.50
GRA_V5	81+000	86+080	L1	13.00	12.12	Zand, fijn	12.12	5.00	20	7.12	Zand, midden	5.00	1.00	40	4.00
GRA_V6	86+080	88+080	L1	12.72	11.42	Zand, fijn	11.42	5.00	20	6.42	Zand, midden	5.00	1.00	40	4.00
GRA_V7	88+080	89+050	L1	12.18	10.82	Zand, midden	10.82	8.50	40	2.32	Zand, grof	8.50	1.00	120	7.50
GRA_V8	89+050	91+065	L1	12.55	10.49	Zand, midden	10.49	8.50	40	1.99	Zand, grof	8.50	1.00	120	7.50
GRA_V9	91+065	96+020	L1	12.39	10.33	Zand, midden	10.33	8.50	40	1.83	Zand, grof	8.50	1.00	120	7.50
GRA_V10	96+020	105+040	L1	12.30	11.84	Zand, midden	11.84	8.50	40	3.34	Zand, grof	8.50	1.00	120	7.50
GRA_V11	105+040	107+000	L1	12.30	12.12	Zand, midden	12.12	8.50	40	3.62	Zand, grof	8.50	-1.00	120	9.50
PAN_V1	135+030	138+000	L1	11.82	10.34	Zand, midden	10.34	6.00	60	4.34	Zand, fijn	6.00	1.00	20	5.00
PAN_V2	138+000	141+010	L1	11.75	10.50	Zand, midden	10.50	6.00	60	4.50	Zand, fijn	6.00	1.00	20	5.00
PAN_V3	141+010	143+060	L1	12.00	11.32	Zand, midden	11.32	2.50	60	8.82	Zand, grof	2.50	-1.50	130	4.00
PAN_V4	143+060	146+000	L1	11.27	10.68	Zand, midden	10.68	2.50	60	8.18	Zand, grof	2.50	-1.50	130	4.00
PAN_V5	146+000	148+030	L1	10.67	10.20	Zand, midden	10.20	2.50	60	7.70	Zand, grof	2.50	-1.50	130	4.00
PAN_V6	148+030	156+030	L1	11.22	10.24	Zand, midden	10.24	2.50	60	7.74	Zand, grof	2.50	-1.50	130	4.00
PAN_V7	156+030	157+040	L1	11.45	11.04	Zand, midden	11.04	2.50	60	8.54	Zand, grof	2.50	-1.50	130	4.00
PAN_V8	157+040	157+080	L1	11.05	10.64	Zand, midden	10.64	2.50	60	8.14	Zand, grof	2.50	-1.50	130	4.00
PAN_V9	157+080	162+050	L1	11.93	11.63	Zand, midden	11.63	2.50	60	9.13	Zand, grof	2.50	-1.50	130	4.00
PAN_V10	162+050	168+010	L1	11.02	10.43	Zand, midden	10.43	-6.00	60	16.43	Zand, grof	-6.00	-13.00	130	7.00
PAN_V11	168+010	170+000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN_V12	170+000	172+020	L1	11.10	9.33	Zand, midden	9.33	-6.00	60	15.33	Zand, grof	-6.00	-13.00	130	7.00
PAN_V13	172+020	172+080	L1	10.88	9.99	Zand, midden	9.99	-6.00	60	15.99	Zand, grof	-6.00	-13.00	130	7.00
PAN_V14	172+080	174+060	L1	10.67	8.89	Zand, midden	8.89	-6.00	60	14.89	Zand, grof	-6.00	-13.00	130	7.00
PAN_V1	135+030	138+000	L2	11.82	10.34	Zand, midden	10.34	6.00	60	4.34					
PAN_V2	138+000	141+010	L2	11.75	10.50	Zand, midden	10.50	6.00	60	4.50					
PAN_V10	162+050	168+010	L2	11.02	10.43	Zand, midden	10.43	-6.00	60	16.43	Zand, grof	-6.00	-13.00	130	7.00
PAN_V11	168+010	170+000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN_V12	170+000	172+020	L2	11.10	9.33	Zand, midden	9.33	-6.00	60	15.33	Zand, grof	-6.00	-13.00	130	7.00
PAN_V13	172+020	172+080	L2	10.88	9.99	Zand, midden	9.99	-6.00	60	15.99	Zand, grof	-6.00	-13.00	130	7.00
PAN_V14	172+080	174+060	L2	10.67	8.89	Zand, midden	8.89	-6.00	60	14.89	Zand, grof	-6.00	-13.00	130	7.00

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Lokaal scenario	Hoogte maaiveld	Hoogte onderkant deklaag	Grondsoort zandlaag 3	Bovenkant zandlaag 3	Onderkant zandlaag 3	Doorlatendheid zandlaag 3	Dikte zandlaag 3	Grondsoort zandlaag 4	Bovenkant zandlaag 4	Onderkant zandlaag 4	Doorlatendheid zandlaag 4	Dikte zandlaag 4
				[m+NAP]	[m+NAP]				k ₃ [m/d]	d ₃ [m]				k ₄ [m/d]	d ₄ [m]
GRA_V1	57+000	63+050	L1	14.09	12.90	Zand, midden	6.00	2.50	40	3.50	Grind	2.50	0.00	1500	2.50
GRA_V2	63+050	73+050	L1	13.39	12.51	Zand, fijn	5.00	0.00	20	5.00	Zand, fijn	0.00	-11.50	20	11.50
GRA_V3	73+050	77+000	L1	13.15	12.05	Grind	5.00	2.50	1500	2.50	Zand, grof	2.50	0.00	120	2.50
GRA_V4	77+000	81+000	L1	13.00	12.48	Zand, fijn	4.50	2.50	20	2.00	Zand, grof	2.50	-1.00	120	3.50
GRA_V5	81+000	86+080	L1	13.00	12.12	Grind	1.00	-1.00	1500	2.00	Zand, midden	-1.00	-12.50	40	11.50
GRA_V6	86+080	88+080	L1	12.72	11.42	Grind	1.00	-1.00	1500	2.00	Zand, midden	-1.00	-12.50	40	11.50
GRA_V7	88+080	89+050	L1	12.18	10.82	Grind	1.00	-1.00	1500	2.00	Zand, midden	-1.00	-11.50	40	10.50
GRA_V8	89+050	91+065	L1	12.55	10.49	Grind	1.00	-1.00	1500	2.00	Zand, midden	-1.00	-11.50	40	10.50
GRA_V9	91+065	96+020	L1	12.39	10.33	Grind	1.00	-1.00	1500	2.00	Zand, midden	-1.00	-11.50	40	10.50
GRA_V10	96+020	105+040	L1	12.30	11.84	Grind	1.00	-1.00	1500	2.00	Zand, midden	-1.00	-11.50	40	10.50
GRA_V11	105+040	107+000	L1	12.30	12.12	Zand, midden	-1.00	-12.50	40	11.50					
PAN_V1	135+030	138+000	L1	11.82	10.34	Grind	1.00	-1.50	1500	2.50	Zand, midden	-1.50	-6.00	60	4.50
PAN_V2	138+000	141+010	L1	11.75	10.50	Grind	1.00	-1.50	1500	2.50	Zand, midden	-1.50	-6.00	60	4.50
PAN_V3	141+010	143+060	L1	12.00	11.32	Zand, midden	-1.50	-6.00	60	4.50					
PAN_V4	143+060	146+000	L1	11.27	10.68	Zand, midden	-1.50	-6.00	60	4.50					
PAN_V5	146+000	148+030	L1	10.67	10.20	Zand, midden	-1.50	-6.00	60	4.50					
PAN_V6	148+030	156+030	L1	11.22	10.24	Zand, midden	-1.50	-6.00	60	4.50					
PAN_V7	156+030	157+040	L1	11.45	11.04	Zand, midden	-1.50	-6.00	60	4.50					
PAN_V8	157+040	157+080	L1	11.05	10.64	Zand, midden	-1.50	-6.00	60	4.50					
PAN_V9	157+080	162+050	L1	11.93	11.63	Zand, midden	-1.50	-6.00	60	4.50					
PAN_V10	162+050	168+010	L1	11.02	10.43										
PAN_V11	168+010	170+000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN_V12	170+000	172+020	L1	11.10	9.33										
PAN_V13	172+020	172+080	L1	10.88	9.99										
PAN_V14	172+080	174+060	L1	10.67	8.89										

PAN_V1	135+030	138+000	L2	11.82	10.34										
PAN_V2	138+000	141+010	L2	11.75	10.50										
PAN_V10	162+050	168+010	L2	11.02	10.43	Zand, midden	-13.00	-23.00	60	10.00					
PAN_V11	168+010	170+000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN_V12	170+000	172+020	L2	11.10	9.33	Zand, midden	-13.00	-23.00	60	10.00					
PAN_V13	172+020	172+080	L2	10.88	9.99	Zand, midden	-13.00	-23.00	60	10.00					
PAN_V14	172+080	174+060	L2	10.67	8.89	Zand, midden	-13.00	-23.00	60	10.00					

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Lokaal scenario	Hoogte maaiveld	Hoogte onderkant deklaag	Grondsoort zandlaag 5	Bovenkant zandlaag 5	Onderkant zandlaag 5	Doorlatendheid zandlaag 5	Dikte zandlaag 5	Dikte zandpakket	Effectieve doorlatendheid zandpakket
				[m+NAP]	[m+NAP]				k_5 [m/d]	d_5 [m]	D [m]	k_{eff} [m]
GRA_V1	57+000	63+050	L1	14.09	12.90	Zand, fijn	0.00	-11.50	20	11.50	24.40	190
GRA_V2	63+050	73+050	L1	13.39	12.51						24.01	33
GRA_V3	73+050	77+000	L1	13.15	12.05	Zand, midden	0.00	-12.50	40	12.50	24.55	210
GRA_V4	77+000	81+000	L1	13.00	12.48	Zand, midden	-1.00	-12.50	40	11.50	24.98	64
GRA_V5	81+000	86+080	L1	13.00	12.12	Zand, midden	-12.50	-12.50	40	0.00	24.62	153
GRA_V6	86+080	88+080	L1	12.72	11.42	Zand, midden	-12.50	-12.50	40	0.00	23.92	157
GRA_V7	88+080	89+050	L1	12.18	10.82						22.32	198
GRA_V8	89+050	91+065	L1	12.55	10.49						21.99	200
GRA_V9	91+065	96+020	L1	12.39	10.33						21.83	201
GRA_V10	96+020	105+040	L1	12.30	11.84						23.34	191
GRA_V11	105+040	107+000	L1	12.30	12.12						24.62	71
PAN_V1	135+030	138+000	L1	11.82	10.34	Zand, midden	-6.00	-6.00	60	0.00	16.34	60
PAN_V2	138+000	141+010	L1	11.75	10.50	Zand, midden	-6.00	-6.00	60	0.00	16.50	60
PAN_V3	141+010	143+060	L1	12.00	11.32						17.32	76
PAN_V4	143+060	146+000	L1	11.27	10.68						16.68	77
PAN_V5	146+000	148+030	L1	10.67	10.20						16.20	77
PAN_V6	148+030	156+030	L1	11.22	10.24						16.24	77
PAN_V7	156+030	157+040	L1	11.45	11.04						17.04	76
PAN_V8	157+040	157+080	L1	11.05	10.64						16.64	77
PAN_V9	157+080	162+050	L1	11.93	11.63						17.63	76
PAN_V10	162+050	168+010	L1	11.02	10.43						23.43	81
PAN_V11	168+010	170+000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN_V12	170+000	172+020	L1	11.10	9.33						22.33	82
PAN_V13	172+020	172+080	L1	10.88	9.99						22.99	81
PAN_V14	172+080	174+060	L1	10.67	8.89						21.89	82

PAN_V1	135+030	138+000	L2	11.82	10.34						4.34	60
PAN_V2	138+000	141+010	L2	11.75	10.50						4.50	60
PAN_V10	162+050	168+010	L2	11.02	10.43						33.43	75
PAN_V11	168+010	170+000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN_V12	170+000	172+020	L2	11.10	9.33						32.33	75
PAN_V13	172+020	172+080	L2	10.88	9.99						32.99	75
PAN_V14	172+080	174+060	L2	10.67	8.89						31.89	75

Bijlage 6 Resultaten analytische berekeningen

Stap 1: Representatief profiel

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Profiel	Uittreep punt in sloot	Breedte slootbodem	Hoogte slootbodem	Helling talud sloot	Niveau buiten-waterstand	Hoogte maaierveld	Freatisch niveau bij uitredepunt	Hoogte onderkant deklaag	Hoogte onderkant zandpakket	Karakteristieke korrel diameter	Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag	Veiligheids-factor piping	Lengte kwelweg	Lengte opbarstkanaal	Dikte zandpakket	Intrinsieke doorlatendheid zandlaag	Aanwezige verval incl. bijdrage weerstand opbarstkanaal	Kritiek verval incl. veiligheid	
				[J/N]	b [m]	h_{sloot} [m+NAP]	[1:n]	h [m+NAP]	[m+NAP]	h_{nat} [m+NAP]	[m+NAP]	[m+NAP]	D_{70} [m]	k [m/s]	Y_{90} [-]	L [m]	d [m]	D [m]	k [m ²]	$\Delta H-0.3d$ [m]	$\Delta H_{\text{v,5}}$ [m]	
GRA V1	57+000	63+050	Repr.	N				17,10	14,55	14,55	10,60	-9,40	3,33E-04	1,15E-03	1,2	21,9	3,95	20,0	1,56E-10	1,36	1,36	
GRA V2	63+050	73+050	Repr.	N				17,10	14,00	14,00	10,60	-9,40	3,33E-04	1,15E-03	1,2	35,4	3,40	20,0	1,56E-10	2,08	2,08	
GRA V3	73+050	77+000	Repr.	N				17,10	13,72	13,72	10,38	-8,63	3,43E-04	8,65E-04	1,2	35,9	3,34	19,0	1,17E-10	2,38	2,38	
GRA V4	77+000	81+000	Repr.	N				17,08	12,92	12,92	10,30	-7,70	3,53E-04	5,79E-04	1,2	44,0	2,62	18,0	7,85E-11	3,37	3,37	
GRA V5	81+000	86+080	Repr.	N				17,00	12,55	12,55	10,30	-7,70	3,53E-04	5,79E-04	1,2	49,6	2,25	18,0	7,85E-11	3,77	3,77	
GRA V6	86+080	88+080	Repr.	N				17,00	12,99	12,99	10,80	-7,20	3,53E-04	5,79E-04	1,2	43,8	2,19	18,0	7,85E-11	3,36	3,36	
GRA V7	88+080	89+050	Repr.	N				17,00	12,54	12,54	10,80	-7,20	3,53E-04	5,79E-04	1,2	51,9	1,74	18,0	7,85E-11	3,94	3,94	
GRA V8	89+050	91+065	Repr.	N				17,00	14,29	14,29	8,40	-9,60	3,53E-04	5,79E-04	1,2	10,0	5,89	18,0	7,85E-11	0,94	0,94	
GRA V9	91+065	96+020	Repr.	N				17,00	12,41	12,41	8,40	-9,60	3,53E-04	5,79E-04	1,2	44,3	4,01	18,0	7,85E-11	3,39	3,39	
GRA V10	96+020	105+040	Repr.	N				17,00	12,75	12,75	8,40	-9,60	3,53E-04	5,79E-04	1,2	38,1	4,35	18,0	7,85E-11	2,95	2,95	
GRA V11	105+040	107+000	Repr.	N				17,00	12,22	12,22	6,70	-11,30	3,53E-04	5,79E-04	1,2	40,6	5,52	18,0	7,85E-11	3,12	3,12	
PAN V1	135+030	138+000	Repr.	N				16,07	11,87	11,87	8,00	-10,00	3,42E-04	5,79E-04	1,2	40,6	3,87	18,0	7,85E-11	3,04	3,04	
PAN V2	138+000	141+010	Repr.	N				15,95	11,76	11,76	8,85	-9,15	3,42E-04	5,79E-04	1,2	44,6	2,91	18,0	7,85E-11	3,32	3,32	
PAN V3	141+010	143+060	Repr.	N				15,90	12,52	12,52	9,70	-8,30	3,42E-04	5,79E-04	1,2	33,4	2,82	18,0	7,85E-11	2,54	2,54	
PAN V4	143+060	146+000	Repr.	N				15,83	11,25	11,25	9,00	-11,00	2,91E-04	5,79E-04	1,2	63,5	2,25	20,0	7,85E-11	3,91	3,91	
PAN V5	146+000	148+030	Repr.	N				15,80	10,88	10,88	9,00	-11,00	2,91E-04	5,79E-04	1,2	71,2	1,88	20,0	7,85E-11	4,36	4,36	
PAN V6	148+030	156+030	Repr.	N				15,65	11,26	11,26	9,80	-10,20	2,91E-04	5,79E-04	1,2	64,2	1,46	20,0	7,85E-11	3,95	3,95	
PAN V7	156+030	157+040	Repr.	N				15,60	11,39	11,39	10,60	-9,40	2,91E-04	5,79E-04	1,2	64,6	0,79	20,0	7,85E-11	3,97	3,97	
PAN V8	157+040	157+080	Repr.	N/A				N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN V9	157+080	162+050	Repr.	N				15,50	11,93	11,93	10,60	-9,40	2,91E-04	5,79E-04	1,2	51,0	1,33	20,0	7,85E-11	3,18	3,18	
PAN V10	162+050	168+010	Repr.	N				15,45	11,75	11,75	8,47	-14,87	2,43E-04	5,79E-04	1,2	53,3	3,29	23,3	7,85E-11	2,71	2,71	
PAN V11	168+010	170+000	N/A	N/A				N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN V12	170+000	172+020	Repr.	N				15,33	12,24	12,24	7,40	-17,60	2,19E-04	5,79E-04	1,2	34,4	4,84	25,0	7,85E-11	1,64	1,64	
PAN V13	172+020	172+080	Repr.	N/A				N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN V14	172+080	174+060	Repr.	N				15,30	13,70	13,70	7,40	-17,60	2,19E-04	5,79E-04	1,2	0,0	6,30	25,0	7,85E-11	0,00	0,00	

Toets

Vak ID	Lengte kwelweg benodigd L [m]	Representatief profiel				Representatief profiel			
		Aanwezige kwelweglengte derde toetsronde [m]	Aanwezige kwelweglengte minimaal [m]	Aanwezige kwelweglengte neutraal [m]	Aanwezige kwelweglengte maximaal [m]	Kwelweglengte tekort derde toetsronde [m]	Kwelweglengte tekort minimaal [m]	Kwelweglengte tekort neutraal [m]	Kwelweglengte tekort maximaal [m]
GRA V1	21,9	60	90	157	184	-38,3	-68,0	-134,7	-162,6
GRA V2	35,4	60	85	164	165	-24,8	-49,6	-128,2	-129,9
GRA V3	35,9	58	71	167	236	-21,8	-35,5	-131,5	-200,0
GRA V4	44,0	57	58	157	179	-12,8	-13,6	-113,3	-135,1
GRA V5	49,6	70	64	192	199	-20,5	-14,5	-142,1	-149,4
GRA V6	43,8	82	85	235	276	-38,4	-40,9	-190,9	-232,5
GRA V7	51,9	83	75	166	329	-31,5	-23,4	-113,6	-277,1
GRA V8	10,0	108	68	146	352	-97,9	-57,6	-135,9	-342,1
GRA V9	44,3	114	75	172	380	-70,1	-30,5	-128,0	-335,3
GRA V10	38,1	114	77	192	605	-76,2	-38,6	-153,6	-566,8
GRA V11	40,6	114	72	185	837	-73,7	-31,7	-143,9	-795,9
PAN V1	40,6	59	64	164	368	-18,7	-23,8	-123,5	-327,3
PAN V2	44,6	69	68	165	353	-24,3	-23,6	-120,0	-308,2
PAN V3	33,4	79	58	131	325	-45,6	-24,1	-97,7	-291,5
PAN V4	63,5	77	66	142	323	-13,0	-2,1	-78,7	-259,7
PAN V5	71,2	77	80	213	354	-5,3	-8,3	-141,3	-282,9
PAN V6	64,2	75	64	197	360	-10,8	0,1	-132,9	-295,9
PAN V7	64,6	73	58	179	386	-8,5	6,8	-114,1	-321,8
PAN V8	N/A	N/A	79	212	402	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN V9	51,0	73	63	210	381	-22,1	-12,1	-158,7	-330,1
PAN V10	53,3	72	73	196	397	-19,1	-19,6	-142,6	-343,9
PAN V11	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN V12	34,4	84	85	218	670	-49,2	-50,6	-183,5	-635,4
PAN V13	N/A	N/A	79	228	758	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN V14	0,0	84	75	225	840	-83,5	-75,4	-225,4	-639,7

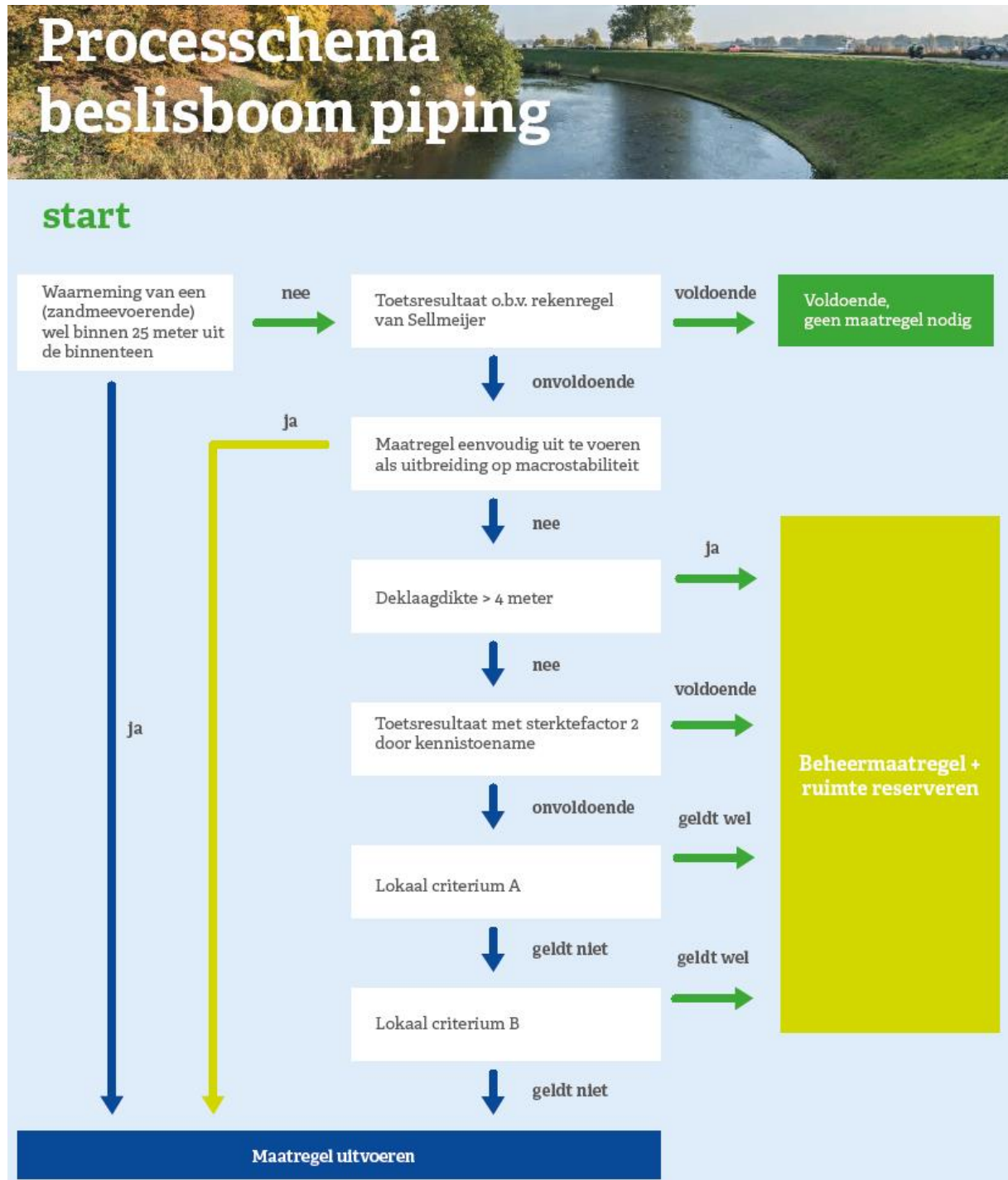
Stap 2: Maatgevend profiel

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Profiel	Uittreep punt in sloot	Breedte slootbodem	Hoogte slootbodem	Helling talud sloot	Niveau buiten-waterstand	Hoogte maaiveld	Freatisch niveau bij uitredepunt	Hoogte onderkant deklaag	Hoogte onderkant zandpakket	Karakteristieke korrel diameter	Specifieke doorlatendheid pipingevoelige zandlaag	Veiligheids-factor piping	Schem.factor piping	Lengte kwelweg	Lengte opbarstkanaal	Dikte zandpakket	Aanwezige verval incl. bijdrage weerstand opbarstkanaal	Kritiek verval incl. veiligheid
				[J/N]	b [m]	h _{sloot} [m+NAP]	[1:n]	h [m+NAP]	[m+NAP]	h _{nat} [m+NAP]	[m+NAP]	[m+NAP]	D ₇₀ [m]	k [m/s]	Y ₉₀ [-]	Y _{50p} [-]	L [m]	d [m]	D [m]	ΔH-0.3d [m]	ΔH _{7.5} [m]
GRA V1	57+000	63+050	P 48 062+100	N				17,10	13,83	13,83	10,60	-9,40	3,33E-04	1,15E-03	1,33	1,00	70,0	3,23	20,0	2,30	2,30
GRA V2	63+050	73+050	P 48 066+080	N				17,10	15,92	15,92	10,60	-9,40	3,33E-04	1,15E-03	1,33	1,00	0,0	5,32	20,0	0,00	0,00
GRA V3	73+050	77+000	P 48 076+074	N				17,10	13,76	13,76	10,30	-7,70	3,53E-04	5,79E-04	1,33	1,00	51,2	3,46	18,0	2,30	2,30
GRA V4	77+000	81+000	P 48 077+035	N				17,10	13,76	13,76	10,30	-7,70	3,53E-04	5,79E-04	1,33	1,00	51,2	3,46	18,0	2,30	2,30
GRA V5	81+000	86+080	P 48 083+054	N				17,00	12,32	12,32	10,30	-7,70	3,53E-04	5,79E-04	1,33	1,00	97,5	2,02	18,0	4,07	4,07
GRA V6	86+080	88+080	P 48 087+026	N				17,00	13,27	13,27	10,80	-7,20	3,53E-04	5,79E-04	1,33	1,00	68,9	2,47	18,0	2,99	2,99
GRA V7	88+080	89+050	P 48 089+014	N				17,00	12,54	12,54	10,80	-7,20	3,53E-04	5,79E-04	1,33	1,00	93,9	1,74	18,0	3,94	3,94
GRA V8	89+050	91+065	P 48 090+015	N				17,00	12,40	12,40	8,40	-9,60	3,53E-04	5,79E-04	1,33	1,00	79,7	4,00	18,0	3,40	3,40
GRA V9	91+065	96+020	P 48 093+063	N				17,00	12,38	12,38	8,40	-9,60	3,53E-04	5,79E-04	1,33	1,00	80,3	3,98	18,0	3,43	3,43
GRA V10	96+020	105+040	P 48 096+024	N				17,00	12,10	12,10	8,40	-9,60	3,53E-04	5,79E-04	1,33	1,00	89,9	3,70	18,0	3,79	3,79
GRA V11	105+040	107+000	P 48 106+025	N				17,00	12,17	12,17	8,40	-9,60	3,53E-04	5,79E-04	1,33	1,00	87,5	3,77	18,0	3,70	3,70
PAN V1	135+030	138+000	P 48 137+039	N				16,10	11,82	11,82	8,00	-10,00	3,42E-04	5,79E-04	1,33	1,00	73,7	3,82	18,0	3,13	3,13
PAN V2	138+000	141+010	P 48 140+018	N				15,90	11,93	11,93	9,70	-8,30	3,42E-04	5,79E-04	1,33	1,00	78,2	2,23	18,0	3,30	3,30
PAN V3	141+010	143+060	P 48 142+059	N				15,90	13,64	13,64	9,70	-8,30	3,42E-04	5,79E-04	1,33	1,00	21,0	3,94	18,0	1,08	1,08
PAN V4	143+060	146+000	P 48 145+079	N				15,80	11,06	11,06	9,00	-11,00	2,91E-04	5,79E-04	1,33	1,00	110,6	2,06	20,0	4,12	4,12
PAN V5	146+000	148+030	P 48 146+019	N				15,80	11,06	11,06	9,00	-11,00	2,91E-04	5,79E-04	1,33	1,00	110,6	2,06	20,0	4,12	4,12
PAN V6	148+030	156+030	P 48 151+058	N				15,70	11,35	11,35	9,00	-11,00	2,91E-04	5,79E-04	1,33	1,00	96,4	2,35	20,0	3,65	3,65
PAN V7	156+030	157+040	P 48 156+038	N				15,60	11,42	11,42	10,60	-9,40	2,91E-04	5,79E-04	1,33	1,00	105,0	0,82	20,0	3,93	3,93
PAN V8	157+040	157+080	P 48 157+060	N				15,50	11,56	11,56	10,60	-9,40	2,91E-04	5,79E-04	1,33	1,00	96,7	0,96	20,0	3,65	3,65
PAN V9	157+080	162+050	P 48 161+039	N				15,50	11,99	11,99	10,60	-9,40	2,91E-04	5,79E-04	1,33	1,00	80,2	1,39	20,0	3,09	3,09
PAN V10	162+050	168+010	P 48 167+078	N				15,40	11,01	11,01	7,40	-17,60	2,19E-04	5,79E-04	1,33	1,00	103,9	3,61	25,0	3,31	3,31
PAN V11	168+010	170+000	N/A	N/A				N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN V12	170+000	172+020	P 48 172+018	N				15,30	12,04	12,04	7,40	-17,60	2,19E-04	5,79E-04	1,33	1,00	54,1	4,64	25,0	1,87	1,87
PAN V13	172+020	172+080	P 48 172+038	N				15,30	12,04	12,04	7,40	-17,60	2,19E-04	5,79E-04	1,33	1,00	54,1	4,64	25,0	1,87	1,87
PAN V14	172+080	174+060	P 48 173+057	N				15,30	12,51	12,51	7,40	-17,60	2,19E-04	5,79E-04	1,33	1,00	33,6	5,11	25,0	1,26	1,26

Toets

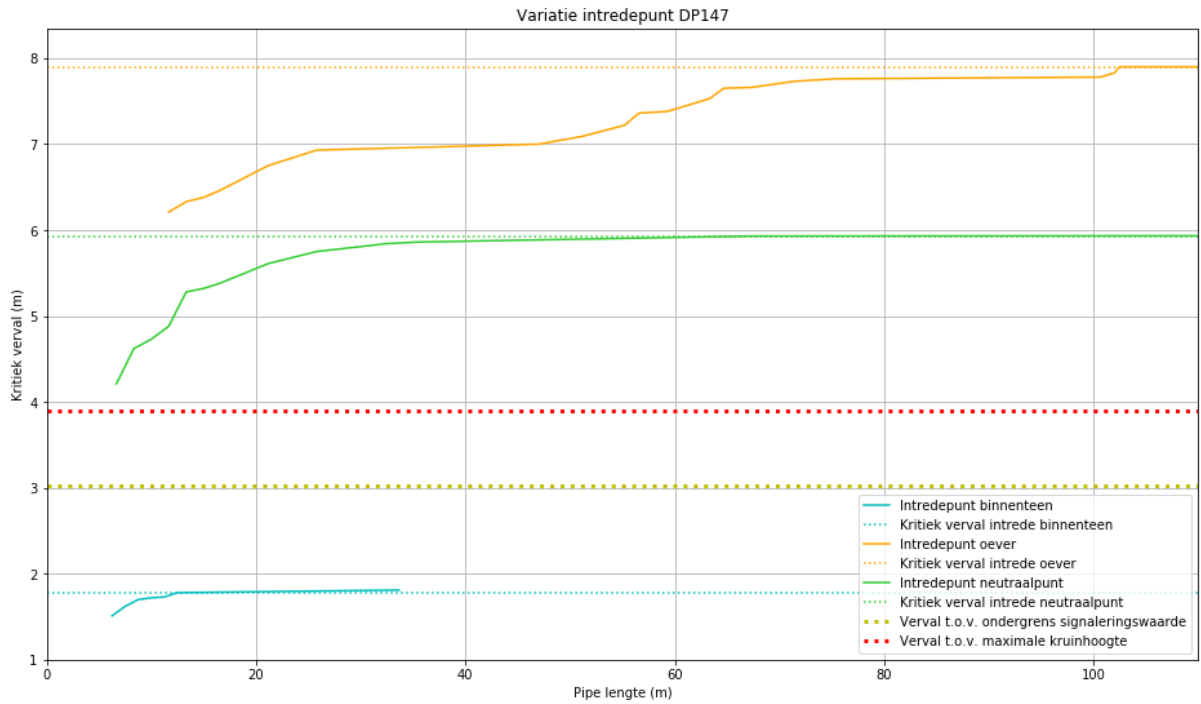
Vak ID	Lengte kwelweg benodigd L [m]	Maatgevend profiel				Maatgevend profiel			
		Aanwezige kwelweglengte derde toetsronde [m]	Aanwezige kwelweglengte minimaal [m]	Aanwezige kwelweglengte neutraal [m]	Aanwezige kwelweglengte maximaal [m]	Kwelweglengte tekort derde toetsronde [m]	Kwelweglengte tekort minimaal [m]	Kwelweglengte tekort neutraal [m]	Kwelweglengte tekort maximaal [m]
GRA V1	70,0	60	67	84	84	9,8	3,0	-14,0	-14,0
GRA V2	0,0	60	66	120	120	-60,3	-66,0	-119,5	-119,5
GRA V3	51,2	57	56	100	222	-5,6	-4,3	-48,3	-170,8
GRA V4	51,2	57	56	113	208	-5,6	-4,8	-61,3	-156,3
GRA V5	97,5	77	56	190	190	20,5	41,5	-92,0	-92,0
GRA V6	68,9	81	76	226	248	-12,2	-7,1	-157,1	-179,1
GRA V7	93,9	83	64	108	317	10,5	30,4	-14,1	-223,1
GRA V8	79,7	102	56	91	345	-21,9	23,7	-11,3	-265,3
GRA V9	80,3	114	62	169	349	-34,0	18,3	-88,2	-268,2
GRA V10	89,9	114	77	224	425	-24,3	13,4	-133,6	-334,6
GRA V11	87,5	114	59	142	813	-26,8	28,5	-54,5	-725,0
PAN V1	73,7	59	57	159	357	14,4	17,2	-84,8	-282,8
PAN V2	78,2	78	58	147	341	0,2	20,2	-68,3	-263,2
PAN V3	21,0	79	49	106	312	-57,9	-28,0	-84,5	-290,7
PAN V4	110,6	77	66	167	327	34,1	45,1	-56,4	-216,6
PAN V5	110,6	77	61	186	325	34,1	50,1	-74,9	-214,0
PAN V6	96,4	77	68	198	318	19,9	28,9	-101,1	-221,5
PAN V7	105,0	73	57	176	380	31,9	48,5	-70,5	-274,5
PAN V8	96,7	73	79	212	402	23,5	18,2	-115,3	-305,4
PAN V9	80,2	73	56	199	422	7,1	24,2	-118,3	-341,5
PAN V10	103,9	84	57	113	422	20,3	46,9	-9,1	-317,6
PAN V11	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PAN V12	54,1	84	78	228	770	-29,5	-23,9	-173,9	-715,5
PAN V13	54,1	84	86	235	783	-29,5	-31,9	-180,4	-729,0
PAN V14	33,6	83	65	215	818	-49,8	-30,9	-180,9	-784,2

Bijlage 7 Processchema Beslisboom Piping

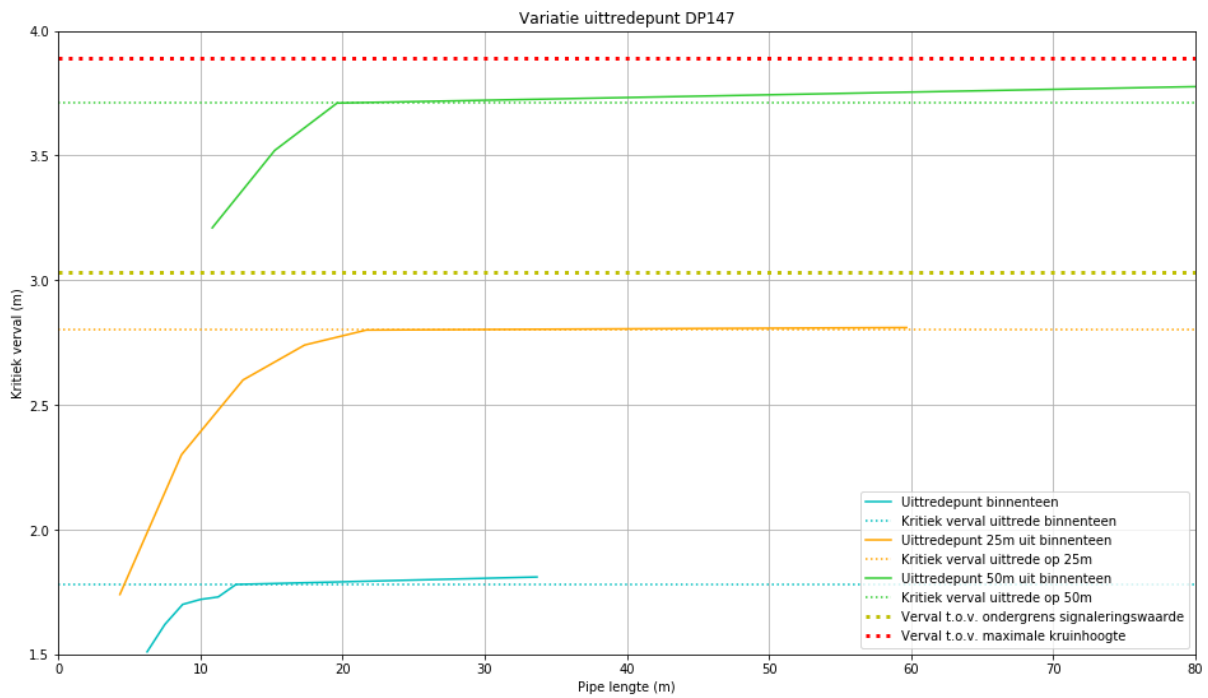


Figuur 113: Beslisboom piping [1]

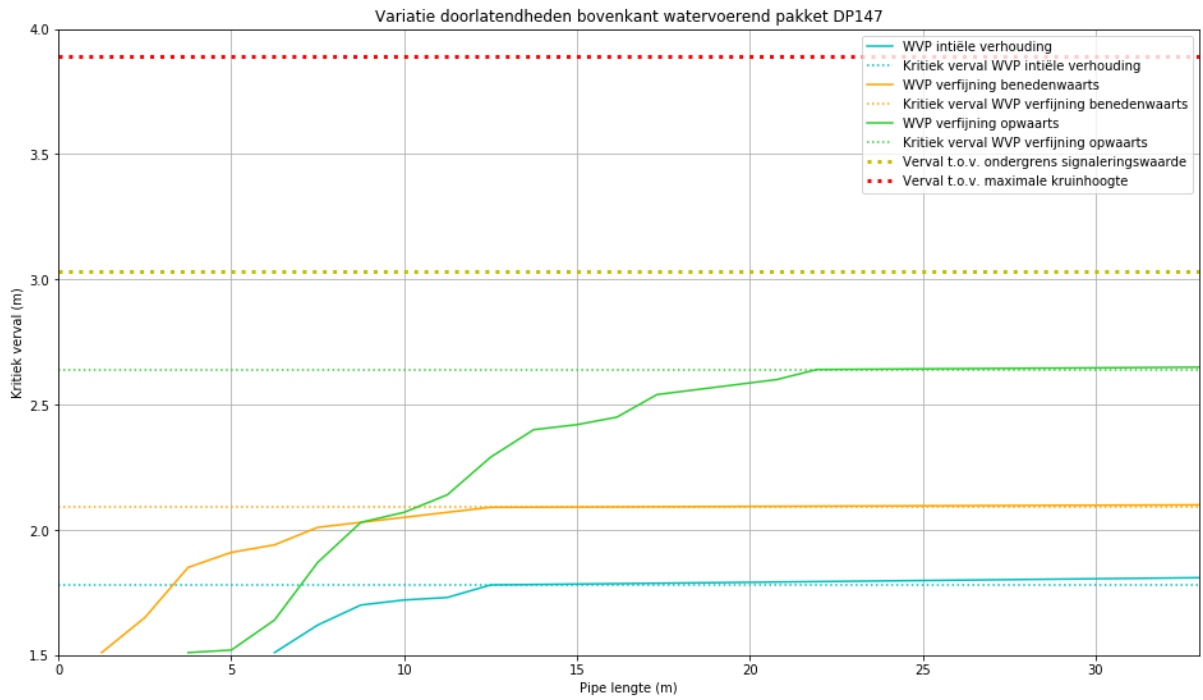
Bijlage 8 Resultaten D-Geo Flow berekeningen



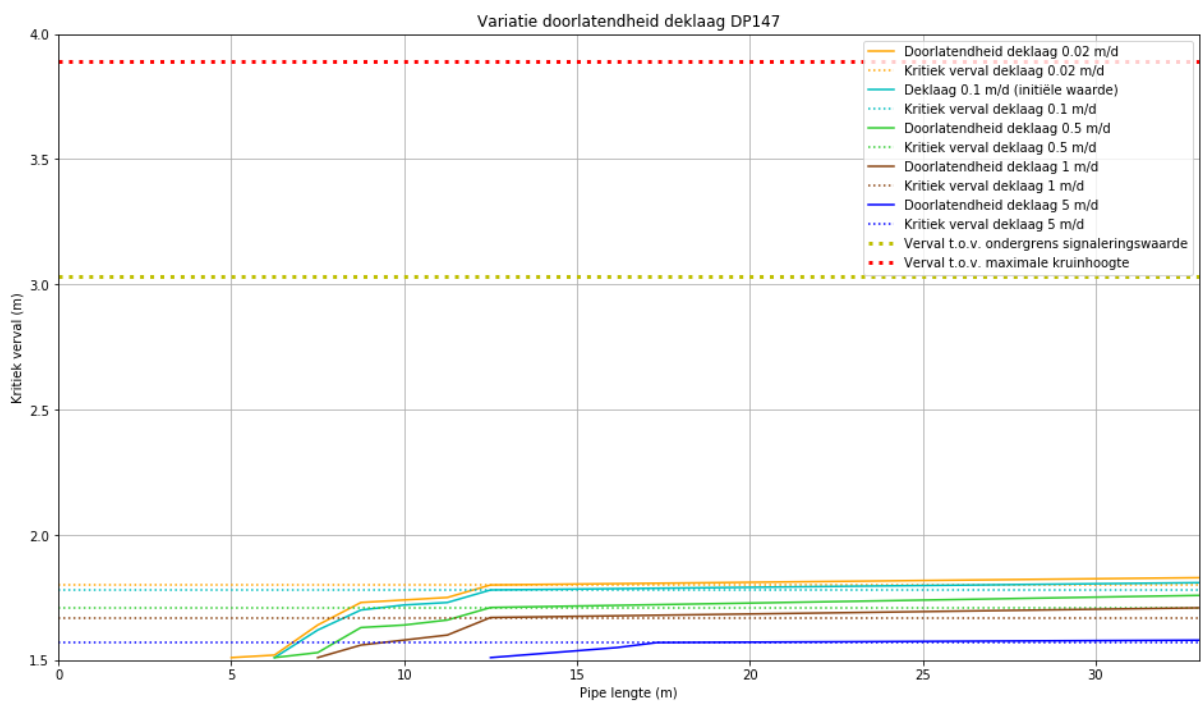
Figuur 114: Grafiek DP147 kritiek verval variatie intredepunt



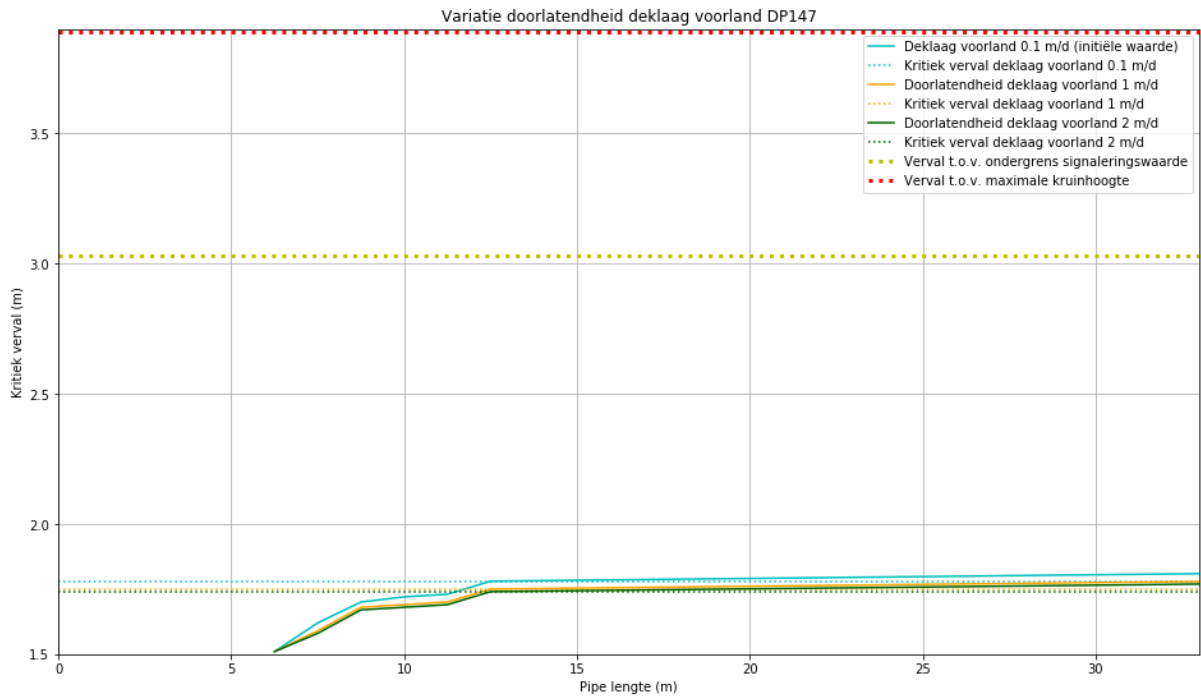
Figuur 115: Grafiek DP147 kritiek verval variatie uittredepunt



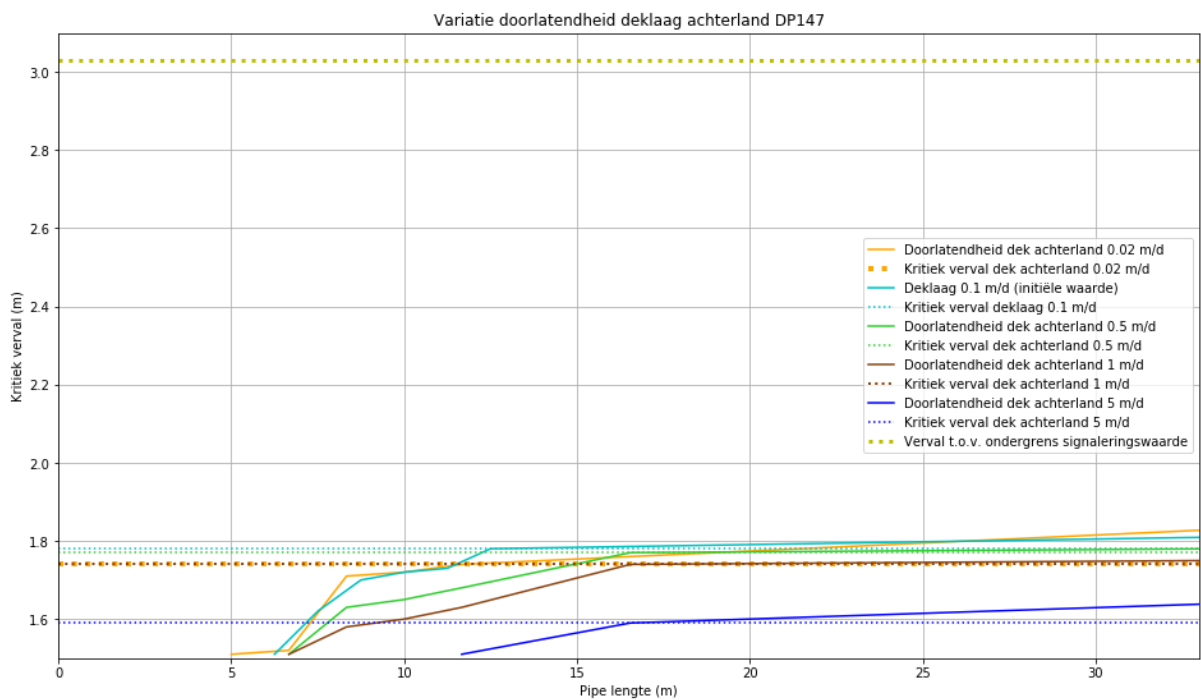
Figuur 116: Grafiek DP147 kritiek verval variatie doorlatendheden top watervoerend pakket



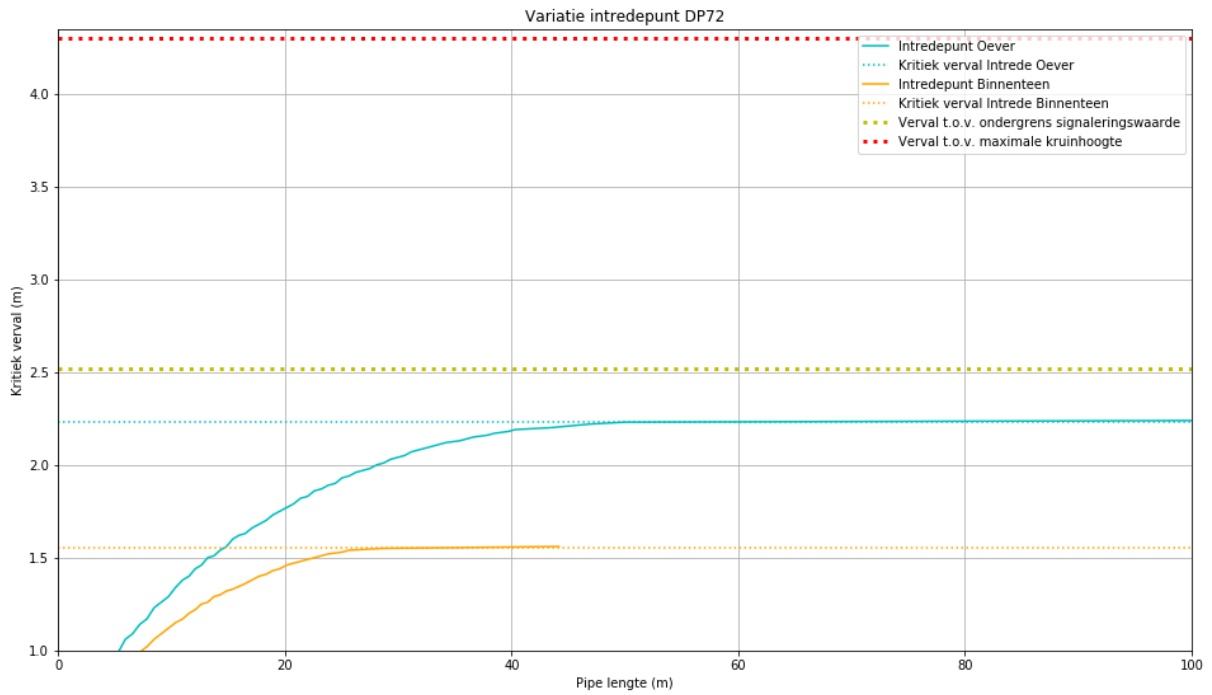
Figuur 117: Grafiek DP147 kritiek verval variatie doorlatendheid deklaag voor en achterland



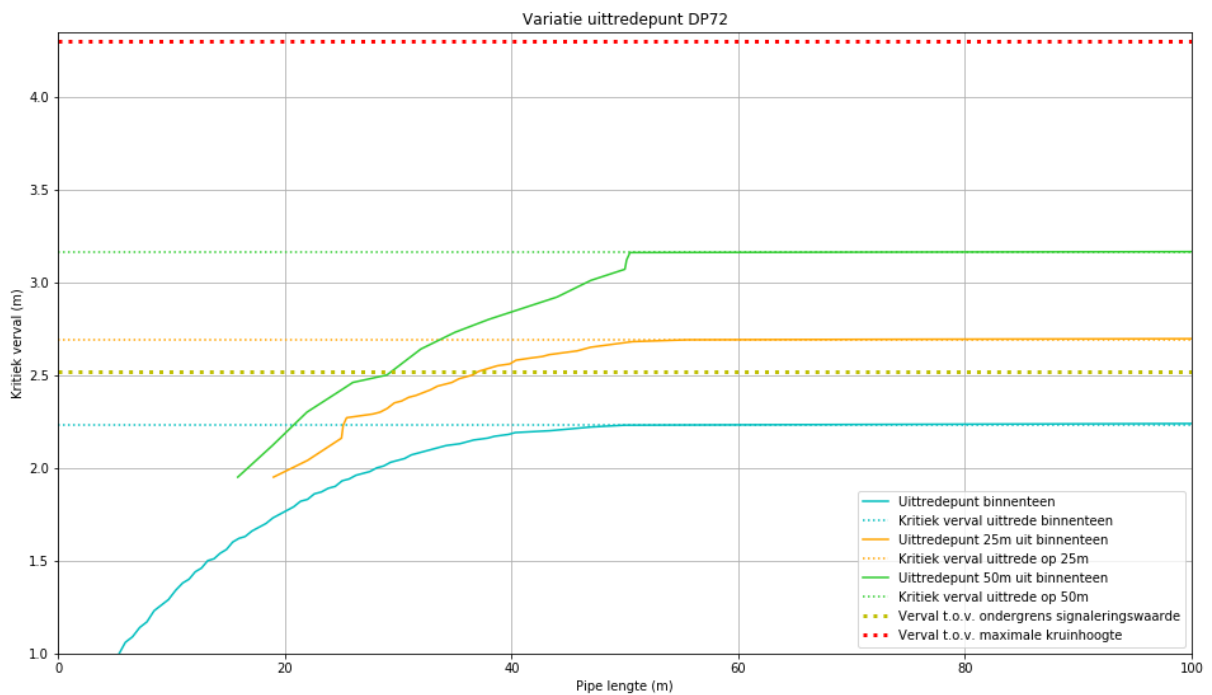
Figuur 118 Grafiek DP147 kritiek verval variatie doorlatendheid deklaag voorland



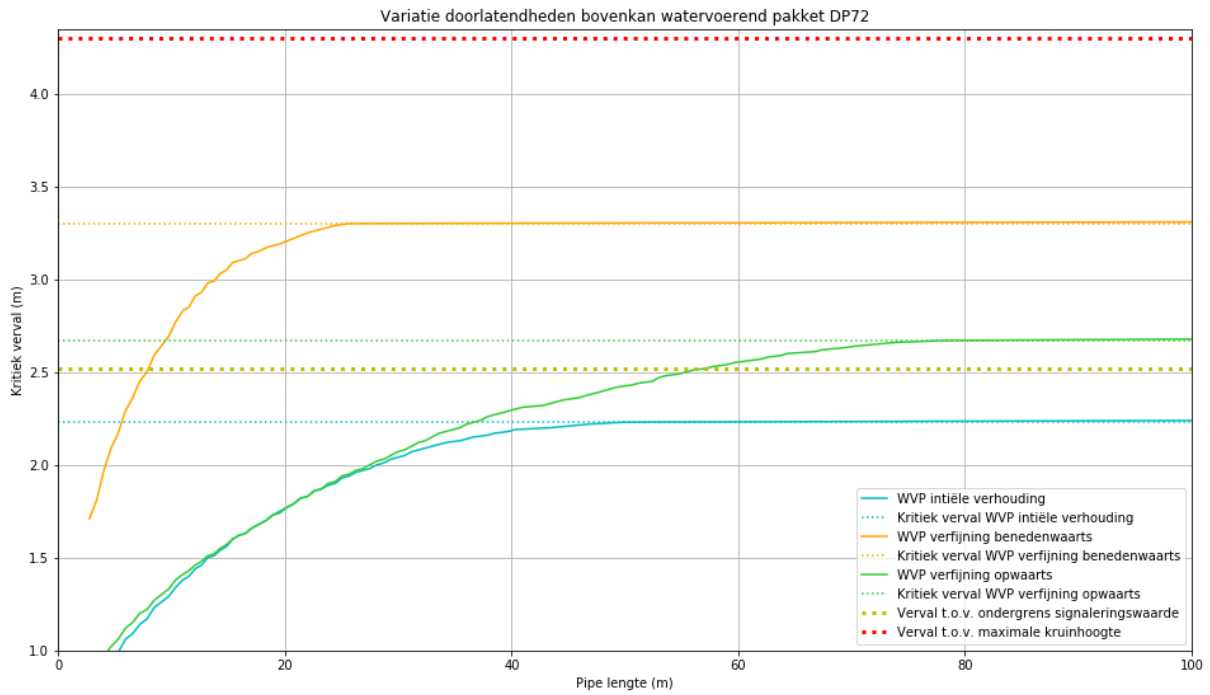
Figuur 119 Grafiek DP147 kritiek verval variatie doorlatendheid deklaag achterland



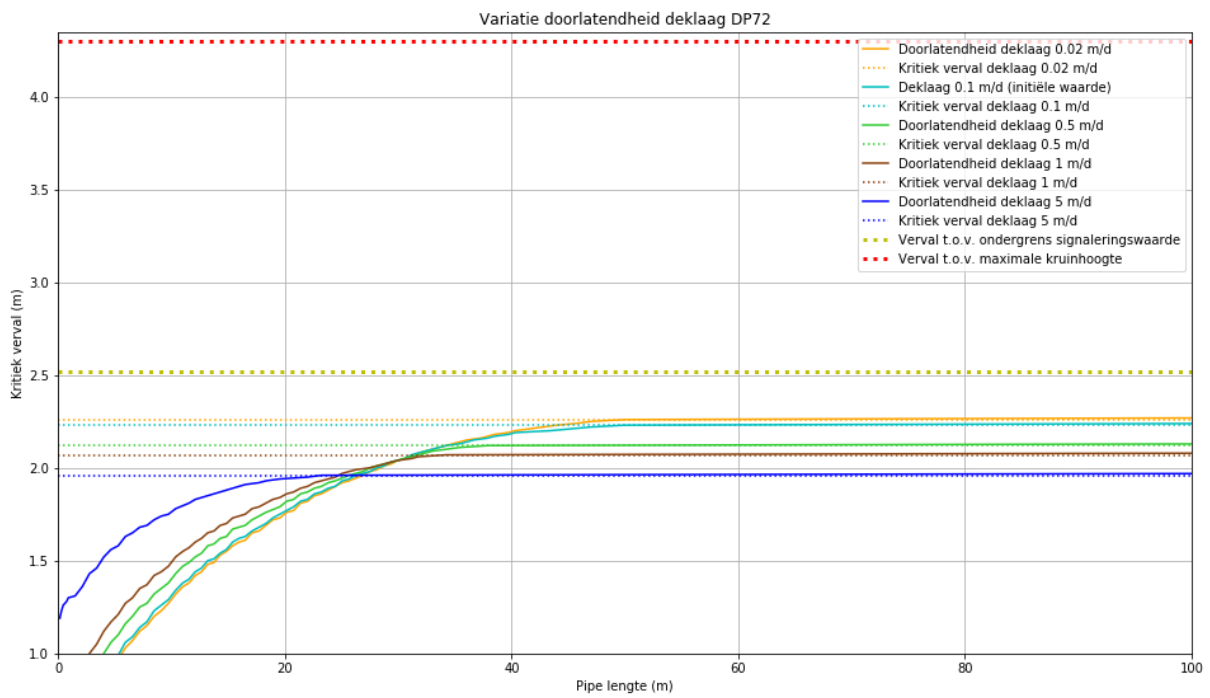
Figuur 120: Grafiek DP72 kritiek verval variatie intredepunt



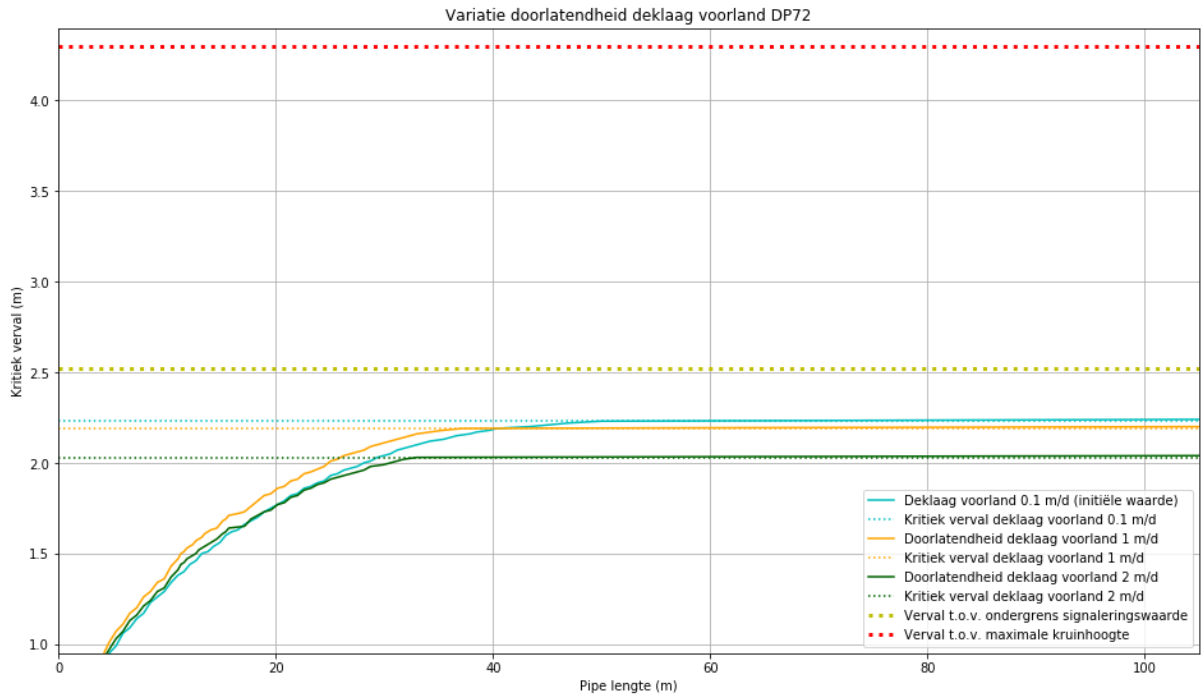
Figuur 121 Grafiek DP72 kritiek verval variatie uittredepunt



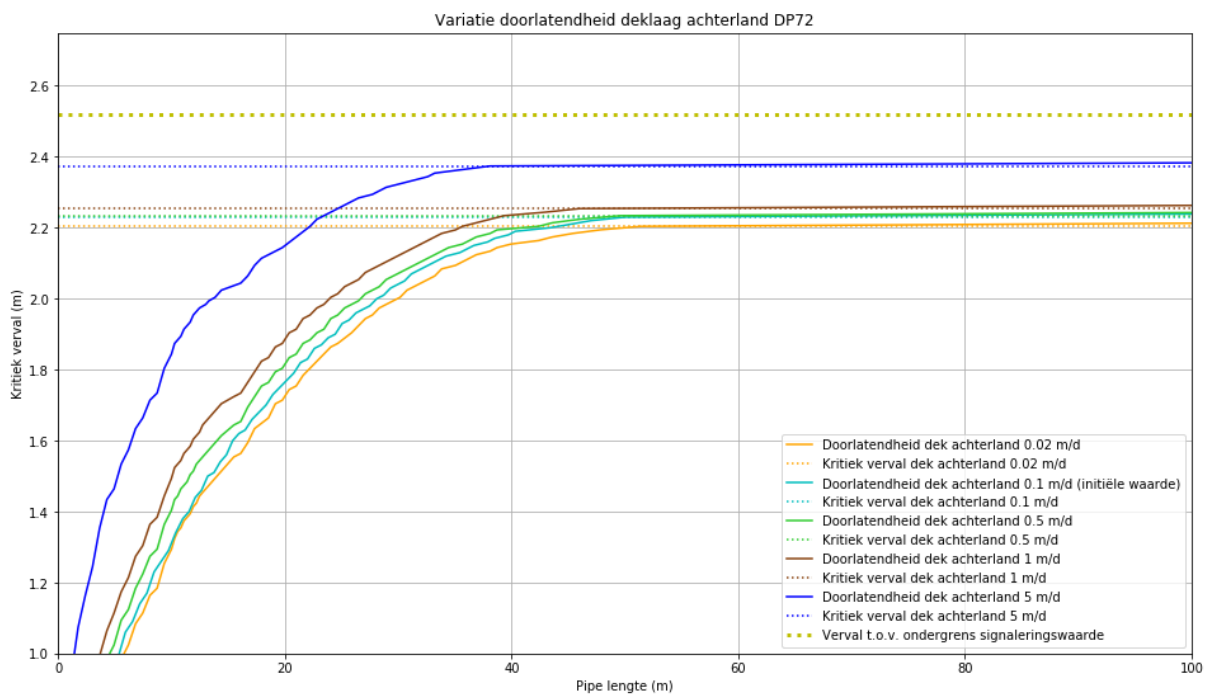
Figuur 122: Grafiek DP72 kritiek verval variatie doorlatendheden top watervoerend pakket



Figuur 123 Grafiek DP72 kritiek verval variatie doorlatendheden deklaag voor- en achterland



Figuur 124 Grafiek DP72 kritiek verval variatie doorlatendheid deklaag voorland



Figuur 125 Grafiek DP72 kritiek verval variatie doorlatendheid deklaag achterland

Bijlage 9 Resultaten analytische berekeningen vergelijking met D-Geo Flow

ID	Profiel	Locatie intredepunt	Locatie uitredepunt	Aanwezige kwelweglengte [m]	Samenstelling watervoerend pakket	Verfijning watervoerend pakket	Anisotropie zandlagen k_H/k_V [-]	Rekenwaarden doorlatendheid zandpakket	Rekenwaarden karakteristieke korrel diameter	Doorlatendheid deklaag voorland [m/d]	Doorlatendheid deklaag achterland [m/d]	Uittreepunt in sloot [J/N]	Niveau buiten- waterstand h [m+NAP]	Hoogte maaiveld [m+NAP]	Freatisch niveau bij uitredepunt h _{exit} [m+NAP]
B_48_72_1	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	17.16	14.50	14.50
B_48_72_2	P_48_072+000	Buitentn	Binnentn	44	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	16.05	14.50	14.50
B_48_72_3	P_48_072+000	Oever	Binnentn + 25 m	133	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	16.56	13.72	13.72
B_48_72_4	P_48_072+000	Oever	Binnentn + 50 m	158	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	16.98	13.72	13.72
B_48_72_5	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Opwaarts	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	17.21	14.50	14.50
B_48_72_6	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Neerwaarts	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	18.58	14.50	14.50
B_48_72_7	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.02	0.02	N	17.16	14.50	14.50
B_48_72_8	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.5	0.5	N	17.16	14.50	14.50
B_48_72_9	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	1	1	N	17.16	14.50	14.50
B_48_72_10	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	5	5	N	17.16	14.50	14.50
B_48_72_10	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.02	N	17.16	14.50	14.50
B_48_72_11	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.5	N	17.16	14.50	14.50
B_48_72_12	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	1	N	17.16	14.50	14.50
B_48_72_13	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	5	N	17.16	14.50	14.50
B_48_72_14	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.1	0.1	N	17.96	14.50	14.50
B_48_72_15	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Enkellaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	17.16	14.50	14.50
B_48_72_16	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Enkellaags	Geen	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.1	0.1	N	17.96	14.50	14.50
B_48_72_17	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Gem. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	17.67	14.50	14.50
B_48_72_18	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	1	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	17.16	14.50	14.50

Effect van anisotropie in rekening gebracht in analytische berekeningen door dikte watervoerend pakket te delen door $(k_H/h_V)^{0.5}$

B_48_72_1	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	17.43	14.50	14.50
B_48_72_2	P_48_072+000	Buitentn	Binnentn	44	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	16.16	14.50	14.50
B_48_72_3	P_48_072+000	Oever	Binnentn + 25 m	133	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	16.90	13.72	13.72
B_48_72_4	P_48_072+000	Oever	Binnentn + 50 m	158	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	17.38	13.72	13.72
B_48_72_5	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Opwaarts	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	17.50	14.50	14.50
B_48_72_6	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Neerwaarts	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	19.05	14.50	14.50
B_48_72_7	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.02	0.02	N	17.43	14.50	14.50
B_48_72_8	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.5	0.5	N	17.43	14.50	14.50
B_48_72_9	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	1	1	N	17.43	14.50	14.50
B_48_72_10	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	5	5	N	17.43	14.50	14.50
B_48_72_10	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.02	N	17.43	14.50	14.50
B_48_72_11	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.5	N	17.43	14.50	14.50
B_48_72_12	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	1	N	17.43	14.50	14.50
B_48_72_13	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	5	N	17.43	14.50	14.50
B_48_72_14	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.1	0.1	N	18.35	14.50	14.50
B_48_72_15	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Enkellaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	17.43	14.50	14.50
B_48_72_16	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Enkellaags	Geen	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.1	0.1	N	18.35	14.50	14.50
B_48_72_17	P_48_072+000	Oever	Binnentn	108	Meerlaags	Geen	3	Gem. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	18.01	14.50	14.50

Intrinsieke doorlatendheid zandlaag	Weerstandsfactor	Schaalfactor	Geometrie-factor	Aanwezig verval	Aanwezig verval incl. bijdrage weerstand opbarstkanaal	Kritiek verval	Kritiek verval incl. veiligheid
κ [m ²]	$F_{\text{resistance}}$ [-]	F_{scale} [-]	F_{geometry} [-]	ΔH [m]	$\Delta H-0.3d$ [m]	ΔH_c [m]	$\Delta H_{c,d}$ [m]
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55
9.62E-10	0.311	0.06	1.08	1.55	0.95	0.95	0.72
9.62E-10	0.311	0.04	1.35	2.84	2.48	2.48	1.86
9.62E-10	0.311	0.04	1.40	3.26	2.89	2.89	2.18
8.88E-10	0.311	0.05	1.28	2.71	2.11	2.11	1.59
1.98E-10	0.311	0.08	1.28	4.08	3.48	3.48	2.62
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55
4.94E-10	0.311	0.07	1.28	3.46	2.86	2.86	2.15
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55
4.94E-10	0.311	0.07	1.28	3.46	2.86	2.86	2.15
4.94E-10	0.311	0.06	1.28	3.17	2.57	2.57	1.93
9.62E-10	0.311	0.05	1.28	2.66	2.06	2.06	1.55

Kritiek verval D-Geo Flow	Kritiek verval excl. veiligheid Sellmeijer 2	Kritiek verval incl. veiligheid Sellmeijer 2	Verval bij ondergrenswaarde	Verskil in kritiek verval ten opzichte van basisberekening D-Geo Flow	Verskil in kritiek verval ten opzichte van basisberekening Sellmeijer 2	Verskil in kritiek verval D-Geo Flow / Sellmeijer 2
ΔH_c [m]	ΔH_c [m]	ΔH_c [m]	ΔH [m]	[m]	[m]	[m]
2.23	2.06	1.55	2.52	0.00	0.00	0.17
1.55	0.95	0.72	2.52	-0.68	-1.10	0.60
2.69	2.48	1.86	3.30	0.46	0.42	0.21
3.16	2.89	2.18	3.30	0.93	0.84	0.27
2.67	2.11	1.59	2.52	0.44	0.06	0.56
3.30	3.48	2.62	2.52	1.07	1.43	-0.18
2.26	2.06	1.55	2.52	0.03	0.00	0.20
2.12	2.06	1.55	2.52	-0.11	0.00	0.06
2.07	2.06	1.55	2.52	-0.16	0.00	0.01
1.96	2.06	1.55	2.52	-0.27	0.00	-0.10
2.20	2.06	1.55	2.52	-0.03	0.00	0.14
2.23	2.06	1.55	2.52	0.00	0.00	0.17
2.25	2.06	1.55	2.52	0.02	0.00	0.19
2.37	2.06	1.55	2.52	0.14	0.00	0.31
3.10	2.86	2.15	2.52	0.87	0.81	0.24
2.17	2.06	1.55	2.52	-0.06	0.00	0.11
2.97	2.86	2.15	2.52	0.74	0.81	0.11
2.79	2.57	1.93	2.52	0.56	0.51	0.22
2.39	2.06	1.55	2.52	0.16	0.00	0.33

9.62E-10	0.311	0.05	1.46	2.93	2.33	2.33	1.75
9.62E-10	0.311	0.06	1.19	1.66	1.06	1.06	0.79
9.62E-10	0.311	0.04	1.53	3.18	2.82	2.82	2.12
9.62E-10	0.311	0.04	1.59	3.66	3.29	3.29	2.48
8.88E-10	0.311	0.05	1.46	3.00	2.40	2.40	1.80
1.98E-10	0.311	0.08	1.46	4.55	3.95	3.95	2.97
9.62E-10	0.311	0.05	1.46	2.93	2.33	2.33	1.75
9.62E-10	0.311	0.05	1.46	2.93	2.33	2.33	1.75
9.62E-10	0.311	0.05	1.46	2.93	2.33	2.33	1.75
9.62E-10	0.311	0.05	1.46	2.93	2.33	2.33	1.75
9.62E-10	0.311	0.05	1.46	2.93	2.33	2.33	1.75
9.62E-10	0.311	0.05	1.46	2.93	2.33	2.33	1.75
9.62E-10	0.311	0.05	1.46	2.93	2.33	2.33	1.75
9.62E-10	0.311	0.05	1.46	2.93	2.33	2.33	1.75
4.94E-10	0.311	0.07	1.46	3.85	3.25	3.25	2.44
9.62E-10	0.311	0.05	1.46	2.93	2.33	2.33	1.75
4.94E-10	0.311	0.07	1.46	3.85	3.25	3.25	2.44
4.94E-10	0.311	0.06	1.46	3.51	2.91	2.91	2.19

2.23	2.33	1.75	2.52	0.00	0.00	-0.10
1.55	1.06	0.79	2.52	-0.68	-1.28	0.49
2.69	2.82	2.12	3.30	0.46	0.48	-0.13
3.16	3.29	2.48	3.30	0.93	0.96	-0.13
2.67	2.40	1.80	2.52	0.44	0.06	0.27
3.30	3.95	2.97	2.52	1.07	1.62	-0.65
2.26	2.33	1.75	2.52	0.03	0.00	-0.07
2.12	2.33	1.75	2.52	-0.11	0.00	-0.21
2.07	2.33	1.75	2.52	-0.16	0.00	-0.26
1.96	2.33	1.75	2.52	-0.27	0.00	-0.37
2.20	2.33	1.75	2.52	-0.03	0.00	-0.13
2.23	2.33	1.75	2.52	0.00	0.00	-0.10
2.25	2.33	1.75	2.52	0.02	0.00	-0.08
2.37	2.33	1.75	2.52	0.14	0.00	0.04
3.10	3.25	2.44	2.52	0.87	0.91	-0.15
2.17	2.33	1.75	2.52	-0.06	0.00	-0.16
2.97	3.25	2.44	2.52	0.74	0.91	-0.28
2.79	2.91	2.19	2.52	0.56	0.58	-0.12

ID	Profiel	Locatie intredepunt	Locatie uitredepunt	Aanwezige kwelweglengte [m]	Samenstelling watervoerend pakket	Verfijning watervoerend pakket	Anisotropie zandlagen k_h/k_v [-]	Rekenwaarden doorlatendheid zandpakket	Rekenwaarden karakteristieke korreldiameter	Doorlatendheid deklaag voorland [m/d]	Doorlatendheid deklaag achterland [m/d]	Uittreepunt in sloot [J/N]	Niveau buiten- waterstand h [m+NAP]	Hoogte maaiveld [m+NAP]	Freatisch niveau bij uitredepunt h _{exit} [m+NAP]
B_48_75_1	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	15.50	12.50	12.50
B_48_75_2	P_48_075+000	Buitentn	Binnentn + 25 m	72	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	14.74	12.50	12.50
B_48_75_3	P_48_075+000	Oever	Binnentn	89	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	15.52	14.10	12.50
B_48_75_4	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Meerlaags	Geen	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.1	0.1	N	16.38	12.50	12.50
B_48_75_5	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Enkellaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	15.50	12.50	12.50
B_48_75_6	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Enkellaags	Geen	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.1	0.1	N	16.38	12.50	12.50
B_48_75_7	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Meerlaags	Geen	3	Gem. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	16.06	12.50	12.50
B_48_75_8	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Meerlaags	Geen	1	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	15.50	12.50	12.50

Effect van anisotropie in rekening gebracht in analytische berekeningen door dikte watervoerend pakket te delen door $(k_h/h_v)^{0.5}$

B_48_75_1	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	15.81	12.50	12.50
B_48_75_2	P_48_075+000	Buitentn	Binnentn + 25 m	72	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	14.93	12.50	12.50
B_48_75_3	P_48_075+000	Oever	Binnentn	89	Meerlaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	15.76	14.10	12.50
B_48_75_4	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Meerlaags	Geen	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.1	0.1	N	16.81	12.50	12.50
B_48_75_5	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Enkellaags	Geen	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	15.81	12.50	12.50
B_48_75_6	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Enkellaags	Geen	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.1	0.1	N	16.81	12.50	12.50
B_48_75_7	P_48_075+000	Oever	Binnentn + 25 m	115	Meerlaags	Geen	3	Gem. waarden	Kar. waarden	0.1	0.1	N	16.44	12.50	12.50

Hoogte onderkant deklaag	Hoogte onderkant zandpakket	Karakteristieke korreldiameter	Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag	Veiligheids-factor piping	Schem.factor piping	Gemiddelde karakteristieke korreldiameter schaalproeven	Versnelling zwaartekracht	Volumiek gewicht water	Kinematische viscositeit water	Coefficient White	Rolweerstandshoek zandkorrels	Volumiek gewicht zandkorrels onder water	Lengte kwelweg	Lengte opbarstkanaal	Dikte zandpakket
[m+NAP]	[m+NAP]	D_{70} [m]	k [m/s]	Y_{pip} [-]	$Y_{b,pip}$ [-]	D_{70m} [m]	g [m/s ²]	γ_w [kN/m ³]	ν_w [m ² /s]	η [-]	θ [rad]	γ'_p [kN/m ³]	L [m]	d [m]	D [m]
10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	25.3
10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	71.7	2.50	25.3
10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	88.6	4.10	25.3
10.00	-15.30	3.32E-04	3.39E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	25.3
10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	25.3
10.00	-15.30	3.32E-04	3.39E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	25.3
10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	25.3
10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	25.3

10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	14.6
10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	71.7	2.50	14.6
10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	88.6	4.10	14.6
10.00	-15.30	3.32E-04	3.39E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	14.6
10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	14.6
10.00	-15.30	3.32E-04	3.39E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	14.6
10.00	-15.30	2.53E-04	6.60E-03	1.33	1.00	2.08E-04	9.81	10.0	1.33E-06	0.25	0.646	16.5	114.5	2.50	14.6

Intrinsieke doorlatendheid zandlaag	Weerstandsfactor	Schaalfactor	Geometrie-factor	Aanwezig verval	Aanwezig verval incl. bijdrage weerstand opbarstkanaal	Kritiek verval	Kritiek verval incl. veiligheid
κ [m ²]	$F_{\text{resistance}}$ [-]	F_{scale} [-]	F_{geometry} [-]	ΔH [m]	$\Delta H-0.3d$ [m]	ΔH_c [m]	$\Delta H_{c,d}$ [m]
8.94E-10	0.311	0.05	1.32	3.00	2.25	2.25	1.69
8.94E-10	0.311	0.06	1.19	2.24	1.49	1.49	1.12
8.94E-10	0.311	0.05	1.24	3.02	1.79	1.79	1.35
4.60E-10	0.311	0.07	1.32	3.88	3.13	3.13	2.36
8.94E-10	0.311	0.05	1.32	3.00	2.25	2.25	1.69
4.60E-10	0.311	0.07	1.32	3.88	3.13	3.13	2.36
4.60E-10	0.311	0.06	1.32	3.56	2.81	2.81	2.11
8.94E-10	0.311	0.05	1.32	3.00	2.25	2.25	1.69

8.94E-10	0.311	0.05	1.49	3.31	2.56	2.56	1.92
8.94E-10	0.311	0.06	1.34	2.43	1.68	1.68	1.26
8.94E-10	0.311	0.05	1.41	3.26	2.03	2.03	1.53
4.60E-10	0.311	0.07	1.49	4.31	3.56	3.56	2.68
8.94E-10	0.311	0.05	1.49	3.31	2.56	2.56	1.92
4.60E-10	0.311	0.07	1.49	4.31	3.56	3.56	2.68
4.60E-10	0.311	0.06	1.49	3.94	3.19	3.19	2.40

Kritiek verval D-Geo Flow	Kritiek verval excl. veiligheid Sellmeijer 2	Kritiek verval incl. veiligheid Sellmeijer 2	Verval bij ondergrenswaarde	Verskil in kritiek verval ten opzichte van basisberekening D-Geo Flow	Verskil in kritiek verval ten opzichte van basisberekening Sellmeijer 2	Verskil in kritiek verval D-Geo Flow / Sellmeijer 2
ΔH_c [m]	ΔH_c [m]	ΔH_c [m]	ΔH [m]	[m]	[m]	[m]
2.18	2.25	1.69	4.52	0.00	0.00	-0.07
1.94	1.49	1.12	4.52	-0.24	-0.76	0.45
1.42	1.79	1.35	4.52	-0.76	-0.46	-0.37
3.03	3.13	2.36	4.52	0.85	0.88	-0.10
2.20	2.25	1.69	4.52	0.02	0.00	-0.05
3.04	3.13	2.36	4.52	0.86	0.88	-0.09
2.72	2.81	2.11	4.52	0.54	0.56	-0.09
2.51	2.25	1.69	4.52	0.33	0.00	0.26

2.18	2.56	1.92	4.52	0.00	0.00	-0.38
1.94	1.68	1.26	4.52	-0.24	-0.88	0.26
1.42	2.03	1.53	4.52	-0.76	-0.53	-0.61
3.03	3.56	2.68	4.52	0.85	1.00	-0.53
2.20	2.56	1.92	4.52	0.02	0.00	-0.36
3.04	3.56	2.68	4.52	0.86	1.00	-0.52
2.72	3.19	2.40	4.52	0.54	0.64	-0.47

Bijlage 10 Toelichting rechter randvoorwaarde D-Geo Flow

Witteveen+Bos heeft ten behoeve van de keuzes in randvoorwaarde een analyse uitgevoerd rondom de randvoorwaarde aan de rechterzijde van het model. Er is in deze analyse gekeken naar de lengte van het achterland in combinatie met een no flow randvoorwaarde of fixed head randvoorwaarde. Overige invoer en geometrie in het model zijn gelijk gehouden om een goede vergelijking te kunnen uitvoeren. Resultaten voor deze analyse zijn gegeven in Tabel 47.

Tabel 47 resultaten analyse rechter randvoorwaarde D-Geo Flow

Type boundary rechter zijde	Lengte achterland (m)	Kritiek verval (m)
Randen met fixed head	50	2.69
Randen met fixed head	100	2.58
Randen met fixed head	250	2.44
Randen met fixed head	400	2.42
Randen met no flow	50	2.39
Randen met no flow	75	2.38
Randen met no flow	150	2.38

Uit Tabel 47 kan geconcludeerd worden, dat met een fixed head het kritiek verval daalt bij een modellering met een langer achterland. Het resultaat hiervan is, dat een groter model nodig is. Dit vergt meer rekentijd. Daarnaast dient een extra input voor de randvoorwaarde (rechter rand en/of bovenrand) met een fixed head ingevoerd te worden. Dit is een extra variabele in de modelinput. Samenvattend, een model met een extra variabele en langzamer in zowel bewerking als rekentijd.

Bij een no flow verandering treedt enkel een centimeter verlaging in het kritiek verval op bij het opvoeren van lengte achterland. Kijkend naar deze lengte is een korter model nodig voor de berekeningen. Daarnaast vereist een no flow randvoorwaarde geen verdere input. Resultaten in kritiek verval tussen de scenario's op de grootste afstand zijn overeenkomstig. De no flow randvoorwaarde heeft een lager kritiek verval met 4 centimeter. Een lager kritiek verval is conservatief ten behoeve van piping.

Er kan geconcludeerd worden, dat een no flow boundary met een beperkter lengte van het achterland geaccepteerd kan worden ten opzichte van een fixed head boundary condition met een grote lengte van het achterland. Dit bespaart rekentijd en een variabele. Daarbij heeft het berekend verschil een conservatief effect op de uitkomsten ten behoeve van piping.

Bijlage 11 Berekeningen fictieve lengte voorland

Bijlage 12 Resultaten analytische berekeningen met fictieve lengte voorland



Waterschap
Rivierenland

Waterschap Rivierenland
Postbus 599
4000 AN Tiel
(0344) 64 90 90
www.waterschaprivierenland.nl