

Gevoeligheidsanalyse inzichten uit de POV Piping

Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis

*sterke dijken
schoon water*



Colofon

Nr.	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Vrijgave	Paraaf
2	28-02-2019	Boye van Zwol		Albert Wiggers		Henk Weijers	
		André Broere		Bas Berbee			
		Bram de Groot		Bert Koster			
		Hendrik Meuwese					
		Martijn Asschert					
		David Houtkamp					

Versie: 2

Datum: 28-02-2019

Status: Definitief

Inhoud

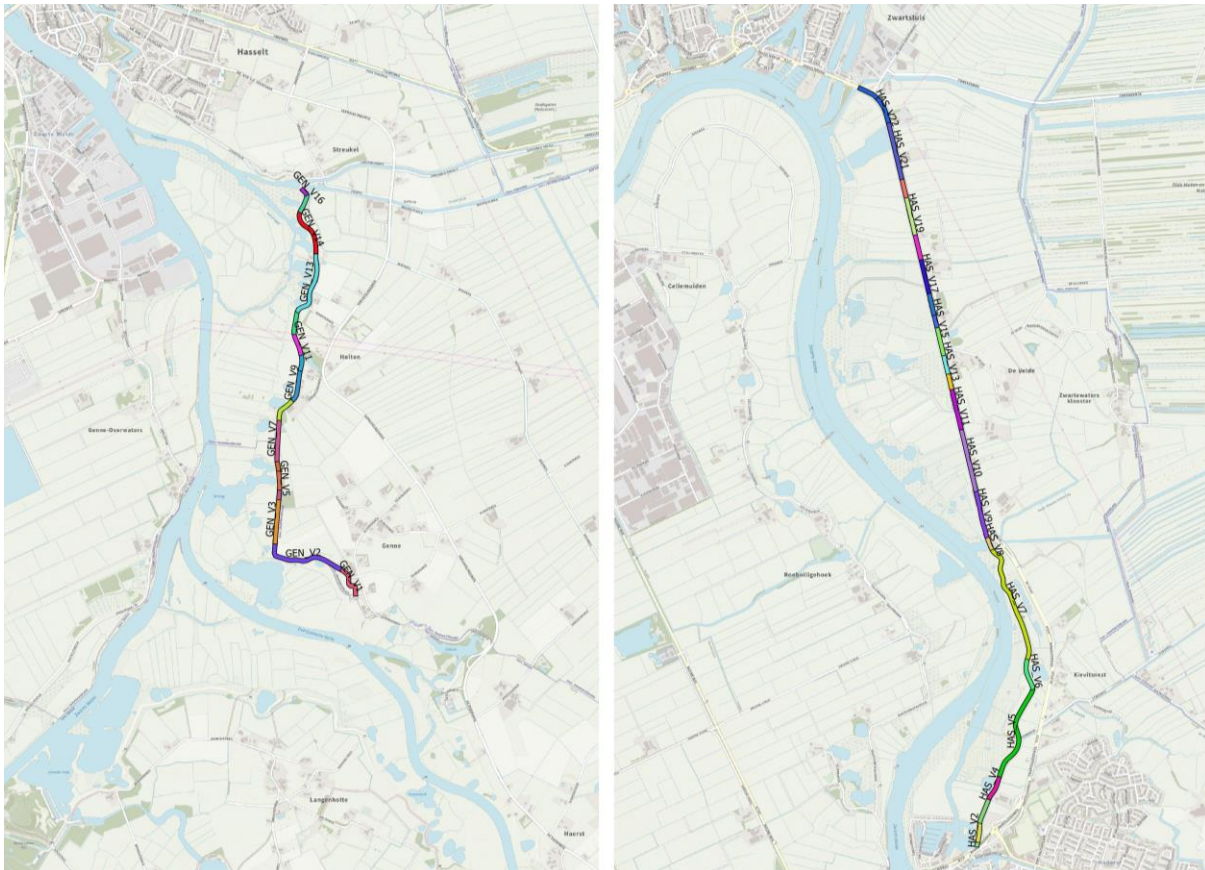
1	SAMENVATTING	7
2	INLEIDING 13	
2.1	Doel	13
2.2	Achtergrond	13
2.3	Samenstelling projectteam	14
2.4	Trajecten	15
2.5	Leeswijzer	15
3	BUREAUSTUDIE	16
3.1	Inventariseren gegevens	16
3.2	Karakteriseren ondergrondopbouw	17
3.3	Karakteriseren geohydrologisch systeem	18
4	PARAMETERS	27
4.1	Hoogte maaiveld	27
4.2	Onderkant deklaag	36
4.3	Buitenwaterstand	45
4.4	Freatisch niveau bij uittredepunt	45
4.5	Intreepunt	46
4.6	Uittreepunt	54
4.7	Onderkant zandpakket	54
4.8	Korreldiameter D_{70}	56
4.9	Doorlatendheid zandlaag	61
4.10	Doorlatendheid deklaag	62
5	VAKINDELING	66
5.1	Bepaling vakgrenzen	66
5.2	Bepaling maatgevende profielen	67
6	ANALYTISCHE BEREKENINGEN	71
6.1	Algemeen	71
6.2	Randvoorwaarden en uitgangspunten	71
6.3	Resultaten	73
6.4	Evaluatie	77
6.5	Beslisboom piping	83
6.6	Aanvullende berekeningen	85
6.7	Vergelijking met historische extreme buitenwaterstanden	92
7	D-GEO FLOW BEREKENINGEN	97
7.1	Algemeen	97
7.2	Randvoorwaarden en uitgangspunten	97
7.3	Randvoorwaarden	101
7.4	Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse	101
7.5	Resultaten	102
7.6	Conclusies D-Geo Flow	105
7.7	Vergelijking met kritiek verval volgens analytische berekening	106
8	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	109
8.1	Algemeen	109
8.2	Analytische berekeningen	109
8.3	D-Geo Flow berekeningen	111

9	REFERENTIES	113
BIJLAGE 1	HISTORISCHE KAARTEN GENNE - STREUKEL.....	115
BIJLAGE 2	HISTORISCHE KAARTEN HASSELT - DE VELDE.....	121
BIJLAGE 3	HISTORISCHE KAARTEN DE VELDE - ZWARTSLUIS	127
BIJLAGE 4	MAATGEVENDE PROFIELEN GENNE-STREUKEL.....	133
BIJLAGE 5	MAATGEVENDE PROFIELEN HASSELT-ZWARTSLUIS.....	140
BIJLAGE 6	BEPALING EFFECTIEVE DOORLATENDHEID	150
BIJLAGE 7	BEPALING FICTIEVE LENGTE VOORLAND.....	151
BIJLAGE 8	RESULTATEN ANALYTISCHE BEREKENINGEN.....	152
BIJLAGE 9	PROCESSHEMA BESLISBOOM PIPING.....	153
BIJLAGE 10	GRONDWATERMODELLERING.....	155
BIJLAGE 11	RESULTATEN D-GEO FLOW BEREKENINGEN	160
BIJLAGE 12	TOELICHTING D-GEO FLOW RANDVOORWAARDE	171
BIJLAGE 13	D-GEO FLOW RANDVOORWAARDE BUITENWATER.....	173

1 Samenvatting

Aanleiding, doel en achtergrond

De POV Piping heeft nieuwe inzichten opgeleverd voor het faalmechanisme piping [1]. In het kader van de Project Overstijgende Verkenning Piping (POVP) worden verschillende gevoeligheidsanalyses van inzichten uit de POV Piping uitgevoerd. In deze gevoeligheidsanalyse wordt de nieuwe werkwijze piping toegepast op de trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis binnen het dijkkringtraject 9-1 (Figuur 1), in beheer bij Waterschap Drents Overijsselse Delta. Het betreft geen complete WBI-beoordeling van de dijktrajecten.



Figuur 1: Trajecten Genne-Streukel (links) en Hasselt-Zwartsluis (rechts)

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 Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis zijn interessant vanwege de ruimtelijke variatie van de dikte van de deklaag en de aanwezigheid van diverse kolken en strengen. Daarnaast heeft binnen het dijkkringtraject 9-1 een geofysisch onderzoek plaatsgevonden. Om de doorlatendheid van de deklaag te schatten is een 3D grondwatermodel opgesteld en gekalibreerd. Daarbij is in deze gevoeligheidsanalyse gebruik gemaakt van peilbuismetingen ter hoogte van Genne-Overwaters tijdens het hoogwater van januari 2012.

Vakindeling

De 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 de slootbodemp of het maaiveld) en variaties in de ondergrond (dikte van de deklaag, en aard en samenstelling van het watervoerend pakket).

Analytische berekeningen

Om inzicht in de consequenties van de aanpassing van de rekenregel van Sellmeijer en in de gevoeligheden van de kwelweglengte, de korreldiameter D_{70} , de specifieke doorlatendheid en het slootpeil tijdens hoogwater te verkrijgen is per vak de kritieke buitenwaterstand in opeenvolgende stappen berekend. Er zijn tevens berekeningen uitgevoerd waarbij de fictieve kwelweglengte – tegenstrijdig met de richtlijnen in [2] – niet is gemaximeerd tot tweemaal de dijkbasis (afstand tussen de buitenteen en het uittreepunt), maar volledig is meegenomen, en waarbij bovendien geen beperking is gesteld aan de minimale dikte van de deklaag in het voorland (Tabel 1). In alle berekeningen is de vigerende rekenregel conform Sellmeijer (2011) gehanteerd. Voor dijkkringtraject 9-1 geldt een veiligheidsfactor piping van 1.62. Voor de schematiseringsfactor piping is 1.0 aangehouden.

Tabel 1: Overzicht analytische berekeningen

Stap	Kwelweglengte	Eigenschappen watervoerend pakket	Rekenwaarden korreldiameter	Rekenwaarden specifieke doorlatendheid	Slootpeil tijdens hoogwater
1A	Dijkbasis	WBI-SOS	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Winterpeil
1B	Fictief, gemaximeerd				
2A	Dijkbasis	WBI-SOS	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Winterpeil
2B	Fictief, gemaximeerd				
3A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Winterpeil
3B	Fictief, gemaximeerd				
4A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Winterpeil
4B	Fictief, gemaximeerd				
5A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Verhoogd slootpeil
5B	Fictief, gemaximeerd				
6A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Verhoogd slootpeil
6B	Fictief, gemaximeerd				
7	Fictief, niet gemaximeerd	Onderzoek/NL3D	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Verhoogd slootpeil
8	Fictief, niet gemaximeerd	Onderzoek/NL3D	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Verhoogd slootpeil

De berekende kritieke buitenwaterstand is gegeven in Figuur 2 en Figuur 3. Op basis van de resultaten van de berekeningen kan het volgende worden geconcludeerd:

- De berekende kritieke buitenwaterstand is slechts in enkele gevallen hoger dan de voor het betrokken profiel geldende ondergrens conform de Regeling primaire waterkeringen 2017. Voor het traject Genne-Streukel geldt dat de maatgevende profielen binnen de vakken GEN_V2 en GEN_V5 als meest ongunstig moeten worden aangemerkt. In beide gevallen bevindt zich een buitendijkse kolk op beperkte afstand van de buitenteen. Voor het traject Hasselt-Zwartsluis geldt dat de maatgevende profielen binnen de vakken HAS_V16 en HAS_V17 als meest ongunstig moeten worden aangemerkt. In beide gevallen kan door het ontbreken van een behoorlijke deklaag geen voorland in rekening worden gebracht.
- Bij toepassing van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van de beschikbare grondonderzoeken en het ondergrondmodel NL3D (Stap 3A) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van WBI-SOS (Stap 1A). Dit is het gevolg van het hanteren van een grotere korreldiameter D_{70} en een kleiner doorlaatvermogen in de berekeningen bij Stap 3. Voor de maatgevende profielen binnen het traject Genne-Streukel bedraagt de

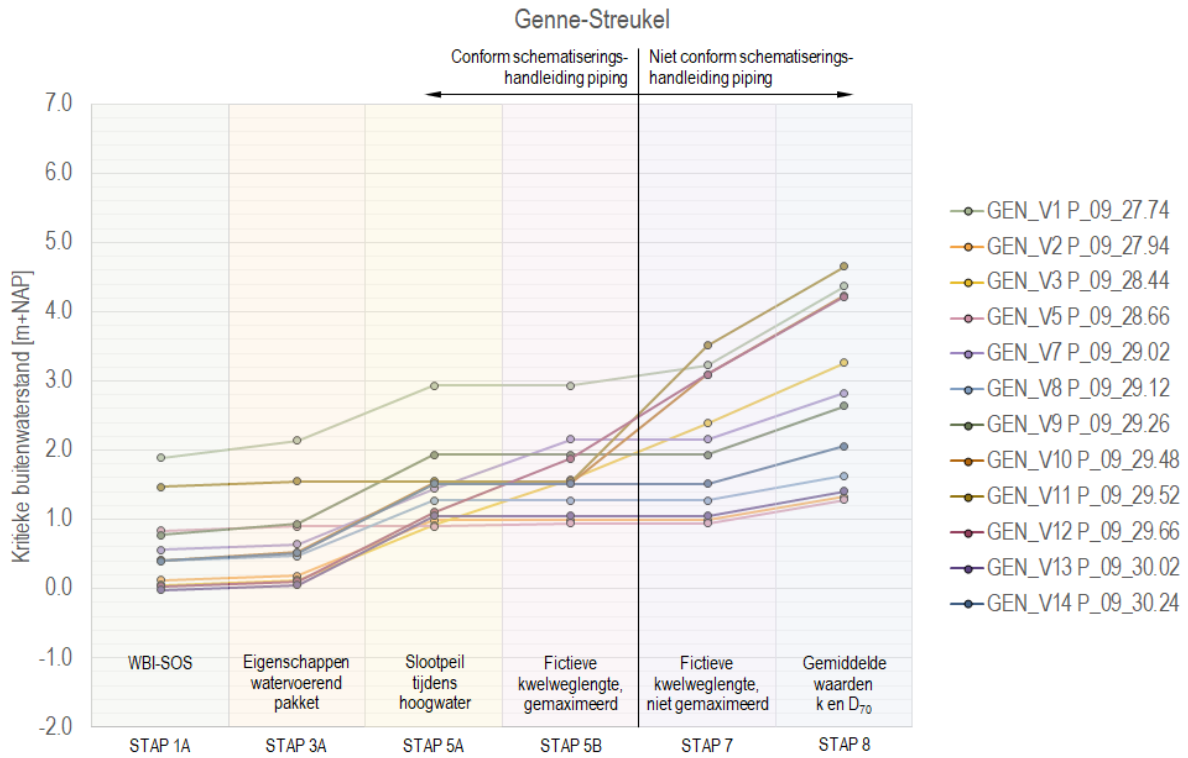
verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.1-0.2 m. Voor de maatgevende profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.1-0.2 m.

- Bij toepassing van het verhoogd slootpeil (Stap 5A) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van het winterpeil (Stap 3A). Voor de maatgevende profielen binnen het traject Genne-Streukel bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.8-1.0 m. Voor de maatgevende profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.5 m.
- Bij toepassing van de gemaximeerde fictieve kwelweglengte (Stap 5B) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de kwelweglengte exclusief de fictieve lengte van het voorland (Stap 5A). Dit geldt uiteraard alleen voor de profielen in de vakken waar een afdoende deklaag in het voorland aanwezig is. Voor de maatgevende profielen binnen het traject Genne-Streukel bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.0-0.8 m. Voor de maatgevende profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.0-0.8 m.
- Bij toepassing van de niet-gemaximeerde fictieve kwelweglengte (Stap 7) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de gemaximeerde fictieve kwelweglengte (Stap 5B). Voor de beschouwde profielen binnen het traject Genne-Streukel bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.0-2.0 m. Voor de beschouwde profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.0-3.0 m.
- Bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 8) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7). Dit is het gevolg van het hanteren van een grotere korreldiameter D_{70} en een lagere specifieke doorlatendheid in de berekeningen bij Stap 8. Voor de beschouwde profielen binnen het traject Genne-Streukel bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.3-1.1 m. Voor de beschouwde profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.4-1.9 m.

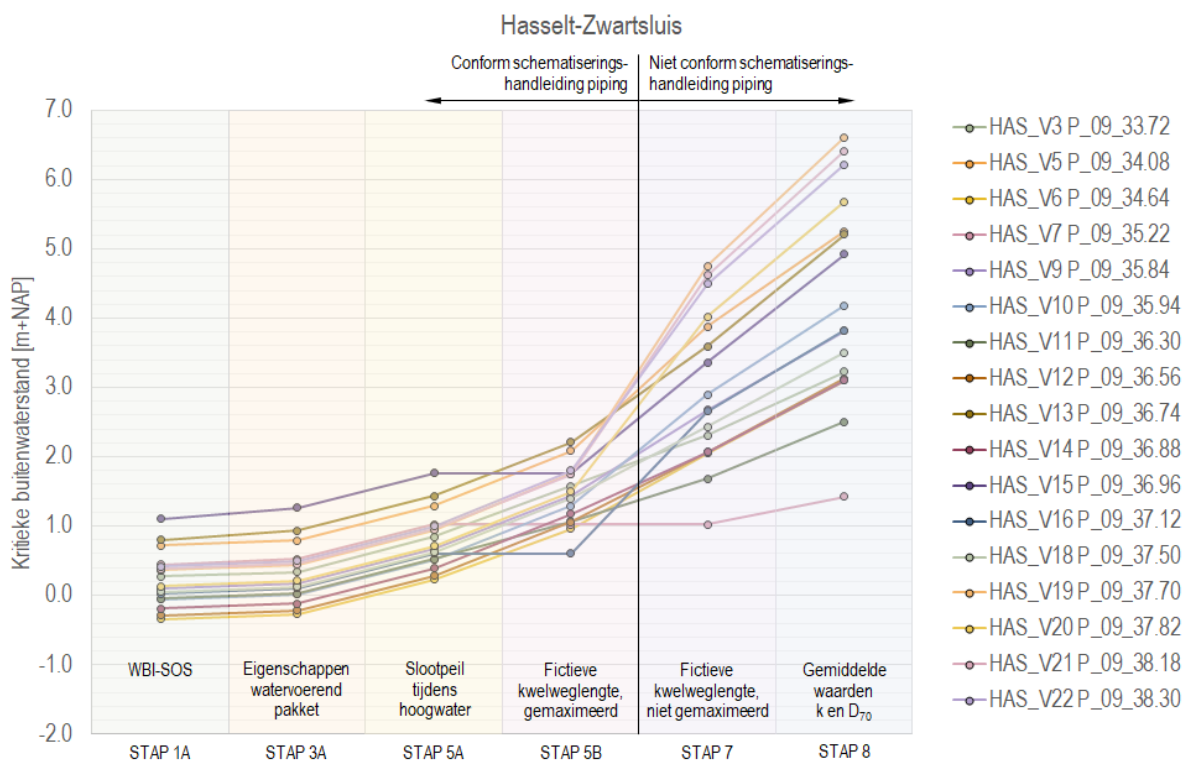
De kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid (berekend met een schematiseringsfactor van 1.0 en een veiligheidsfactor van 1.00 (in plaats van 1.62)) is vergeleken met historische extreme buitenwaterstanden. Uit metingen van de waterstand van het Zwartewater bij Mond der Vecht en Zwartsluis buiten kan worden afgeleid dat de dijken binnen de trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis in de periode 1950-september 2018 zijn blootgesteld aan buitenwaterstanden tot 1.30-1.55 m. Er zijn geen registraties van wellen bekend (het is niet bekend of er in die periode naar wellen is gekeken en of deze geregistreerd zijn).

Op basis van de vergelijking van de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid met historische extreme buitenwaterstanden kan het volgende worden geconcludeerd:

- Het hanteren van een slootpeil dat hoger is dan het winterpeil heeft een positieve invloed op de kritieke buitenwaterstand. Het wordt daarom aanbevolen om het daadwerkelijke slootpeil tijdens hoogwater vast te stellen, rekening houdend met de lokale omstandigheden en in nauwe samenwerking met de beheerder.
- Bij toepassing van de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid in combinatie met het verhoogd slootpeil (Stap 5B en Stap 7) geldt voor verschillende profielen dat de berekende kritieke buitenwaterstand zou zijn overschreden tijdens in het verleden opgetreden hoogwaters, terwijl dit niet het geval is bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en (Stap 6B en Stap 8). Het laatste komt overeen met de tijdens de hoogwaters getoonde prestaties van de dijkvakken.



Figuur 2: Kritieke buitenwaterstand; Genne-Streukel



Figuur 3: Kritieke buitenwaterstand; Hasselt-Zwartsluis

D-Geo Flow berekeningen

Voor de profielen bij km 28.44 en km 37.70 zijn D-Geo Flow berekeningen uitgevoerd. In D-Geo Flow is het mogelijk om 2D transiënt grondwaterstromingsberekeningen uit te voeren met een gelaagde grondopbouw waarin zowel een tijdsafhankelijke hydraulische belasting, de samendrukbaarheid van

Na afronding van de berekeningen is een issue naar voren gekomen rond de Heave Boundary Condition in de modellering van D-Geo Flow. Bij de oplevering van het onderzoek was nog geen uitsluitsel over de aard en omvang van het issue. Dit betekent dat de gepresenteerde resultaten mogelijk moeten worden herzien in de toekomst.

het korrelskelet en het grondwater, en verandering van de freatische lijn meegenomen kunnen worden. Onderzocht zijn de gevoeligheden van de aanwezige kwelweglengte, de gelaagdheid van de grondopbouw, de anisotropie van de grondlagen in de het watervoerend pakket, de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid.

Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsberekeningen voor de profielen bij km 28.44 en km 37.70 kan het volgende worden geconcludeerd:

- Variatie van voorlandlengte heeft groter effect op kritiek verval dan anisotropie en/of meerlaagsheid;
- Gemiddelde inputwaarden leveren circa een meter tot anderhalve meter “winst” in het kritieke verval op ten opzichte van het gebruiken van karakteristieke inputwaarden.
- Meerlaagsheid en/of anisotropie geven geen winst in het kritiek verval met het basismodel dat is gebaseerd op de formules van Sellmeijer;
- Het toevoegen van enkel meerlaagsheid resulteert in een onveiligere kritiek verval ten opzichte van het basismodel.
- De inpassing van meerlaagsheid en anisotropie hebben invloed op de berekende pipe progressie
- Ondanks een gelijk kritiek verval, treedt er 2,5 keer zoveel pipe groei op voor modellen inclusief meerlaagsheid en anisotropie.
- Naarmate de voorlandlengte toeneemt, vergroot de range van het kritieke verval tussen de gemiddelde en karakteristieke inputwaarden.

De kritieke vervallen voor de hierboven beschreven D-Geo Flow berekeningen zijn ter vergelijking tevens analytisch berekend met rekenregel Sellmeijer 2. Voor de specifieke doorlatendheid is hierbij de effectieve doorlatendheid van het totale zandpakket gehanteerd.

Op basis van de resultaten van de analytische controleberekeningen voor de profielen bij km 28.44 en km 37.70 kan het volgende worden geconcludeerd:

- Voor de beschouwde profielen geldt dat het verschil in kritiek verval volgens D-Geo Flow en kritiek verval volgens rekenregel Sellmeijer 2 veelal beperkt is tot 0.3 m, zowel voor berekeningen met een enkellaags watervoerend pakket in D-Geo Flow als 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. Wel moet worden opgemerkt dat met rekenregel Sellmeijer 2 consequent een hoger kritiek verval wordt berekend dan met D-Geo Flow.
- Het rivierwaarts verplaatsen van het intreepunt neigt tot overschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow. Het landwaarts verplaatsen van het intreepunt neigt tot onderschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow.

- Bij het rivierwaarts verplaatsen van het intrepunt tot eenmaal de lek lengte van het voorland ten opzichte van de buitenteen wordt het kritieke verval volgens D-Geo Flow aanzienlijk overschat. Het verschil in kritiek verval bedraagt in dat geval 1.2-1.9 m voor het profiel bij km 28.44 en 1.2-1.6 m voor het profiel bij km 37.70, afhankelijk van de rekenwaarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid.

In Bijlage 13 is het belang van een correcte schematisatie voor de randvoorwaarde van het buitenwater gepresenteerd. Keuzes in de schematisatie, diepte tot waar het buitenwater rijkt, en de locatie, afstand tot de buitenteen, kunnen tientallen centimeters effect hebben op het kritiek verval. Deze keuzes kunnen doorwerken in de effecten op het gehele geohydrologisch systeem van het model. Er kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de effecten omtrent radiale stroming.

Algemeen

Opgemerkt moet worden dat de conclusies uit deze gevoeligheidsanalyse alleen van toepassing zijn op de trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis. 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 Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis.

2 Inleiding

2.1 Doel

In het kader van de Project Overstijgende Verkenning Piping (POVP) worden verschillende gevoeligheidsanalyses van inzichten uit de POV Piping uitgevoerd. In deze gevoeligheidsanalyse wordt de nieuwe werkwijze piping toegepast op de trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis binnen het dijkkringtraject 9-1 (Figuur 4), in beheer bij Waterschap Drents Overijsselse Delta. Het betreft geen complete WBI-beoordeling van de dijktrajecten.

2.2 Achtergrond

De POVP heeft verkenningen specifiek gericht op een grondiger beschouwing vanuit verschillende invalshoeken [1]:

- 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.

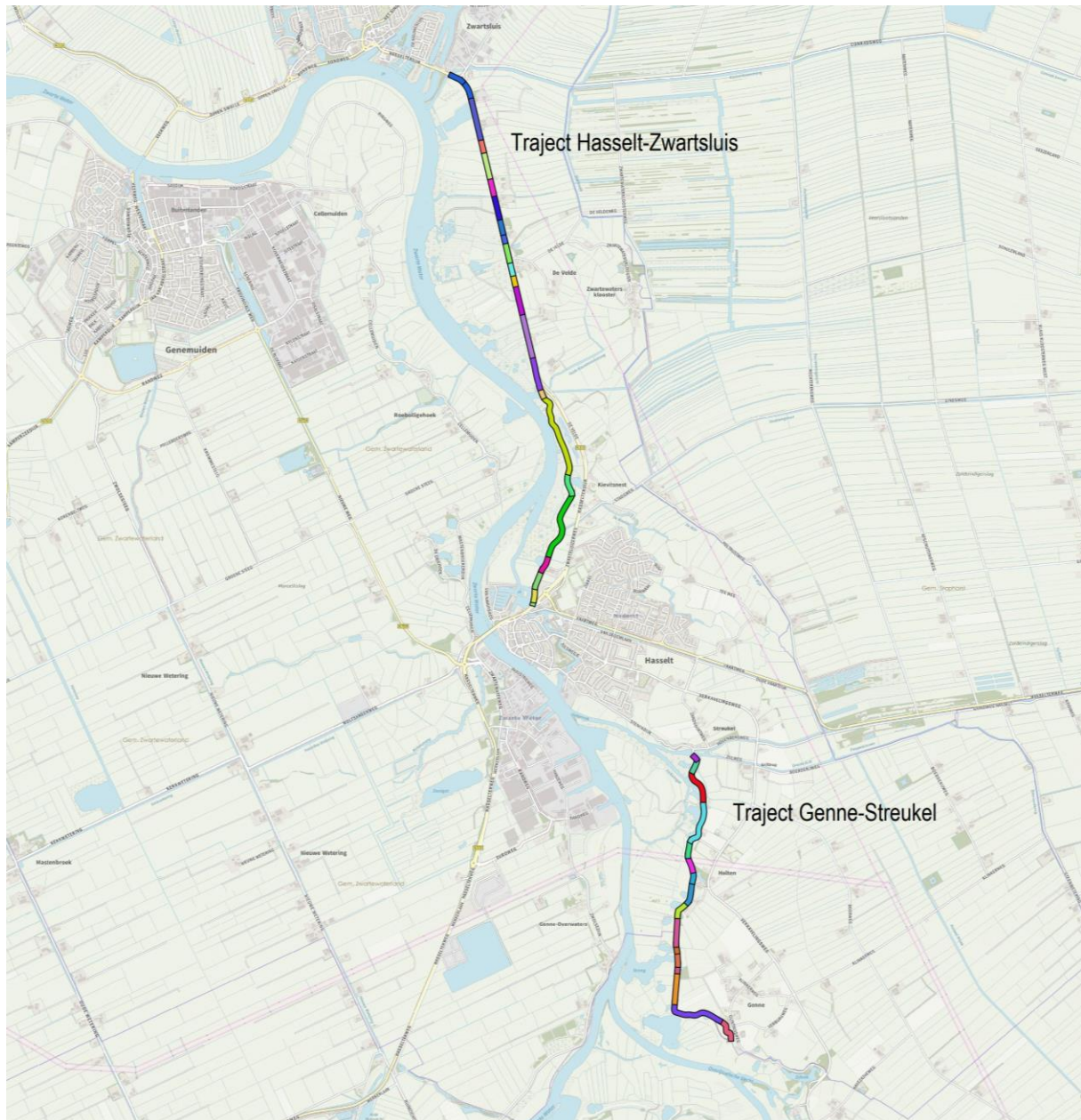
Traditioneel wordt het verschijnsel opbarsten, heave en piping in een strak tweedimensionaal geotechnisch schema beoordeeld. Een aanpak die het hele grond(water)systeem beschouwt biedt een realistischer beeld van de situatie ten aanzien van het pipingverschijnsel. Het optreden van een geconcentreerde 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 [1].

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 [1].

De nieuwe werkwijze piping kenmerkt zich in hoofdlijnen door de volgende aspecten [1]:

- 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 [1].



Figuur 4: Trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis

2.3 Samenstelling projectteam

Kenmerkend voor de nieuwe werkwijze piping is dat kennis vanuit verschillende kennisgebieden en/of specialismen worden samengebracht. Op basis van de inzichten uit de POV Piping is een globale verdeling gemaakt in drie verschillende kennisgebieden. Tabel 2 geeft weer welke marktpartij per kennisgebied is geselecteerd.

Tabel 2: Verdeling van kennisgebieden per partij

Kennisgebied	Marktpartij
Geotechniek	Lievensse
Geohydrologie	Witteveen + Bos
Geografisch Informatie Systeem (GIS)	Antea

2.4 Trajecten

In deze gevoeligheidsanalyse worden de trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis binnen het dijkkringtraject 9-1 onder beheer van het Waterschap Drents Overijsselse Delta beschouwd.

Het traject Genne-Streukel begint bij Genne (km 27.5) en eindigt bij gemaal Streukelerzijl (km 30.7). De lengte van het traject is ongeveer 3.1 km. In het traject bevindt zich sluis Gennegerzijl (km 28.8). Het voorland wordt begrensd door de Overijsselse Vecht, het Zwartewater, het Varkensgat (een aftakking van het Galgenrak) en diverse buitendijkse kolken.

Het traject Hasselt-Zwartsluis begint bij haven De Molenwaard (km 33.5) en eindigt bij gemaal Kostverlorenzijl (km 38.6). De lengte van het traject is ongeveer 5.1 km. In het traject bevindt zich gemaal Kloosterzijl (km 35.6). Het voorland wordt begrensd door het Zwartewater, de Molenwaardsstreng, uitvliet De Muizenval, uitwatering Kloosterzijlstreng en de buitendijkse kolk ter plaatse van km 33.8-33.9. Voor beide trajecten gelden signalerings- en ondergrenswaarden van respectievelijk 1/1000 per jaar en 1/300 per jaar (Tabel 3).

Tabel 3: Overzicht trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis

Traject	Dijkkring-traject	Begin traject	Einde traject	Signalering	Ondergrens	Beheerder
Genne-Streukel	9-1	27.52	30.66	1/1000	1/300	WDOD
Hasselt-Zwartsluis	9-1	33.46	38.56	1/1000	1/300	WDOD

2.5 Leeswijzer

De opbouw van dit rapport volgt grotendeels het in [1] 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 profielen bepaald.
- In hoofdstuk 6 worden de resultaten van analytische berekeningen gegeven. Om inzicht te krijgen in de gevoeligheden van de kwelweglengte, de korreldiameter D_{70} , de specifieke doorlatendheid en het slootpeil tijdens hoogwater is per vak in opeenvolgende stappen de kritieke buitenwaterstand berekend. De berekende kritieke buitenwaterstand wordt bovendien vergeleken met in het verleden opgetreden extreme buitenwaterstanden.
- In hoofdstuk 7 worden de resultaten van D-Geo Flow berekeningen gegeven. Hierin zijn voor enkele profielen de gevoeligheden van de kwelweglengte, de gelaagdheid van de grondopbouw, de anisotropie van de grondlagen in de het watervoerend pakket, de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid onderzocht. Tevens is een vergelijking met het analytisch berekende kritieke verval opgenomen.
- In hoofdstuk 8 worden de resultaten van de gevoeligheidsanalyse 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 (AHN2)
- Watergangen Waterschap Drents Overijsselse Delta
- Basisregistratie Grootchalige Topografie
- Historisch kaartmateriaal
- Satellietbeelden en luchtfoto's
- Stochastische Ondergrond Schematisatie (WBI-SOS)
- Geotechnisch onderzoek (boor- en sondeerstaten, en laboratoriumbepalingen op monsters)
- Geofysisch onderzoek
- Hydrogeologisch model REGIS
- Ondergrondmodel NL3D
- Zandbanenkaart
- Toetspeil Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR 2006)
- Ondergrens- en signaleringswaarden
- Peilbuismetingen

Veel van bovenstaande informatie is geografisch geïntegreerd. 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 4.

Tabel 4: Veranderingen zichtbaar in historisch kaartmateriaal

Periode		Veranderingen zichtbaar in kaartmateriaal
Van	Tot	
1850	1859	-
1859	1881	-
1881	1893	Grote Kolksluis bij Zwartsluis aangelegd.
1893	1921	Moerasvorming in het Veldiger Buitenland grenzend aan het Zwartewater.
1921	1933	Aanleg motorgemaal Kostverlorenzijl en verbreding toeleidingskanaal. Verlegging dijk nabij De Velde en demping wielen. Aanleg motorgemaal Kloosterziel. Demping buitendijkse streng en binnendijks gelegen wielen nabij Kievitsnest. Inperking riviergeul bij De Velde.
1933	1954	Demping gedeelte waterpartij buitendijks ter hoogte van Streukel en Holten. Nadere inperking riviergeul bij De Velde.
1954	1964	Vorming kolk De Streng ter hoogte van Gennegerzijl. Aanleg Meppelderdiepsluis en voorhaven bij Zwartsluis (gereed: 1958).
1964	1974	Aanleg gemaal en toeleidingskanalen bij Zwartsluis. Lichte verruiming riviergeul bij De Velde.
1974	1988	Versmalling/reductie Varkensgat nabij Holten. Afgraving uiterwaard nabij Genne. Aanleg buitendijks gelegen jachthaven in de Molenwaard bij Hasselt.
1988	1995	-
1995	1997	Toename bebouwing binnendijks bij Holten.
1997	2006	Toename bebouwing binnendijks bij Holten.
2006	2009	-
2009	2015	Vorming/aanwezigheid plassen in uiterwaarde ter hoogte van De Velde en Zwartsluis.

3.2 Karakteriseren ondergrondopbouw

Voor het karakteriseren van de opbouw van de ondergrond zijn – naast de beschikbare boringen en sonderingen – het ondergrondmodel REGIS II, de Stochastische Ondergrond Schematisatie (WBI-SOS) en het ondergrondmodel NL3D geraadpleegd.

Het ondergrondmodel REGIS II brengt grondlagen met min of meer uniforme hydraulische eigenschappen in kaart. Deze hydrogeologische eenheden vallen samen, of zijn onderdeel van, de in het Digitaal Geologisch Model (DGM) onderscheiden lithostratigrafische eenheden. De diepteligging van de onder- en bovenkant en de dikte van de eenheden zijn vastgelegd in gridbestanden met celgrootte van 100 m bij 100 m. Naast de geometrische gegevens bevat het model voor elke eenheid ook gegevens over de doorlatendheid [3].

WBI-SOS is een toepassingsonafhankelijke ondergrondschematisatie dat – na een lokale verfijning – gebruikt kan worden voor het probabilistisch toetsen van primaire waterkeringen voor alle relevante faalmechanismen. Voor geotechnische toepassingen relevante overgangen in de algemene opbouw van de ondergrond vormen de basis van de segmentgrenzen binnen WBI-SOS. Hierbij moet gedacht worden aan variaties in veendikte, diepteligging van het Pleistocene zand of overgangen tussen gebieden met vooral klei en veen naar gebieden met vooral zand. De WBI-SOS scenario's beschrijven de opbouw van de ondergrond in WBI-SOS eenheden die in een dijkstrekking kunnen worden aangetroffen. De schematisaties zijn gemaakt tot een diepte van NAP -40 m; deze diepte is in principe voldoende voor het schematiseren van de verschillende faalmechanismen [4].

Het ondergrondmodel NL3D geeft een gedetailleerd driedimensionaal beeld van de ondergrond. In het model is de ondergrond opgedeeld in voxels (blokken van 250 m bij 250 m in horizontale richting en 1 m in verticale richting). Aan elke voxel zijn de volgende eigenschappen gekoppeld: de geologische eenheid waarin de voxel zich bevindt, de meest representatieve lithoklasse voor de voxel (veen, klei, kleiig zand en zand) en de kans op voorkomen van elke lithoklasse [5].

Genne-Streukel

De bodemopbouw op basis van het ondergrondmodel REGIS II is gegeven in Figuur 5. Onder de deklaag van Holocene afzettingen (bestaande uit een afwisseling van zandige klei, zand, klei en veen) bevinden zich zandige eenheden behorende bij de Formatie van Boxtel. Deze eenheden worden gekenmerkt door een fijne korrelgrootte; grotere klasten dan matig grof zand komen weinig voor. Daaronder worden opeenvolgend zandige eenheden behorende bij de Formaties van Kreftenheye, Urk, Appelscha en Peize/Waalre aangetroffen. Deze eenheden bestaan hoofdzakelijk uit matig grof en grof zand. Beneden ongeveer NAP -80 m is een minder doorlatende complexe eenheid (bestaande uit een afwisseling van matig grof zand, zandige klei, grof zand en klei) behorende bij de Formatie van Peize aanwezig.

De bodemopbouw op basis van WBI-SOS is gegeven in Figuur 26. Voor het traject Genne-Streukel is SOS segment 9008 van toepassing. De onderkant van het zandpakket ligt op NAP -30.5 m.¹

De bodemopbouw ter plaatse van de waterkering op basis van ondergrondmodel NL3D is gegeven in Figuur 40. De meest representatieve lithoklassen voor de voxels (blokken van 250 m bij 250 m in horizontale richting en 1 m in verticale richting) beneden NAP -24 m zijn kleiig zand en fijn zand. Verwacht wordt dat de doorlatendheid van de grondlaag beneden NAP -24 m aanzienlijk kleiner is dan die van de bovenliggende zandlagen. Op basis hiervan wordt aangenomen dat de onderkant van

¹ Volgens scenario 9008_1D1 en 9008_1D2 bevindt zich beneden NAP -30.5 m een zandlaag met een doorlatendheid die aanzienlijk kleiner is dan die van de bovenliggende zandlagen. Op basis hiervan wordt aangenomen dat de onderkant van het zandpakket op NAP -30.5 m ligt.

het zandpakket op NAP -24 m ligt (6.5 m hoger dan de onderkant van het zandpakket op basis van WBI-SOS).

Hasselt-Zwartsluis

De bodemopbouw op basis van het ondergrondmodel REGIS II is gegeven in Figuur 6. De bodemopbouw voor het traject Hasselt-Zwartsluis is vergelijkbaar met die voor het traject Genne-Streukel, zij het dat de bovenkant van de complexe eenheid behorende bij de Formatie van Peize enkele decimeters lagergelegen is. Onder de deklaag van Holocene afzettingen (bestaande uit een afwisseling van zandige klei, zand, klei en veen) bevinden zich zandige eenheden behorende bij de Formatie van Boxtel. Deze eenheden worden gekenmerkt door een fijne korrelgrootte; grotere klasten dan matig grof zand komen weinig voor. Daaronder worden opeenvolgend zandige eenheden behorende bij de Formaties van Kreftenheye, Urk, Appelscha en Peize/Waalre aangetroffen. Deze eenheden bestaan hoofdzakelijk uit matig grof en grof zand. Beneden NAP -80 m (ter plaatse van Hasselt) tot NAP -110 m (ter plaatse van Zwartsluis) is een minder doorlatende complexe eenheid (bestaande uit een afwisseling van matig grof zand, zandige klei, grof zand en klei) behorende bij de Formatie van Peize aanwezig.

De bodemopbouw op basis van WBI-SOS is gegeven in Figuur 26. Voor het traject Hasselt-Zwartsluis is het SOS segment 9009 van toepassing. De onderkant van het zandpakket ligt op NAP -30.5 m.²

De bodemopbouw ter plaatse van de waterkering op basis van ondergrondmodel NL3D is gegeven in Figuur 40. De meest representatieve lithoklassen voor de voxels (blokken van 250 m bij 250 m in horizontale richting en 1 m in verticale richting) beneden NAP -34 m zijn kleiig zand en fijn zand. Verwacht wordt dat de doorlatendheid van de grondlaag beneden NAP -34 m aanzienlijk kleiner is dan die van de bovenliggende zandlagen. Op basis hiervan wordt aangenomen dat de onderkant van het zandpakket op NAP -34 m ligt (3.5 m lager dan de onderkant van het zandpakket op basis van WBI-SOS).

3.3 Karakteriseren geohydrologisch systeem

Het geohydrologisch systeem is in kaart gebracht door middel van verschillende data. In deze paragraaf worden kaarten gegeven met locaties van de primaire en secundaire watergangen, maximale, minimale en gemiddelde waterstanden vanuit peilbuisdata, peilvakken vanaf de gis-applicatie van de provincie en tot slot is een isohypse van het regionale grondwaterbeeld weergegeven.

Genne-Streukel

Op het traject Genne-Streukel is beperkt peilbuisdata aanwezig. Een overzicht van de peilbuizen en watergangen zijn gegeven in Figuur 7 en Figuur 8. Er zijn geen recente metingen in het achterland. Het voorland bevat een aantal peilbuizen. Aan de westzijde van de Vecht zijn een groot aantal recente peilbuismetingen aanwezig. Figuur 9 geeft een aantal peilvakken voor de grondwaterstand. Het achterland ligt in het noordelijk deel van het traject rond een bovengrens van circa NAP -0,5 m. Het zuidelijk deel van het traject ligt iets lager met circa NAP -0,6 m. In het voorland zijn een aantal delen met oppervlaktewater aanwezig. Aan de binnendijkse zijde zijn een aantal kopsloten te vinden. Het grootste deel van de binnenteen bevat geen sloot.

Hasselt-Zwartsluis

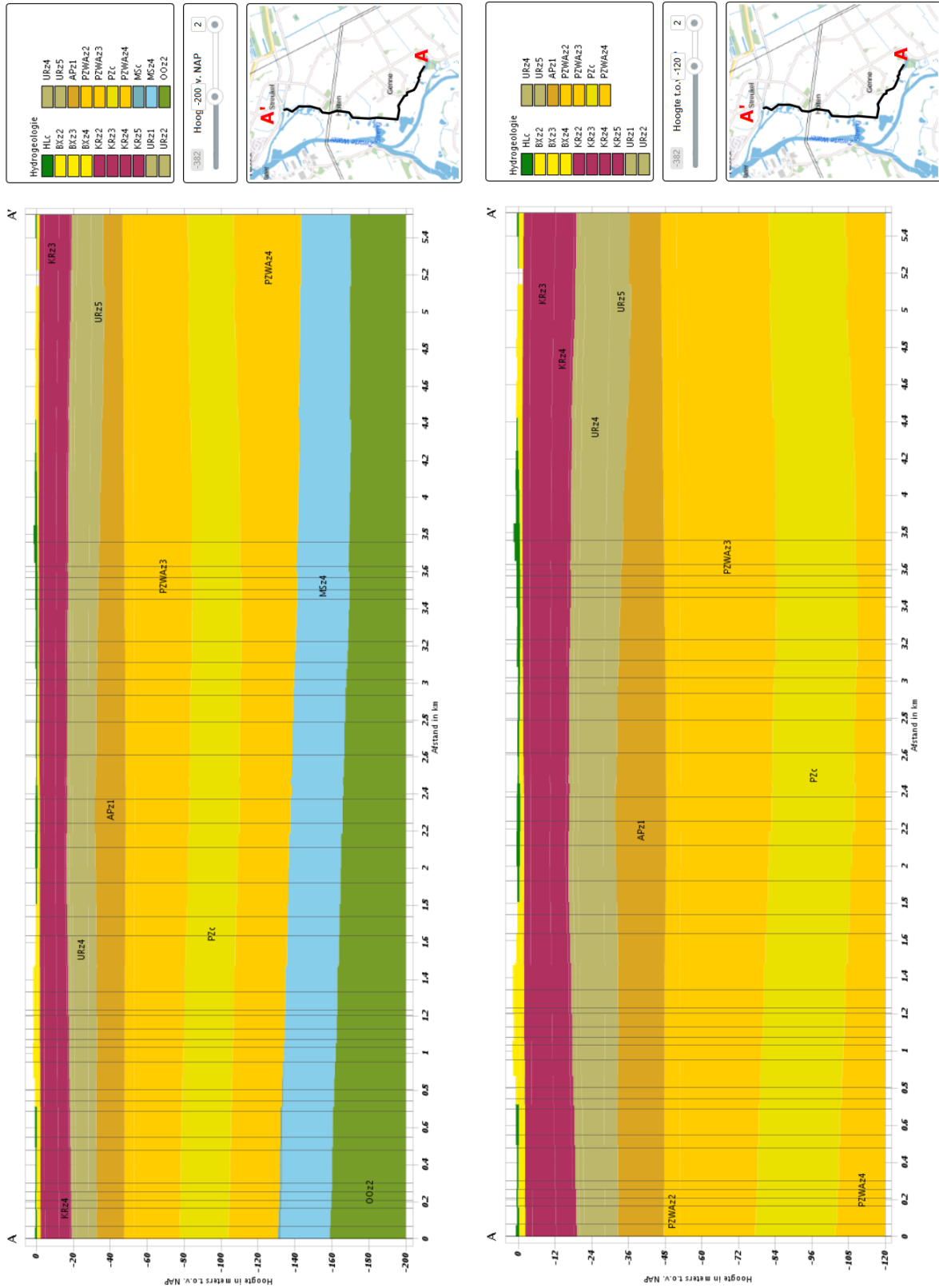
Het traject Hasselt-Zwartsluis toont een gebrek aan peilbuisdata. Slechts enkele peilbuizen zijn aanwezig. Deze hebben gemeten rond het begin van 2000. Figuur 13 weergeeft het bijbehorend

² Volgens scenario 9009_1D1, 9009_1D2, 9009_1D3 en 9009_1D4 bevindt zich beneden NAP -30.5 m een zandlaag met een doorlatendheid die aanzienlijk kleiner is dan die van de bovenliggende zandlagen. Op basis hiervan wordt aangenomen dat de onderkant van het zandpakket op NAP -30.5 m ligt.

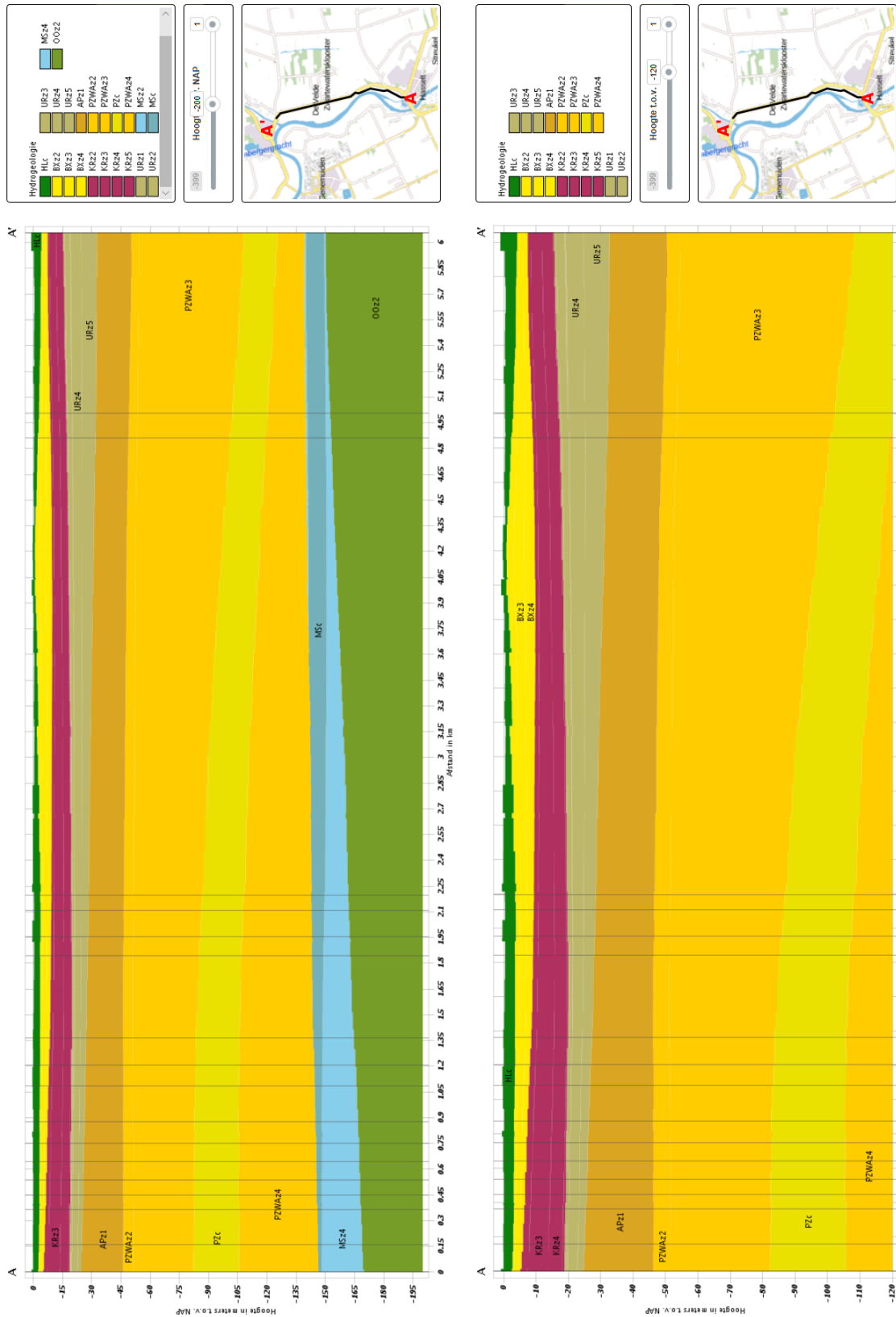
achterland in hetzelfde peilgebied. In dit peilgebied fluctueert de grondwaterstand tussen NAP -1,0 en NAP -1,2 meter. Over het gehele traject ligt in het achterland een primaire watergang. Dit is weergegeven in Figuur 10, Figuur 11 en Figuur 12. De buitendijkse zijde bevat wederom verscheidene stukken oppervlaktewater. Door de ligt meanderende rivier ligt de dijk gedurende het traject op het ene stuk verder van de rivier als op andere stukken.

Tabel 5: Hydrogeologische eenheden op basis van ondergrondmodel REGIS II

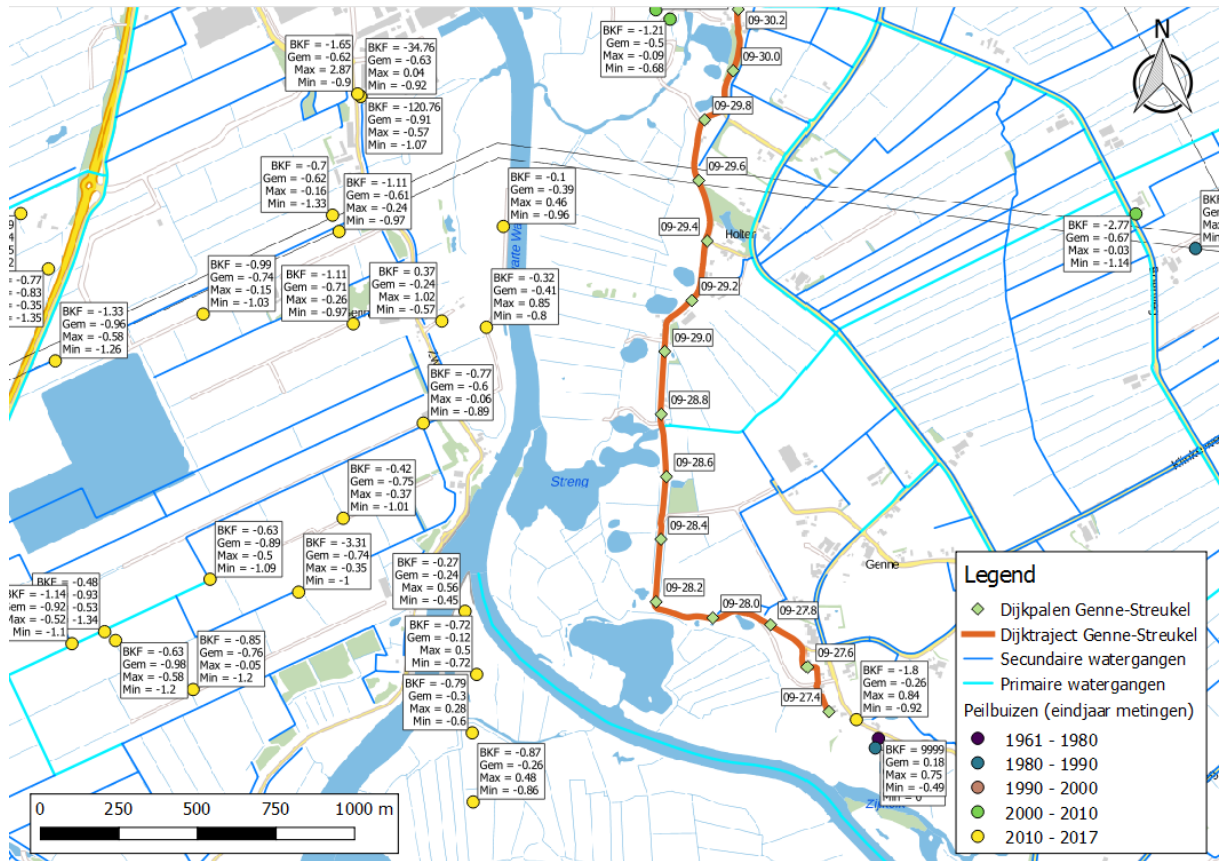
Code	Hydrogeologische eenheid	Lithologie	Horizontale doorlatendheid [m/d]
HLC	Holocene afzettingen, complexe eenheid	Complexe eenheid, bestaande uit een afwisseling van zandige klei, midden en fijn zand, klei en veen en een weinig grof zand.	-
BXz2 BXz3 BXz4	Formatie van Boxtel, zandige eenheden	Zandige eenheid, hoofdzakelijk bestaande uit midden en fijn zand, met weinig zandige klei en grof zand en een spoor klei, veen en grind.	2.5-5 5-10
KRz2 KRz3 KRz4 KRz5	Formatie van Kreftenheye, zandige eenheden	Zandige eenheid, hoofdzakelijk bestaande uit midden en grof zand, met weinig zandige klei, fijn zand en grind en een spoor klei en veen.	50-100
URz1 URz2 URz3 URz4 URz5	Formatie van Urk, zandige eenheden	Zandige eenheid, hoofdzakelijk bestaande uit midden en grof zand, met weinig fijn zand en grind en een spoor klei, zandige klei en veen.	50-100
APz1	Formatie van Appelscha, zandige eenheden	Zandige eenheid, hoofdzakelijk bestaande uit grof en midden zand, met weinig zandige klei, fijn zand en grind en een spoor klei.	50-100
PZWaz2 PZWaz3	Formatie van Peize en Formatie van Waalre, zandige eenheden	Zandige eenheid, hoofdzakelijk bestaande uit midden en grof zand, met weinig zandige klei, fijn zand en grind en een spoor klei en veen.	50-100
PZc	Formatie van Peize, complexe eenheid	Complexe eenheid, bestaande uit een afwisseling van midden zand, zandige klei, grof zand en klei, met weinig fijn zand en een spoor veen en grind.	5-10 10-25
PZWaz4	Formatie van Peize en Formatie van Waalre, zandige eenheid	Zandige eenheid, hoofdzakelijk bestaande uit midden en grof zand, met weinig zandige klei, fijn zand en grind en een spoor klei en veen.	25-50
MSz2	Formatie van Maassluis, zandige eenheid	Zandige eenheid, hoofdzakelijk bestaande uit midden en grof zand, met weinig klei, zandige klei, fijn zand en schelpen en een spoor bruinkool en grind.	5-10
MSc	Formatie van Maassluis, complexe eenheid	Complexe eenheid, bestaande uit een afwisseling van zandige klei, midden zand, klei en fijn zand, met weinig grof zand en een spoor bruinkool, grind en schelpen.	2.5-5
MSz4	Formatie van Maassluis, zandige eenheid	Zandige eenheid, hoofdzakelijk bestaande uit midden en grof zand, met weinig klei, zandige klei, fijn zand en schelpen en een spoor bruinkool en grind.	5-10



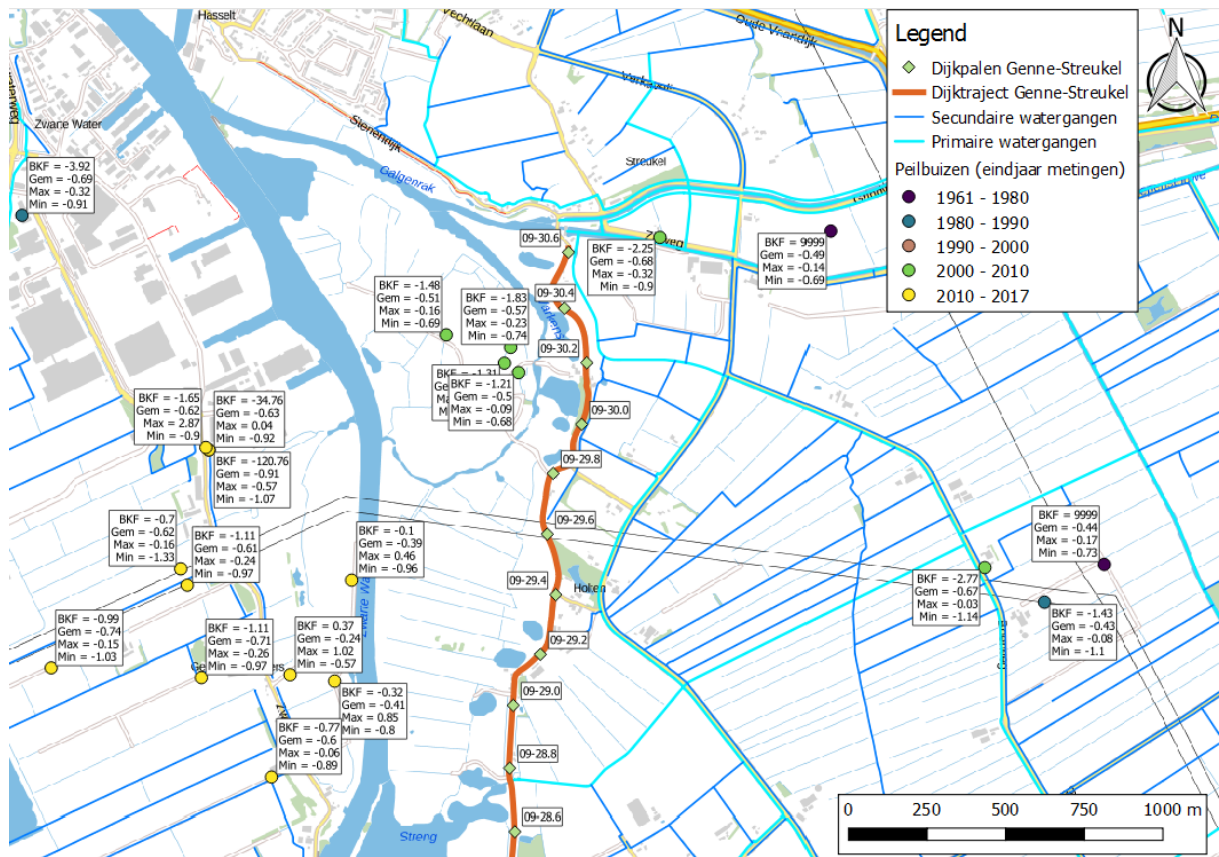
Figuur 5: Verticale doorsnede ondergrondmodel REGIS II; Genne-Streukel



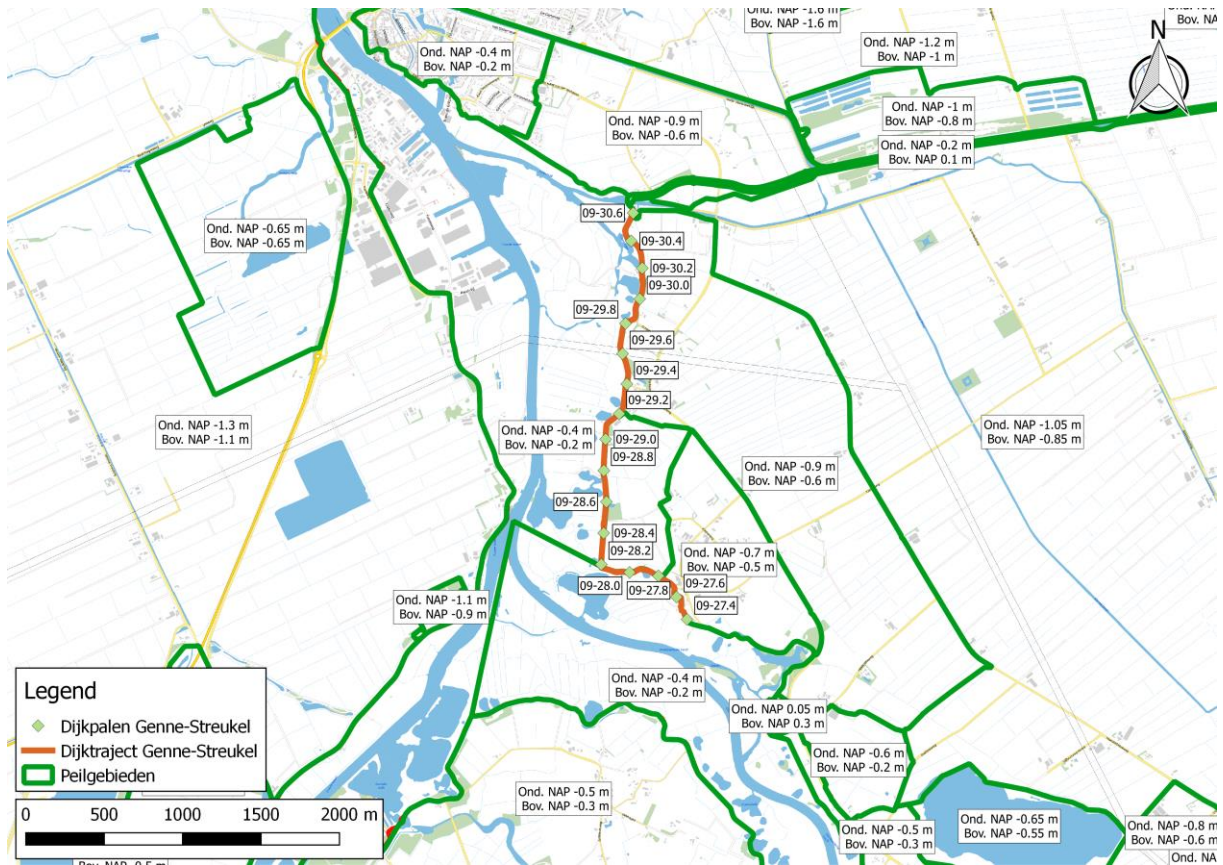
Figuur 6: Verticale doorsnede ondergrondmodel REGIS II; Hasselt-Zwartsluis



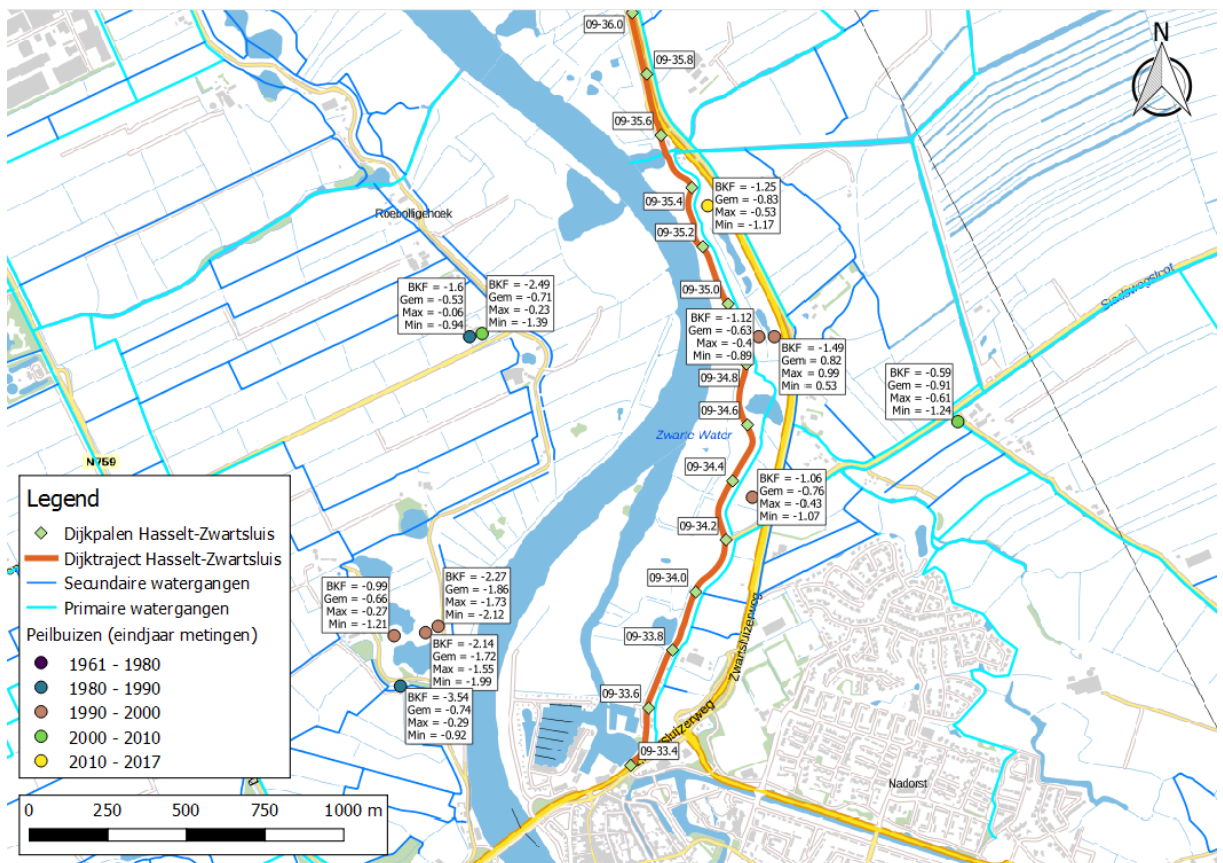
Figuur 7: Peilbuizen en watergangen zuidelijk deeltraject Genne-Streukel



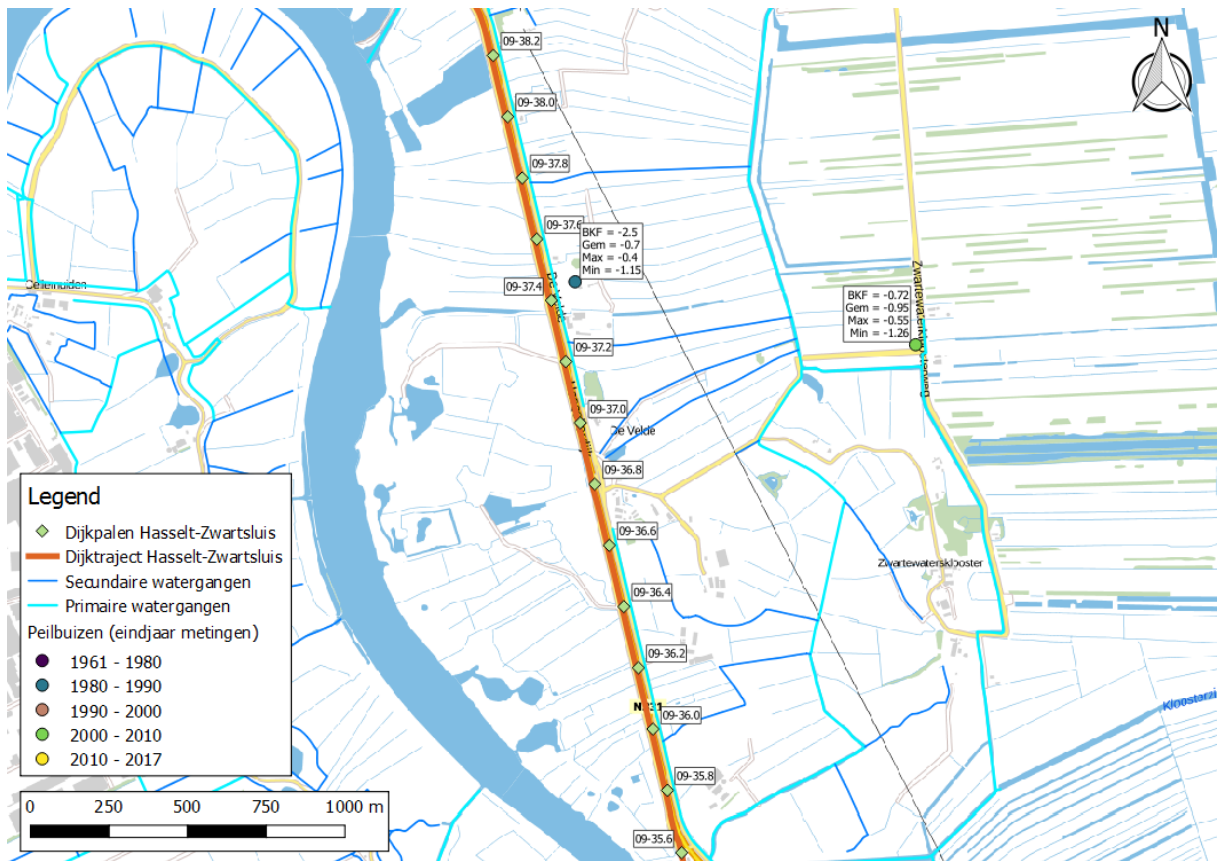
Figuur 8: Peilbuizen en watergangen noordelijk deeltraject Genne-Streukel



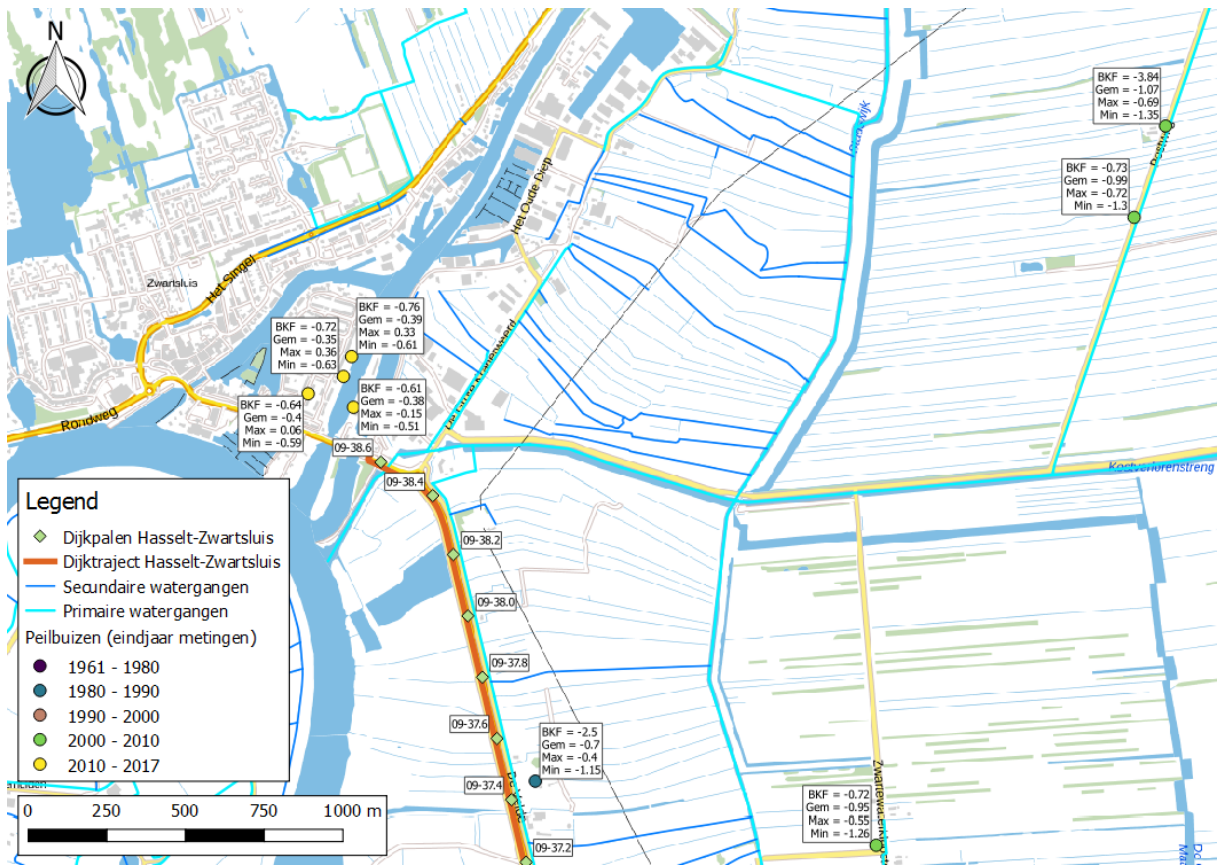
Figuur 9: Peilvakken grondwaterstand traject Genne-Streukel



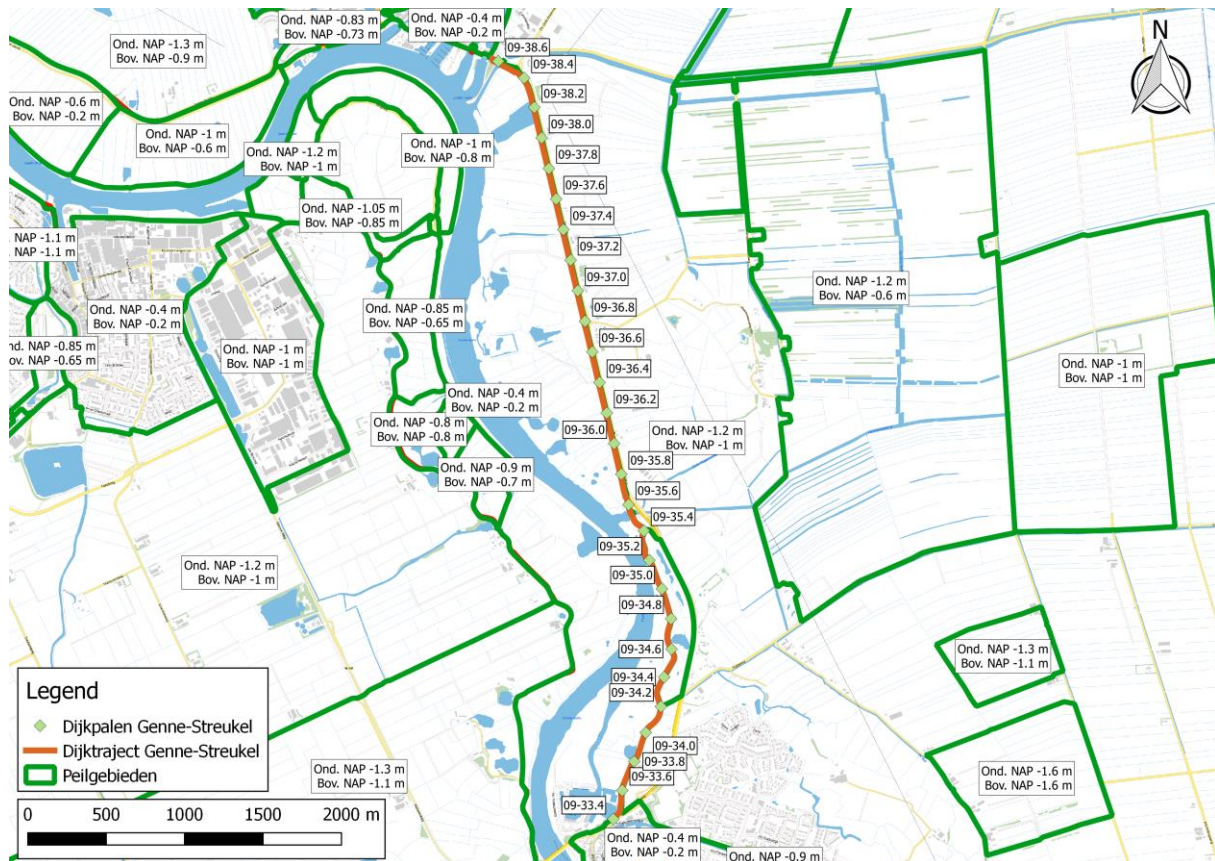
Figuur 10: Peilbuizen en watergangen zuidelijk deeltraject Hasselt-Zwartsluis



Figuur 11: Peilbuizen en watergangen centraal deeltraject Hasselt-Zwartsluis



Figuur 12: Peilbuizen en watergangen noordelijk deeltraject Hasselt-Zwartsluis

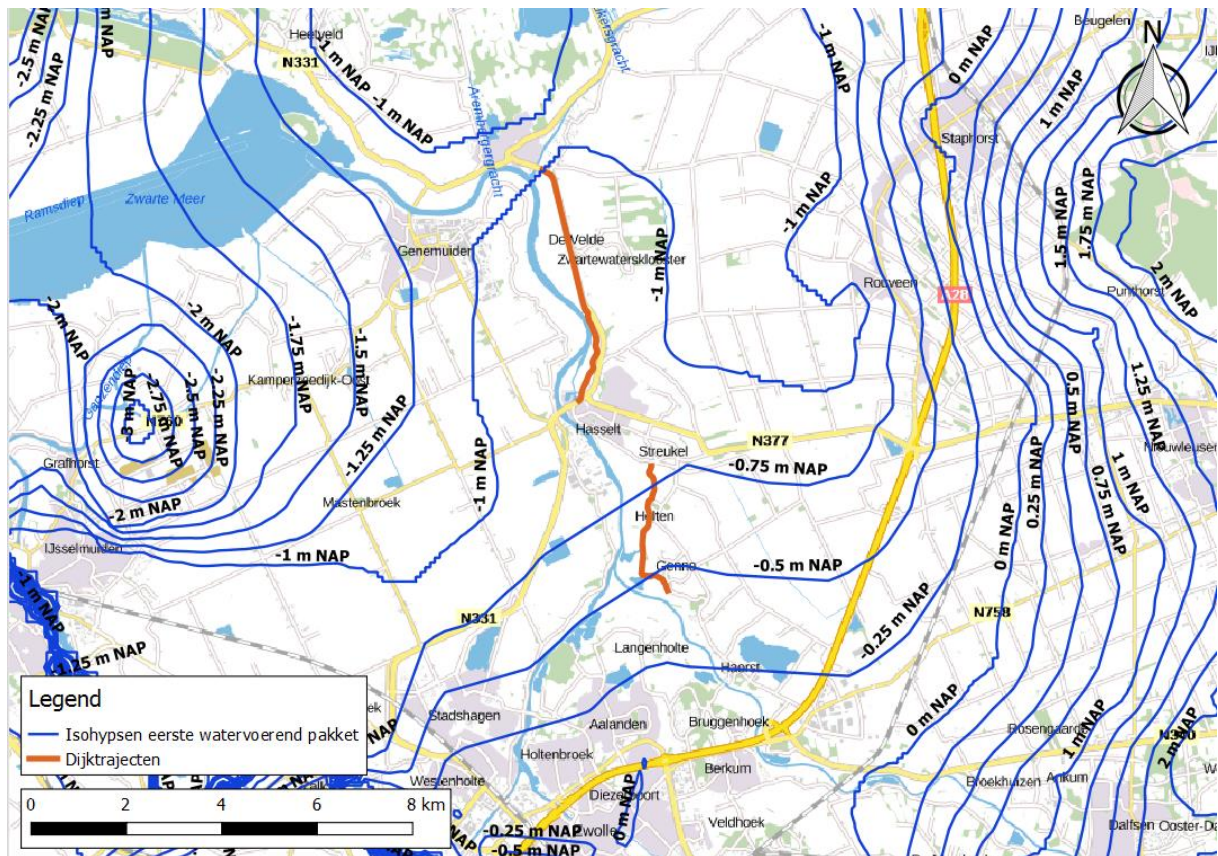


Figuur 13: Peilvakken grondwaterstand traject Hasselt-Zwartsluis

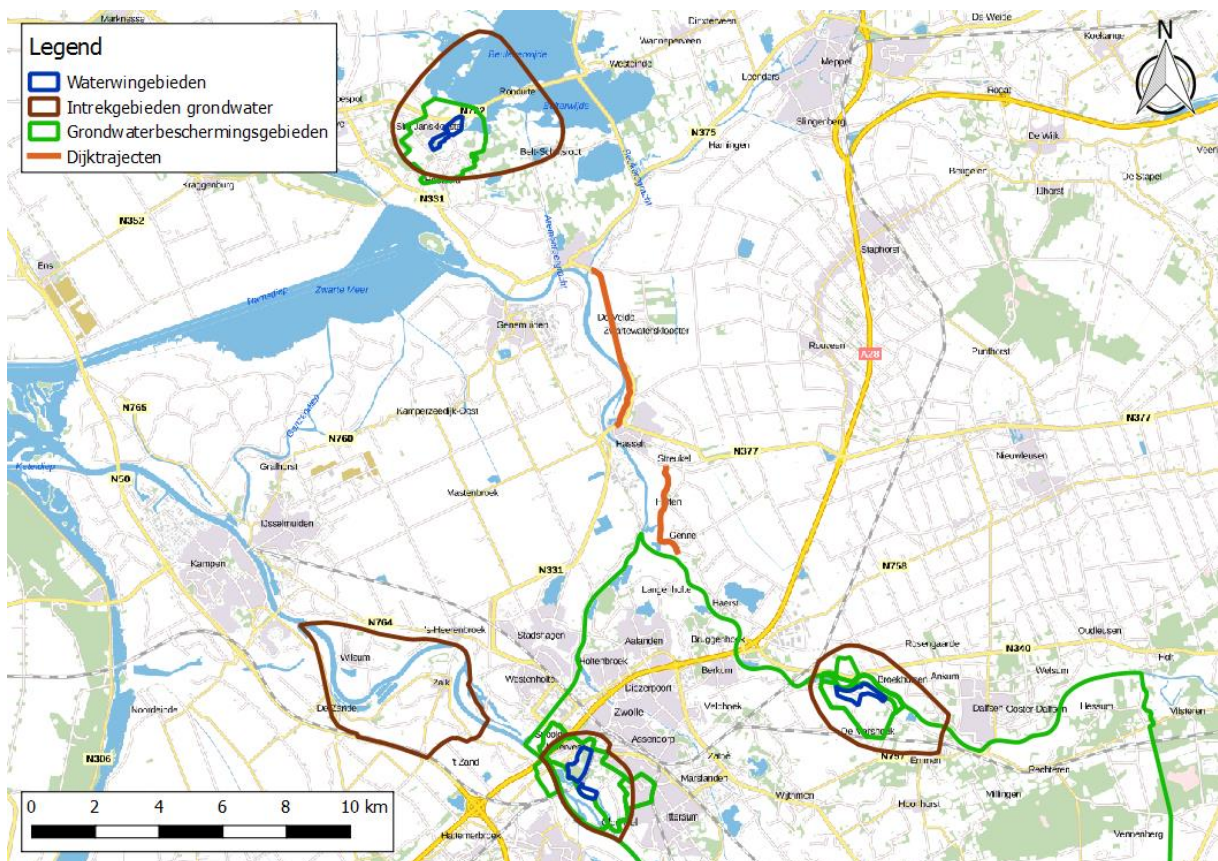
Regionaal geohydrologisch beeld

In Figuur 14 zijn over het regionale beeld de isohypsen van het eerste watervoerende pakket gegeven op 28 april 1995. Dit is circa 3 maanden na het hoogwater van 1995. In Figuur 15 worden de grondwaterwingebieden, -intrekgebieden en -beschermingsgebieden gegeven. Ten westen valt een onttrekkingspunt te zien, welke niet in de grondwaterwingebieden op Figuur 15 terug te vinden is. De verlaging op deze locatie kan verklaard worden aan een fout in de meetdata, aangezien voor de isohypsen de meetdata van de betreffende dag zijn gebruikt. Bij beperkte data rondom een locatie, wordt de isohypse gebaseerd op dit meetpunt.

Rondom de dijktrajecten wordt in het noorden een stijghoogte van circa -0,75 tot -1,00 m NAP gevonden. Het zuidelijk traject Genne-Streukel ligt stroomopwaarts en vertoont een stijghoogte van circa -0,50 tot -0,75 m NAP. De isohypsen lopen in het noordelijk traject voornamelijk parallel aan de Vecht, waarbij het zuidelijk traject een groter effect van afwatering vertoont evenwijdig aan de Vecht



Figuur 14: Regionale grondwaterisohypsen 28 april 1995



Figuur 15: Overzicht grondwaterwin-, grondwaterbeschermings- en waterwingebieden.

4 Parameters

4.1 Hoogte maaiveld

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

- Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN3)
- Satellietbeelden en luchtfoto's
- Geomorfologische kaart

De gegevens uit Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN3) zijn ingeladen in een Geografisch Informatie Systeem (GIS). Voor zowel het traject Genne-Streukel als het traject Hasselt-Zwartsluis 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.

Genne-Streukel

De hoogte van het maaiveld op basis van Actueel Hoogtebestand Nederland is gegeven in Figuur 18 en Figuur 19. In het achterland ligt het maaiveld globaal op NAP +0.1 m tot NAP +0.6 m. Verhogingen in het maaiveld komen voor ter plaatse van bebouwing in Genne en Holten en ter plaatse van de aansluitingen van de Verkavelingsweg en de Schrotenweg op de Gennerdijk.

De langs het traject voorkomende landvormen zijn gegeven in Figuur 20. In de uiterwaard ten zuiden van sluis Gennegerzijk (km 28.8) zijn welvingen in rivierafzettingen (L43) aanwezig. In de uiterwaard ten noorden van sluis Gennegerzijk (km 28.8) is een vlakte van Holocene rivierafzettingen (M45) aanwezig met nabij de rivier verschillende kronkelwaardcomplexen van ruggen en geulen (L42). Tevens zijn verschillende restgeulen (R43) aanwezig. Dit zijn verlaten rivierbeddingen die geheel of gedeeltelijk zijn verzand of dichtgeslibd, zijn verland of zijn opgevuld met veen. In het binnendijkse riviergebied komen eolische rivierduinen (B57) en dekzandwelvingen (L51) voor. Ter hoogte van de Streng (km 28.3-28.8) is een rivierkom- en oeverwalachtige vlakte (M48) aanwezig.

Hasselt-Zwartsluis

De hoogte van het maaiveld op basis van Actueel Hoogtebestand Nederland is gegeven in Figuur 23 en Figuur 24. In het achterland ligt het maaiveld globaal op NAP -0.7 m tot NAP -0.3 m. Verhogingen in het maaiveld komen voor ter plaatse van bebouwing in Hasselt, Kievitsnest en De Velde en ter plaatse van de Zwartsluizerweg/Hasselterdijk (N331).

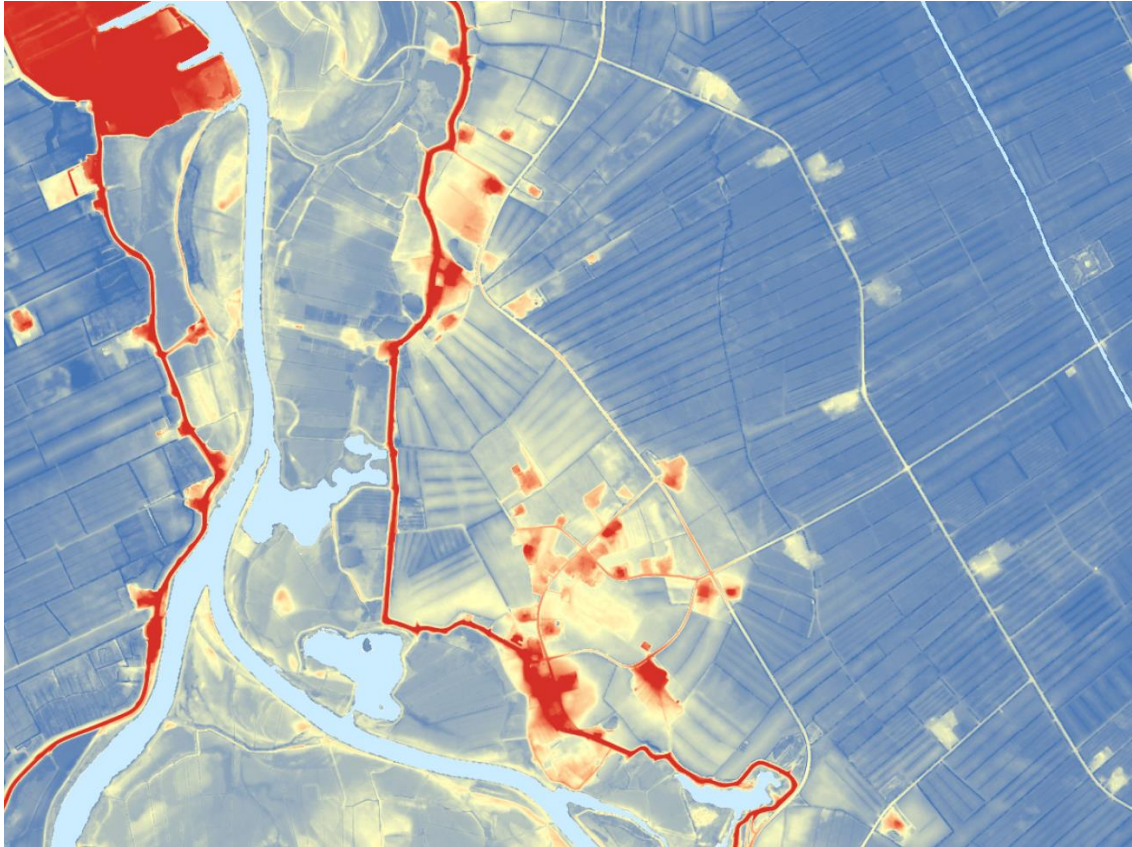
De langs het traject voorkomende landvormen zijn gegeven in Figuur 25. Het buitendijkse rivierengebied bestaat uit een vlakte van Holocene rivierafzettingen (M45) met verschillende oeverwallen (B45) en een dekzandrug (B53). Nabij de rivier zijn verschillende moerasachtige vlakten (M84) aanwezig. In het binnendijkse gebied tussen Hasselt en De Velde (km 33.5-36.5) ligt een ontgonnen veenvlakte (M81) met enkele geïsoleerde rivierduinen (B57). Ter hoogte van De Velde (km 36.5-36.9) is een doorbraakwaaier (G41) aanwezig. Deze is ontstaan tijdens een dijkdoorbraak waarbij het materiaal uit het diepe kolk gat in de dijk in een waaier over het binnendijkse land is verspreid. In het binnendijkse gebied tussen De Velde en Zwartsluis (km 36.9-38.6) is een rivierkom- en oeverwalachtige vlakte (M48) aanwezig.



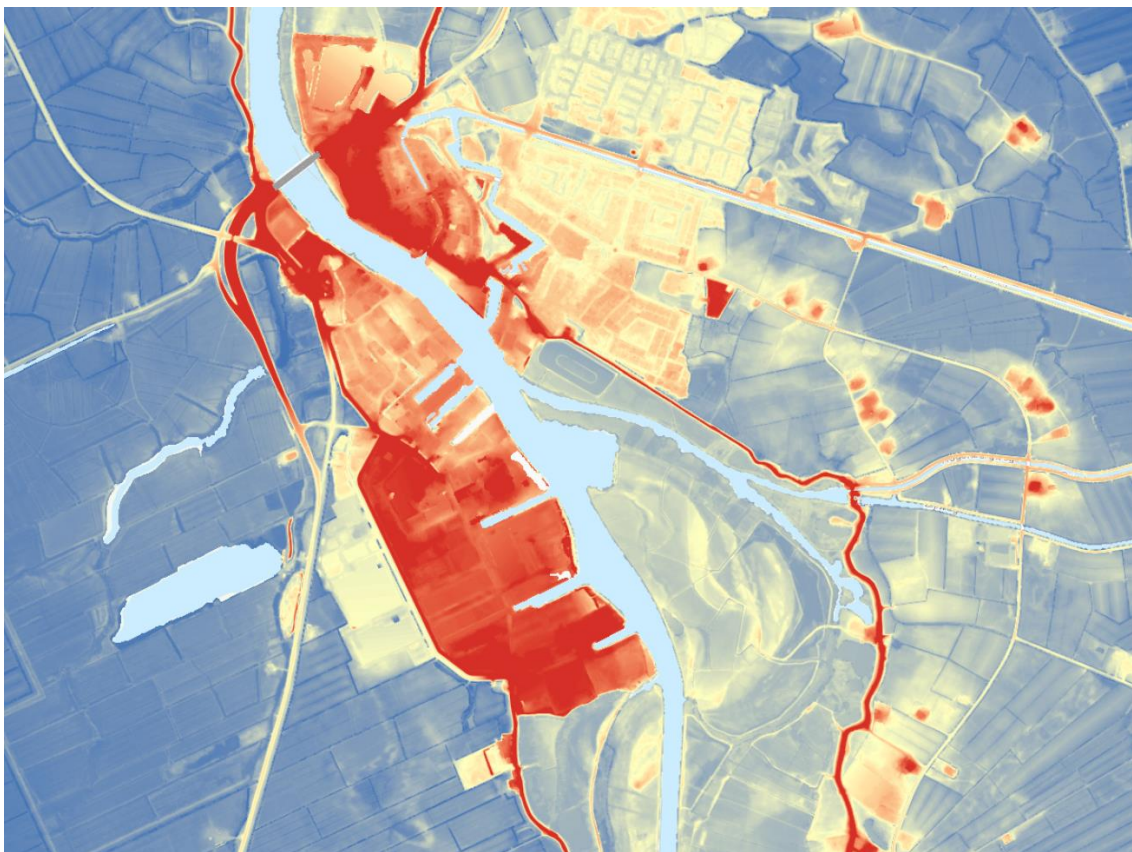
Figuur 16: Overzicht terrein (bron: Google Earth); Haerst-Holten



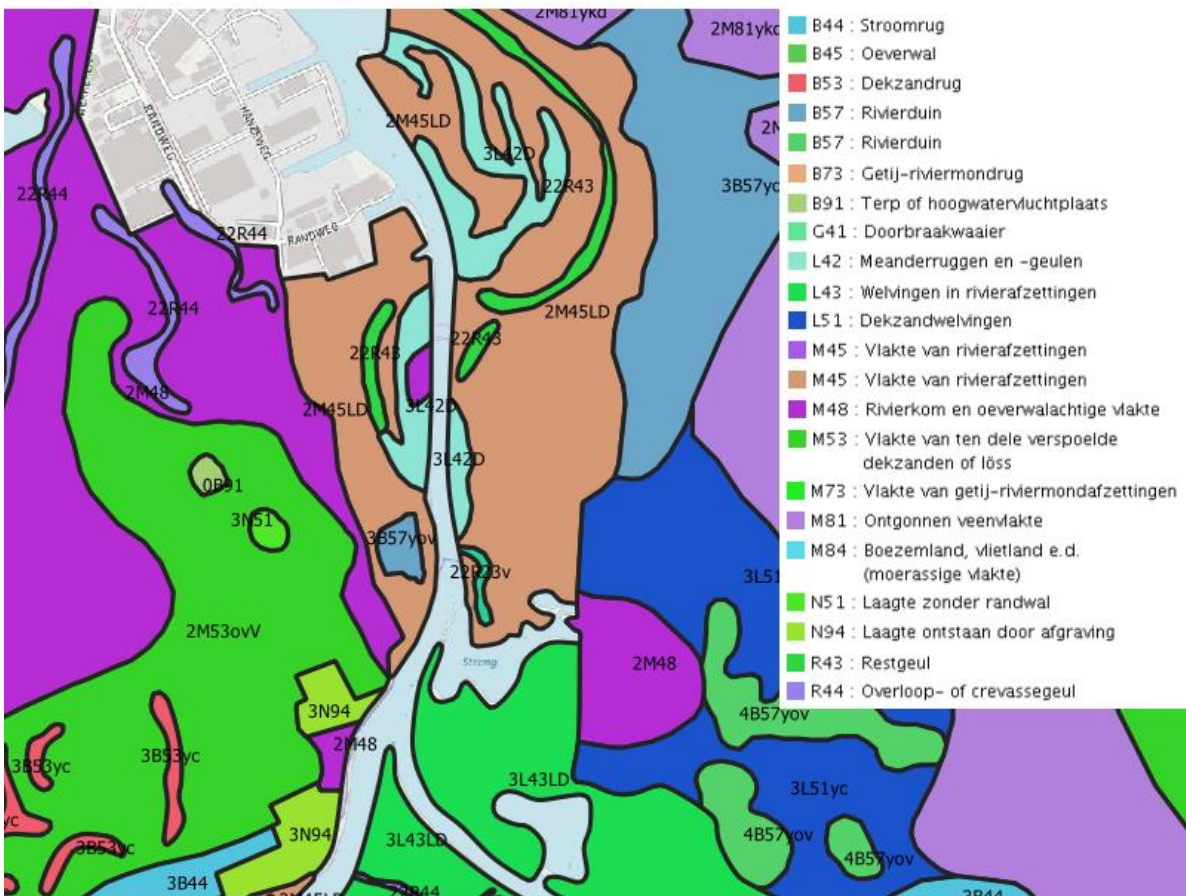
Figuur 17: Overzicht terrein (bron: Google Earth); Holten-Hasselt



Figuur 18: AHN maiveld (blauw: laag, rood: hoog); Genne-Holten



Figuur 19: AHN maiveld (blauw: laag, rood: hoog); Holten-Hasselt



Figuur 20: Geomorfologische kaart; Genne-Streukel



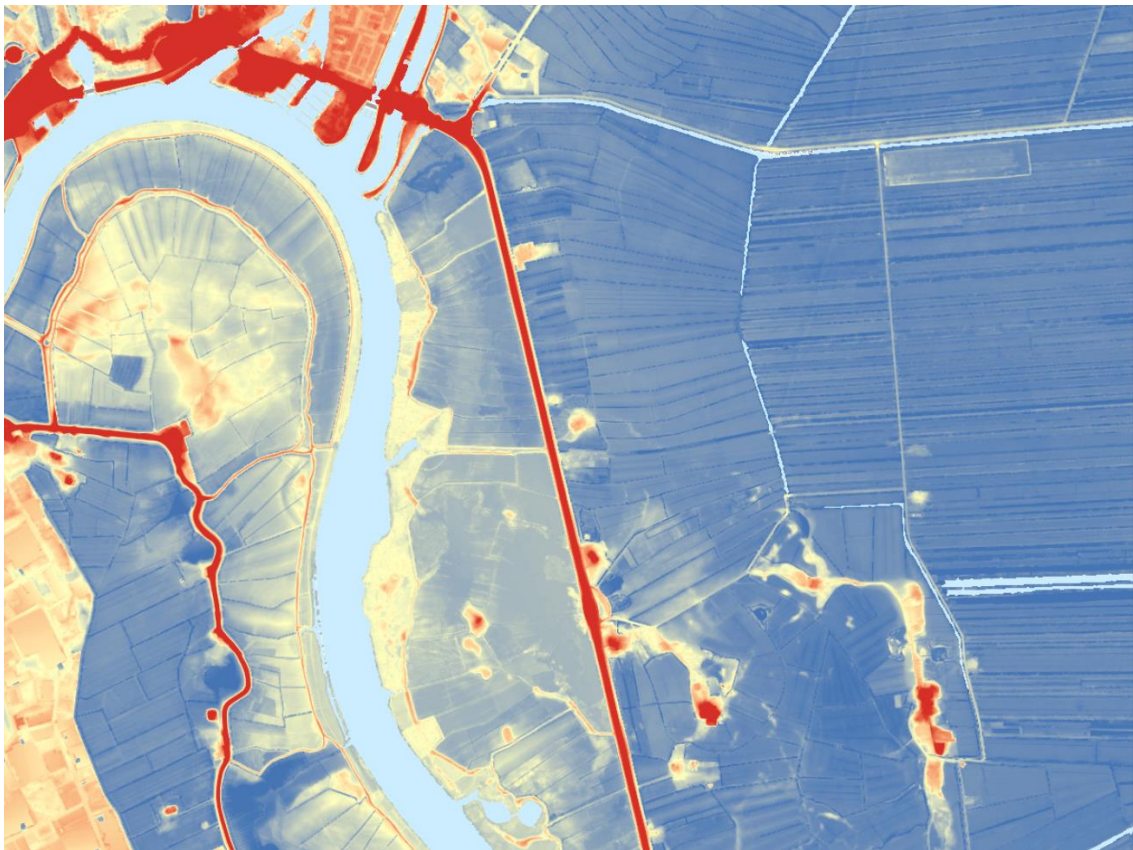
Figuur 21: Overzicht terrein (bron: Google Earth); Hasselt-De Velde



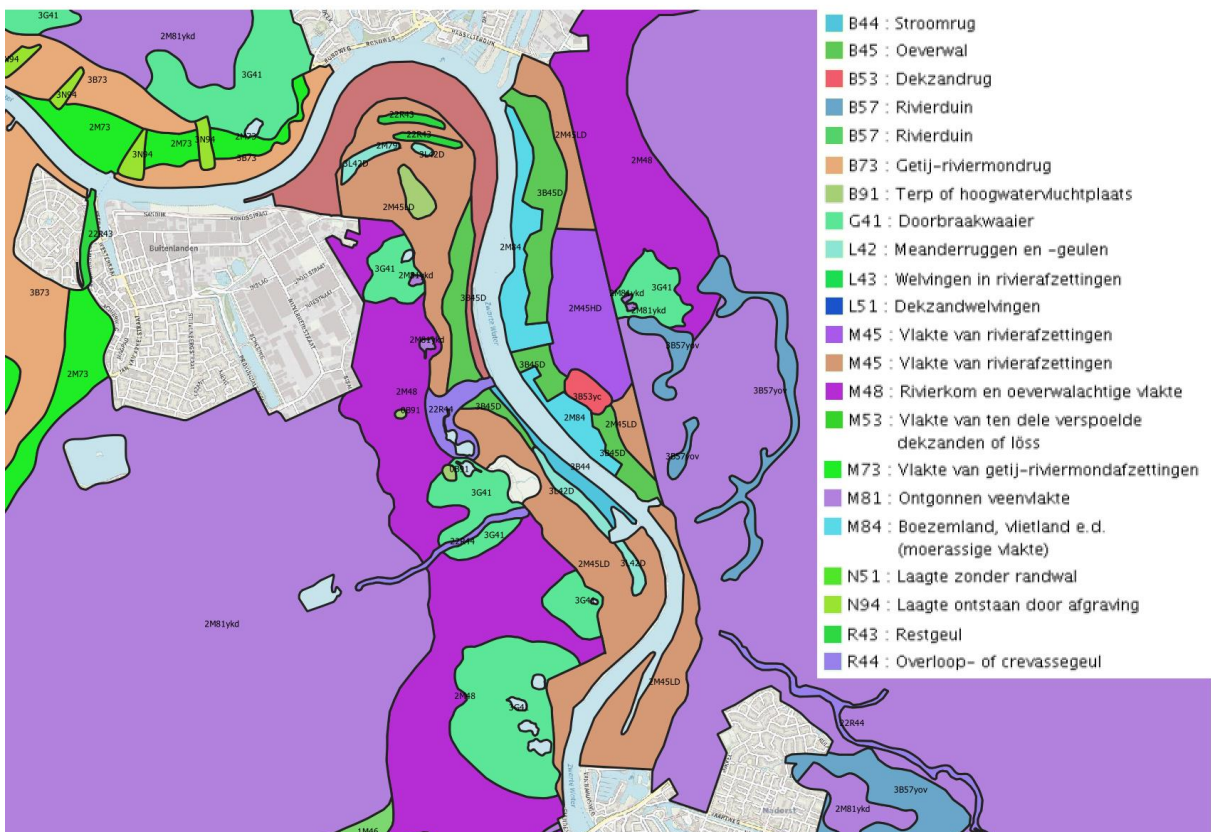
Figuur 22: Overzicht terrein (bron: Google Earth); De Velde-Zwartsluis



Figuur 23: AHN maaveld (blauw: laag, rood: hoog); Hasselt-De Velde



Figuur 24: AHN maaveld (blauw: laag, rood: hoog); De Velde-Zwartsluis



Figuur 25: Geomorfologische kaart; Hasselt-Zwartsluis

4.2 Onderkant deklaag

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

- Stochastisch Ondergrond Schematisatie (WBI-SOS)
- Geotechnisch profiel
- Geotechnisch onderzoek
- Zandbanenkaart

Voor het traject Genne-Streukel is vanuit de zandbanenkaart geen informatie beschikbaar; de kaart beslaat alleen de uiterwaarden langs het traject Hasselt-Zwartsluis.

Genne-Streukel

Een vergelijking tussen de onderkant van de deklaag op basis van de beschikbare boringen en sonderingen en de onderkant van de deklaag op basis van het geotechnisch profiel is gegeven in Figuur 27 en Figuur 28). De overeenkomst is in het algemeen redelijk. Volgens het geotechnisch profiel varieert de dikte van de deklaag in het achterland tussen 0 m en 3.5 m. De deklaag is dun (minder dan 1 m dik) of afwezig ter plaatse van km 28.1-28.6, km 29.3-29.6 en km 29.9-30.7.

De bodemopbouw op basis van WBI-SOS is gegeven in Figuur 26. Voor het traject Genne-Streukel is SOS segment 9008 van toepassing. Volgens scenario 9008_1D1 is geen deklaag aanwezig. Volgens scenario 9008_1D2 ligt de onderkant van de deklaag gemiddeld op NAP -0.25 m (maximaal: NAP +0.0 m; minimaal: NAP -0.75 m).

Hasselt-Zwartsluis

Een vergelijking tussen de onderkant van de deklaag op basis van de beschikbare boringen en sonderingen en de onderkant van de deklaag op basis van het geotechnisch profiel is gegeven in Figuur 27 en Figuur 28). De overeenkomst is in het algemeen redelijk. Volgens het geotechnisch profiel varieert de dikte van de deklaag in het achterland tussen 0 m en 4.8 m. De deklaag is dun (minder dan 1 m dik) of afwezig ter plaatse van km 36.4-37.0.

De bodemopbouw op basis van WBI-SOS is gegeven in Figuur 26. Voor het traject Hasselt-Zwartsluis is SOS segment 9009 van toepassing. Volgens scenario 9009_1D1, 9009_1D2 en 9009_1D3 ligt de onderkant van de deklaag gemiddeld op NAP -6 m (maximaal: NAP -5 m; minimaal: NAP -7 m). Volgens scenario 9009_1D4 ligt de onderkant van de deklaag gemiddeld op NAP -11.5 m (maximaal: NAP -10 m; minimaal: NAP -13 m).

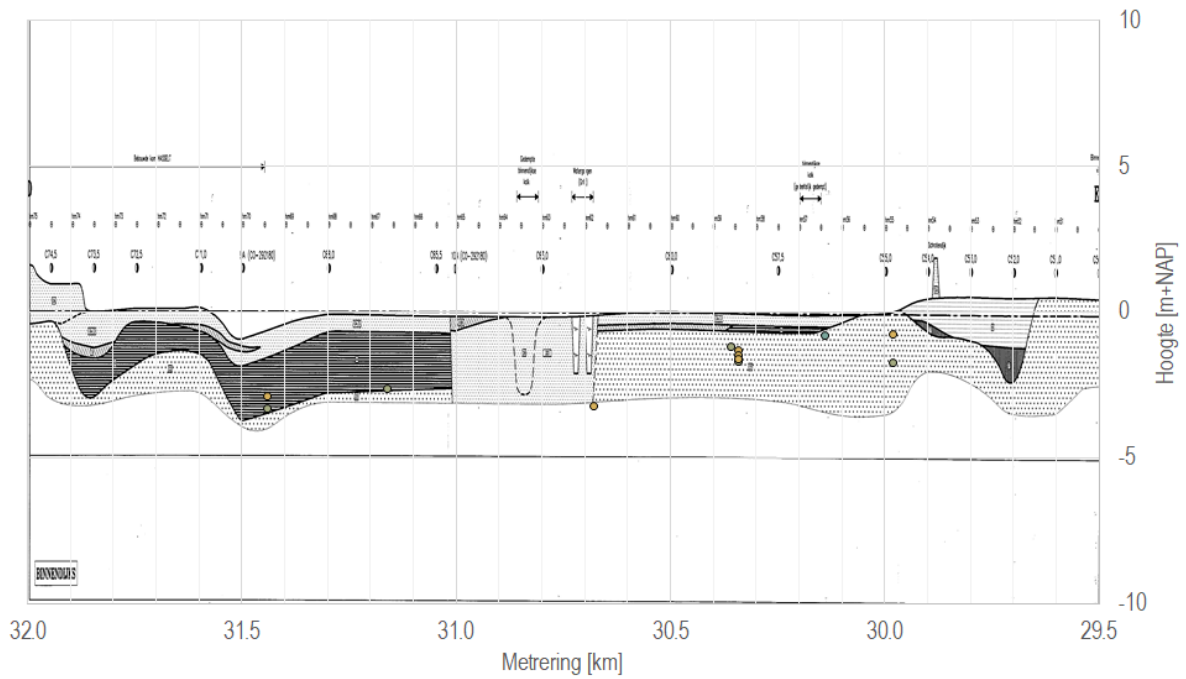
De zanddiepte op basis van de zandbanenkaart is gegeven in Figuur 32. Voor het traject Hasselt-Zwartsluis varieert de zanddiepte in het voorland tussen 1 m en 7 m. De zanddiepte is het kleinst (pleistoceen zand op een diepte van 1-2 m beneden maaiveld) ter plaatse van km 36.0-37.8.

Tabel 6: Grondsoorten op basis van WBI-SOS

WTI-SOS code	Omschrijving	Kenmerken (geldend voor het vrije veld, op enige meters diep)	Formatie
H_Rk_k (-)	Hogere komafzettingen	Klei met silt, met soms geïsoleerde zand en veenlaagjes van 0.1-0.3 m dik, wrijvingsgetal 2-4%, conus <1 MPa	Echteld
H_Mp_k (-)	Kleiige getijdenplaat- en kwelderafzettingen	Klei, zacht tot matig stevig, vaak zandig, kleef ca. 2 - 5 %, conus <-1 MPa, plaatselijk tot 2 MPa, pakket bestaat soms uit lagen met meer en minder plantenresten.	Naaldwijk
H_Mr_kz (-)	Getijdenrestgeulopvulling	Afwisseling van zand en kleilagen met regelmatig organische klei- en veenlagen. De afzetting kent een grote variatie, kleef ca. 1-4% met uitschieters naar 6%, conus 1-5 MPa met soms uitschieters tot 10	Naaldwijk
P_Rk_k&s (-)	Kleiige en siltige komafzetting	Klei, vaak zandig, met zandinsluitingen tot 1.5 m. Wrijvingsgetal 2-4%, conus 1-4 MPa. Zeer stevig en ondoorlatend.	Kreftenheye, Laag van Wijchen
H_Vhv_v (-)	Veen	Veen, slap, kleef variabel meest > 5 %, conus < 1MPa.	Nieuwkoop
P_Wdz_zf (8)	Matig fijnzandige windafzetting (dekzand)	Zand, fijn, los tot matig dicht, kleef < 1%, conus ~ 5-15 MPa, met uitschieters naar 20 MPa. Meest als een 1-3 m dikke laag met over afstanden van meer dan 200 m weinig variatie in korrelgrootte en meestal een geringe variatie in dikte.	Boxtel, Laagpakket van Wierden; Drachten
P_Wdz_zf (10)	Matig fijnzandige windafzetting (dekzand)	Zand, fijn, los tot matig dicht, kleef < 1%, conus 5-15 MPa, met uitschieters naar 20 MPa. Meest als een 1-3 m dikke laag met over afstanden van meer dan 200 m weinig variatie in korrelgrootte en meestal een geringe variatie in dikte.	Boxtel, Laagpakket van Wierden; Drachten
P_Rg_zg (15)	Zeer grof tot uiterst grof rivierbeddingszand	Zand, middel tot grof, meestal met grindinsluitingen, conus >20 MPa. Opgebouwd uit sublagen met grote verschillen in sondeerwaarden en korrelgrootte. Fluctuaties van > 5 MPa over 1-2 m hoogte en over afstanden van 5-20 m.	Kreftenheye; Beegden; Urk; Sterksel; Waalre
P_Rg_zg (35)	Zeer grof tot uiterst grof rivierbeddingszand	Zand, middel tot grof, meestal met grindinsluitingen, conus >20 MPa. Opgebouwd uit sublagen met grote verschillen in sondeerwaarden en korrelgrootte. Fluctuaties van > 5 MPa over 1-2 m hoogte en over afstanden van 5-20 m.	Kreftenheye; Beegden; Urk; Sterksel; Waalre
P_Rg_zg (50)	Zeer grof tot uiterst grof rivierbeddingszand	Zand, middel tot grof, meestal met grindinsluitingen, conus >20 MPa. Opgebouwd uit sublagen met grote verschillen in sondeerwaarden en korrelgrootte. Fluctuaties van > 5 MPa over 1-2 m hoogte en over afstanden van 5-20 m.	Kreftenheye; Beegden; Urk; Sterksel; Waalre
P_Rg_zg (70)	Zeer grof tot uiterst grof rivierbeddingszand	Zand, middel tot grof, meestal met grindinsluitingen, conus >20 MPa. Opgebouwd uit sublagen met grote verschillen in sondeerwaarden en korrelgrootte. Fluctuaties van > 5 MPa over 1-2 m hoogte en over afstanden van 5-20 m.	Kreftenheye; Beegden; Urk; Sterksel; Waalre
P_Ggs_zg (100)	Gestuwde afzetting	Veelal gestuwde rivierafzettingen. Afwisselend gelaagde afzettingen in pakketten van 1-10 m dik. Vaak grof zand, maar ook kleilagen. De lagen staan onder een steile helling van 10-45 graden. Sondeerstaten vertonen over afstanden van 5-20 m zeer grote variatie.	Drente

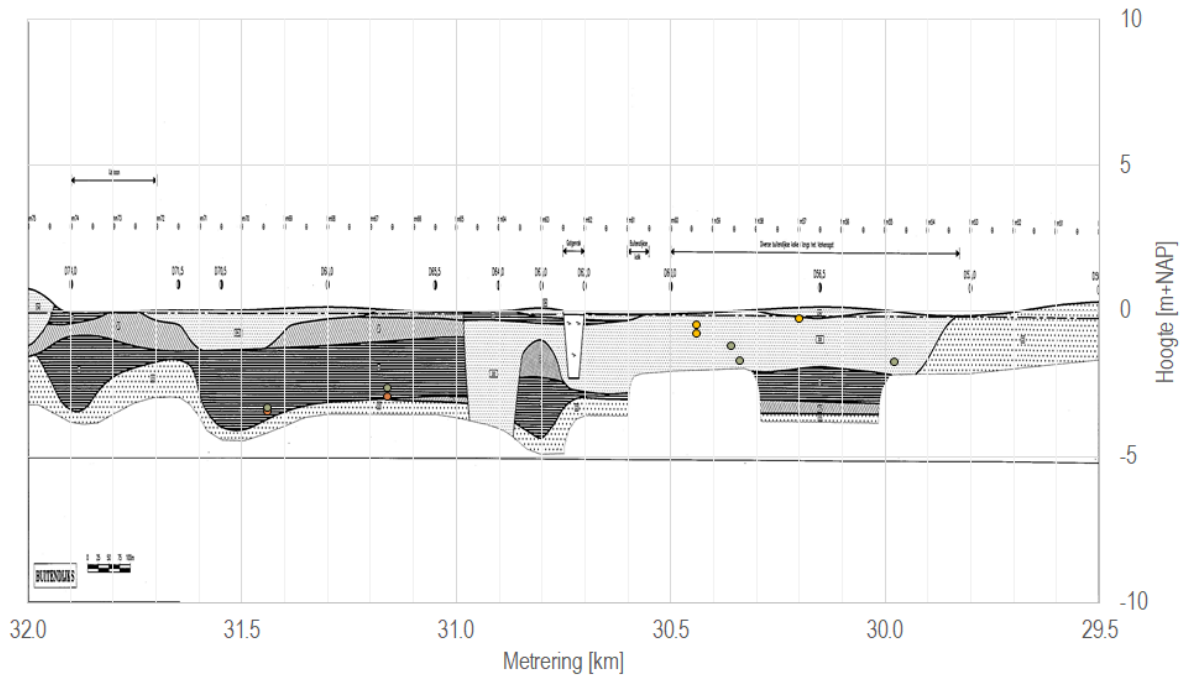
Geotechnisch profiel D-E; binnendijks

● C ● D ● E



Geotechnisch profiel D-E; buitendijks

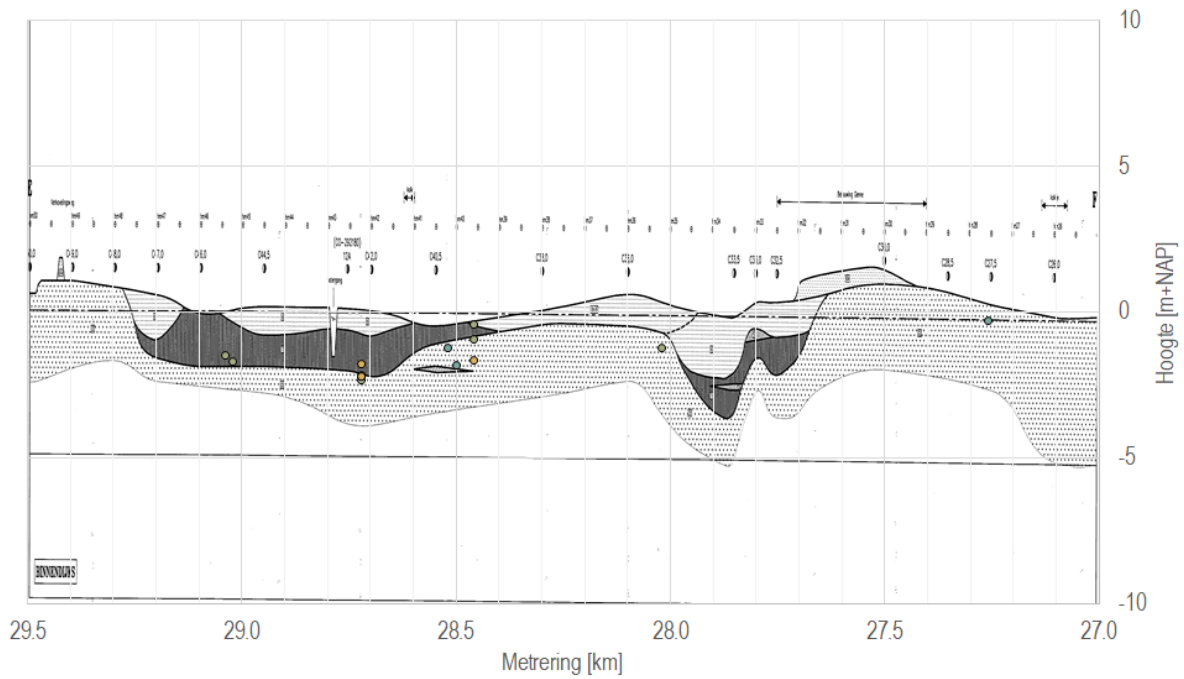
● A ● B ● C



Figuur 27: Onderkant deklaag op basis van boringen en sonderingen (A: voorland; B: buitenteen; C: kruin; D: binnenteen; E: achterland) versus onderkant deklaag op basis van geotechnisch profiel; Genne-Streukel (1)

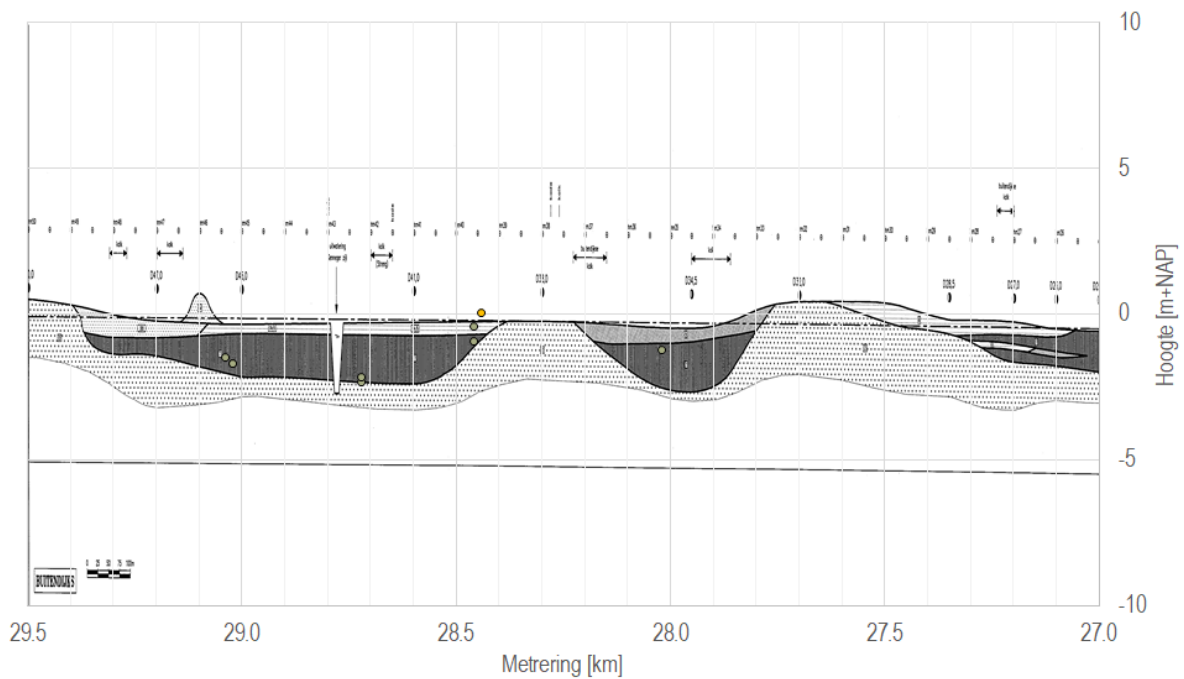
Geotechnisch profiel E-F; binnendijks

● C ● D ● E



Geotechnisch profiel E-F; buitendijks

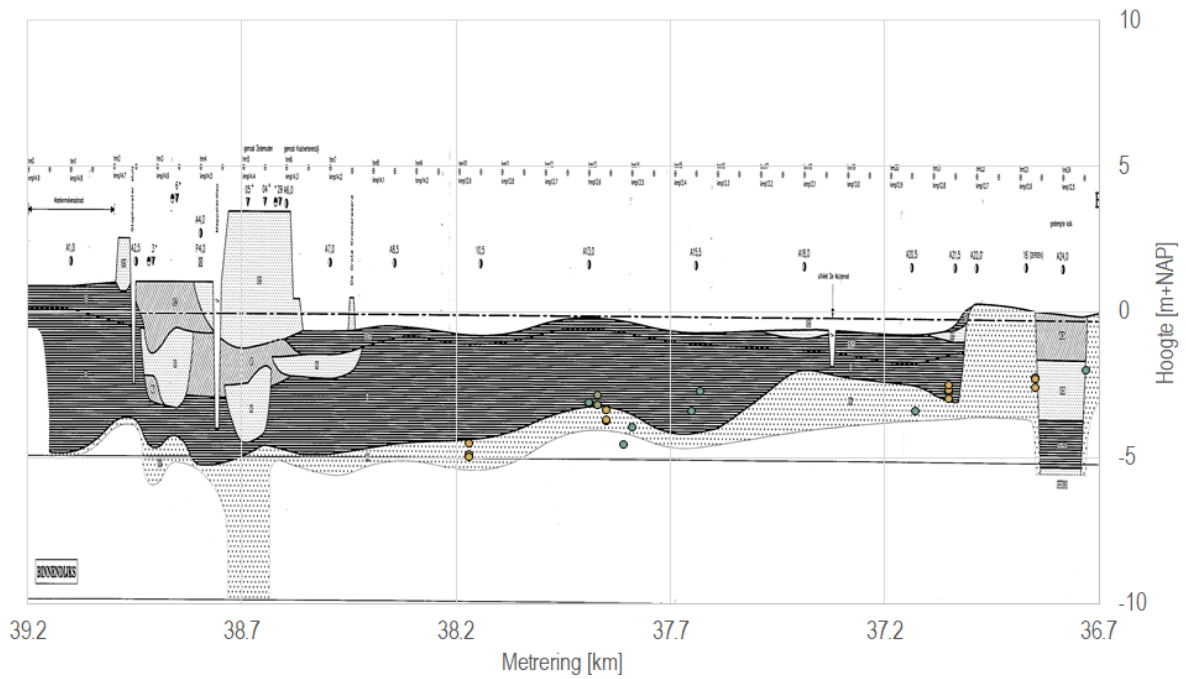
● A ● B ● C



Figuur 28: Onderkant deklaag op basis van boringen en sonderingen (A: voorland; B: buitenteen; C: kruin; D: binnenteen; E: achterland) versus onderkant deklaag op basis van geotechnisch profiel; Genne-Streukel (2)

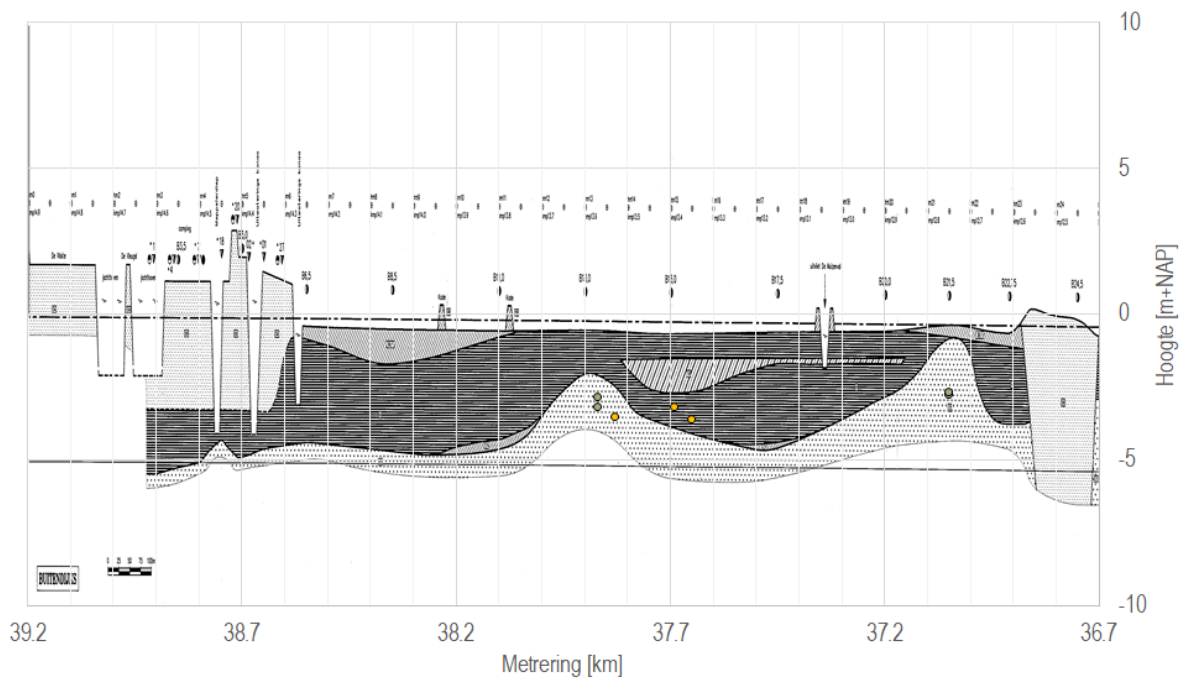
Geotechnisch profiel A-B; binnendijks

● C ● D ● E



Geotechnisch profiel A-B; buitendijks

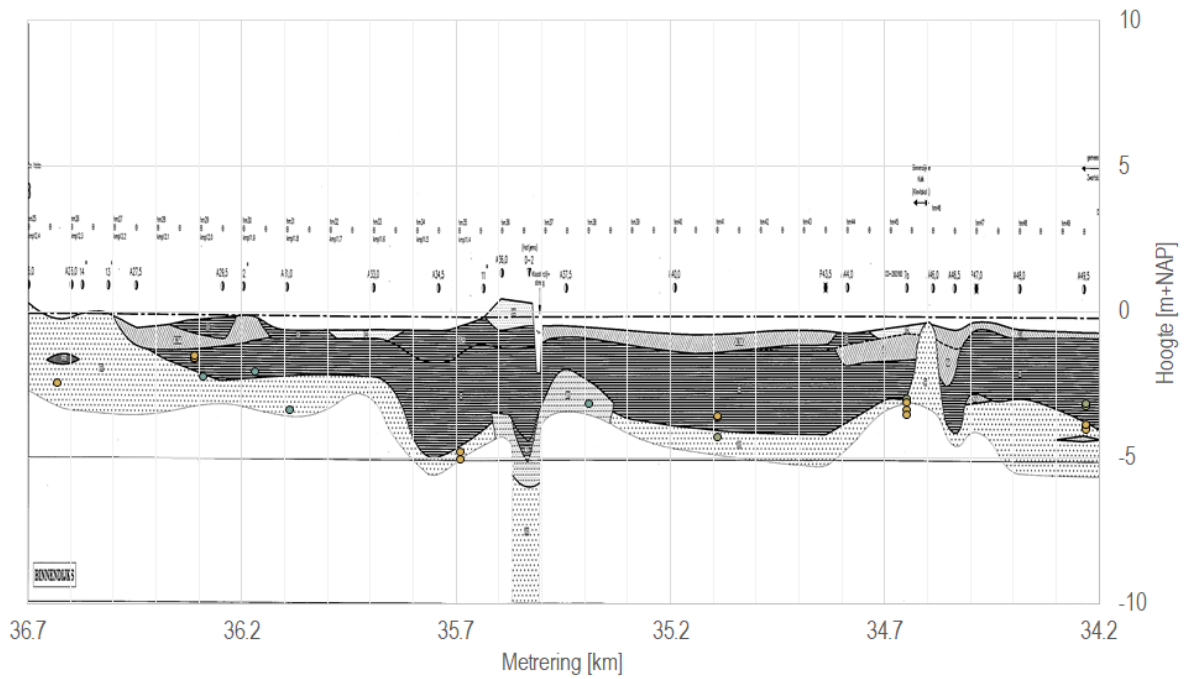
● A ● B ● C



Figuur 29: Onderkant deklaag op basis van boringen en sonderingen (A: voorland; B: buitenteen; C: kruin; D: binnenteen; E: achterland) versus onderkant deklaag op basis van geotechnisch profiel; Hasselt-Zwartsluis (1)

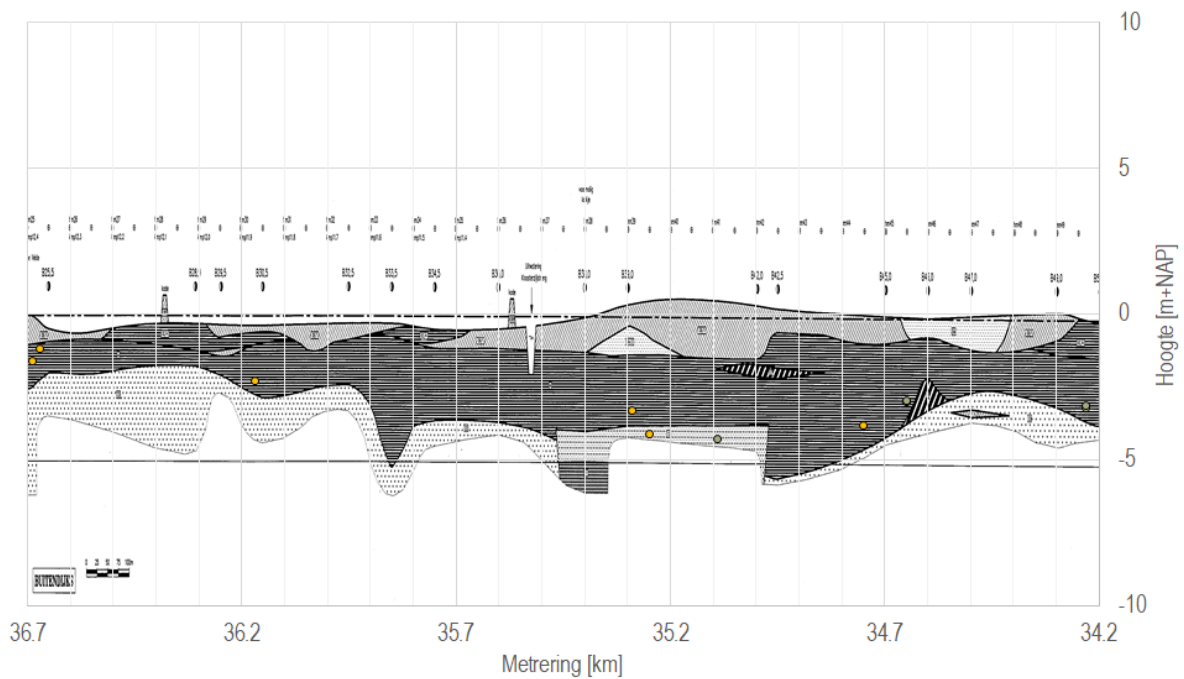
Geotechnisch profiel B-C; binnendijks

● C ● D ● E



Geotechnisch profiel B-C; buitendijks

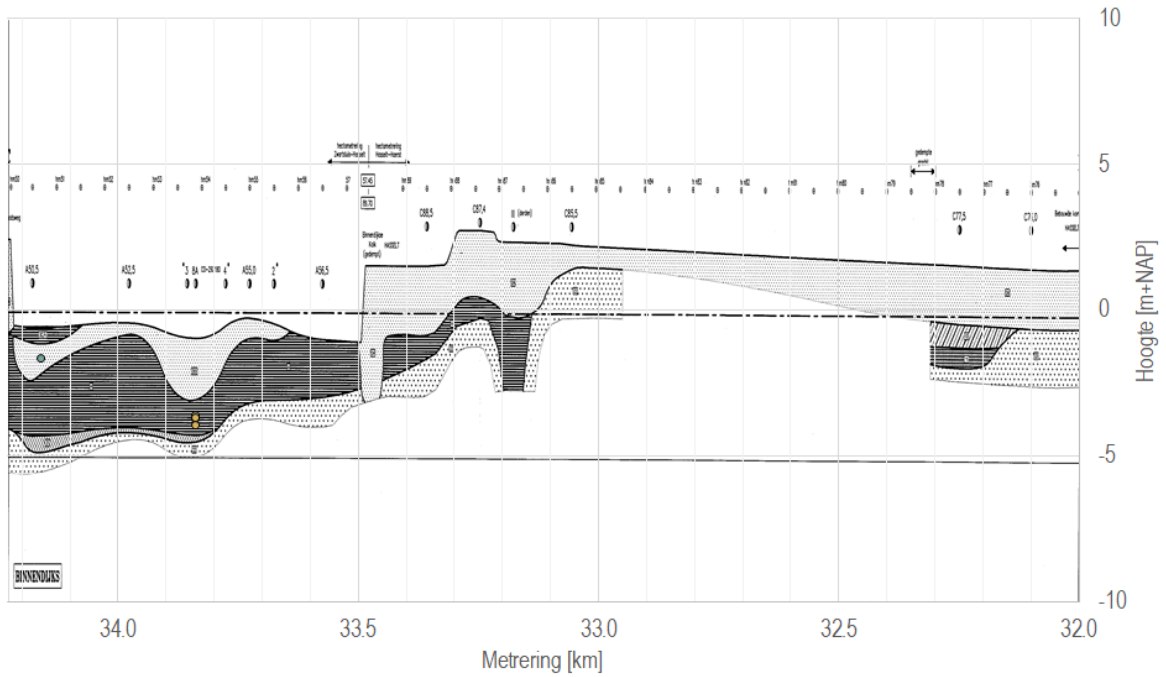
● A ● B ● C



Figuur 30: Onderkant deklaag op basis van boringen en sonderingen (A: voorland; B: buitenteen; C: kruin; D: binnenteen; E: achterland) versus onderkant deklaag op basis van geotechnisch profiel; Hasselt-Zwartsluis (2)

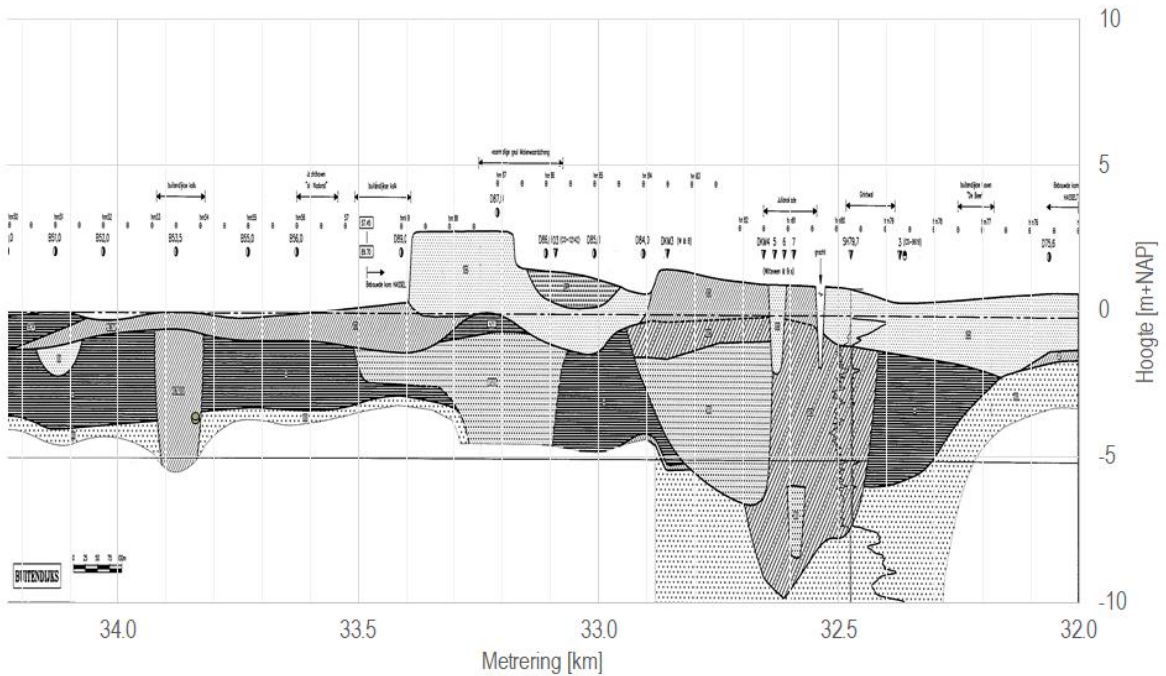
Geotechnisch profiel C-D; binnendijks

● C ● D ● E

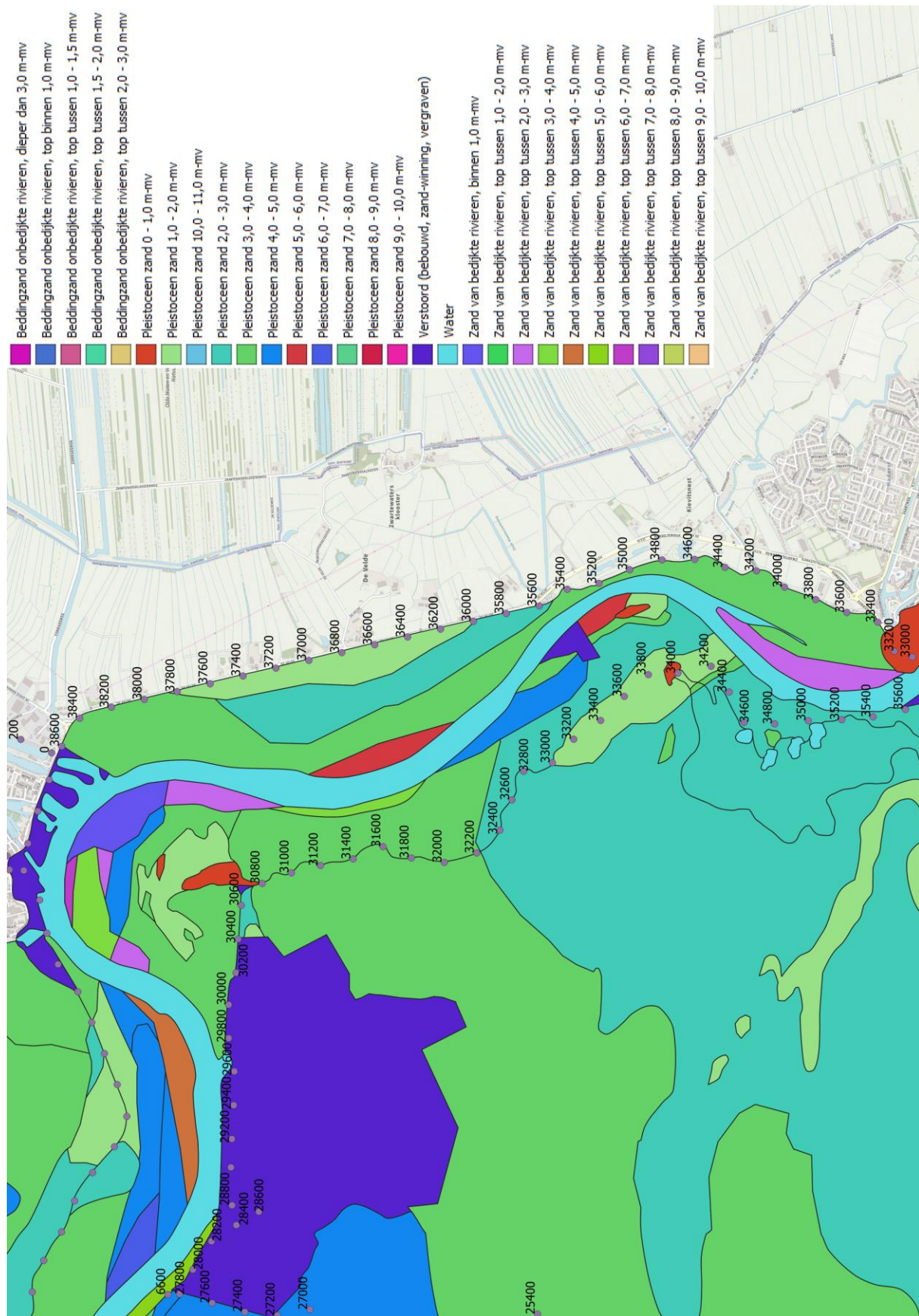


Geotechnisch profiel C-D; buitendijks

● A ● B ● C



Figur 31: Onderkant deklaag op basis van boringen en sonderingen (A: voorland; B: buitenteen; C: kruin; D: binnenteen; E: achterland) versus onderkant deklaag op basis van geotechnisch profiel; Hasselt-Zwartsluis (3)



Figuur 32: Zanddiepte op basis van zandbanenkaart; Hasselt-Zwartsluis

4.3 Buitenwaterstand

Met betrekking tot de buitenwaterstand zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

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

In de derde toetsronde zijn de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 aangehouden. Echter, in deze gevoeligheidsanalyse wordt voor het niveau van de buitenwaterstand de ondergrenswaarde conform de Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 aangehouden. De ondergrens- en signaleringswaarden zijn bepaald met Ringtoets v17.2.2. Hierbij zijn de statistische onzekerheden en modelonzekerheden conform WBI 2017 in rekening gebracht.

De dijken in de Vechtdelta worden bedreigd door hoge afvoeren op de Overijsselse Vecht (al dan niet in combinatie met hoge afvoeren op de IJssel), stormen op het IJsselmeer of combinaties van beide. Merk op dat afvoeren op de IJssel en de Vecht gecorreleerd zijn; hetzelfde geldt het meerpeil op het IJsselmeer en afvoeren [6].

In de Vechtdelta bevindt zich een aantal keersluizen. De belangrijkste is de Ramspolkering, welke bij een stormsituatie uit westelijke richting hoge waterstanden op het Zwarte Meer die veroorzaakt worden door opstuwing vanuit het IJsselmeer/Ketelmeer moet voorkomen. Wanneer het waterpeil boven NAP +0.5 m komt en de stromingsrichting oostelijk is (van het Ketelmeer richting Zwarte Meer), sluit de Ramspolkering [6].

Voor de Overijsselse Vecht zelf is voornamelijk de afvoer bepalend voor hoge waterstanden. De wind heeft op de Vecht een minimale invloed op de waterstand, bij gebrek aan nabijgelegen grote wateroppervlakten. Dit verandert echter verder benedenstrooms op het Zwarte Water. Hier gaat het systeem geleidelijk over van afvoer-gedomineerd naar wind-gedomineerd. Het Zwarte Meer is bij geopende Ramspolkering voornamelijk een wind-gedomineerd systeem. Echter, wanneer de Ramspolkering gesloten is, wordt de invloed van de wind beperkt en speelt ook de afvoer een rol in de hoogte van de optredende waterstanden [6].

Het stroomgebied van de Overijsselse Vecht en het Zwarte Water is relatief klein en historische hoogwatergolven op de Overijsselse Vecht en het Zwarte Water laten zien dat de hoge waterstanden vaak slechts relatief kort aanhouden. Dit betekent dat tijdsafhankelijkheid een belangrijke rol kan spelen in dit gebied.

Genne-Streukel

De ondergrenswaarde van de buitenwaterstand is gegeven in Figuur 33. Voor het traject Genne-Streukel varieert de ondergrenswaarde tussen NAP +2.32 m en NAP +2.13 m.

Hasselt-Zwartsluis

De ondergrenswaarde van de buitenwaterstand is gegeven in Figuur 34. Voor het traject Hasselt-Zwartsluis varieert de ondergrenswaarde tussen NAP +2.00 m en NAP +1.91 m.

4.4 Freatisch niveau bij uittredepunt

Met betrekking tot het freatisch niveau bij het uittredepunt zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)
- Peilgebieden met zomer- en winterpeil

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 (sloot).

Genne-Streukel

Voor het traject Genne-Streukel zijn peilgebied 223 (zomerpeil: NAP -0.50 m; winterpeil: NAP -0.70 m), peilgebied 224 (zomerpeil: NAP -0.40 m; winterpeil: NAP -0.70 m) en peilgebied 324 (zomerpeil: NAP -0.60 m; winterpeil: NAP -0.90 m) van toepassing.

Hasselt-Zwartsluis

Voor het traject Hasselt-Zwartsluis zijn peilgebied 908 (zomerpeil: NAP -1.00 m; winterpeil: NAP -1.20 m) en peilgebied 929 (zomerpeil: NAP -1.00 m; winterpeil: NAP -1.20 m) van toepassing.

4.5 Intreepunt

Met betrekking tot het intreepunt zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Watergangen Waterschap Drents Overijsselse Delta
- Basisregistratie Grootchalige Topografie (BGT)
- Geotechnisch onderzoek
- Geofysisch onderzoek

Bij het inspecteren van watergangen Waterschap Drents Overijsselse Delta is gebleken dat de shapefile niet alle open wateren in het voor- en achterland bevat. Daarom is ook de Basisregistratie Grootchalige Topografie ingeladen.

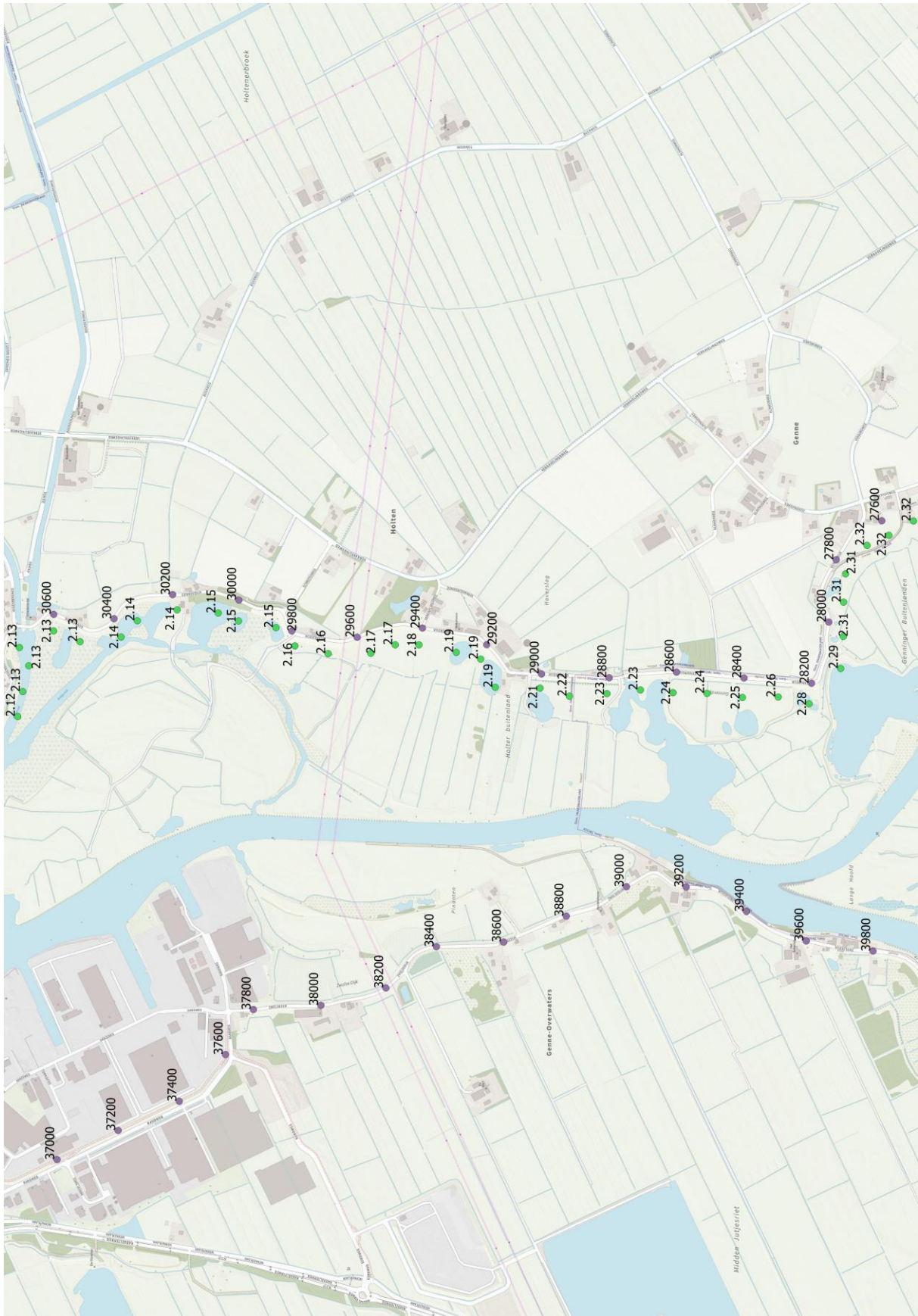
Om de dikte van de deklaag in het voorland in kaart te brengen is in augustus 2016 een geofysisch onderzoek uitgevoerd binnen dijkkringtraject 9-1. Het onderzoek omvat elektromagnetische metingen en grondradarmetingen (125-375 MHz en 300-900 MHz) binnen een strook van ongeveer 50-60 m langs de buitenteen van de dijk. De relatieve geleidbaarheid van de ondergrond is gemeten op dieptes van 2.2 m beneden maaiveld, 4.2 m beneden maaiveld en 6.7 m beneden maaiveld. Om de ruwe geleidbaarheidswaarden om te zetten naar een lagenmodel van de bodemopbouw zijn de elektromagnetische data geclassificeerd aan de hand van beschikbare boringen en sonderingen. Het geclassificeerde model van de bodemopbouw heeft een verticale resolutie van 50 cm en bereikt een diepte van maximaal 6 m beneden maaiveld [7].

Genne-Streukel

Het voorland wordt begrensd door de Overijsselse Vecht, het Zwartewater, het Varkensgat (een aftakking van het Galgenrak) en diverse buitendijkse kolken. In het voorland zijn verschillende sloten en greppels aanwezig (Figuur 35). De dikte van de deklaag in het voorland op basis van het geofysisch onderzoek is gegeven in Figuur 37.

Hasselt-Zwartsluis

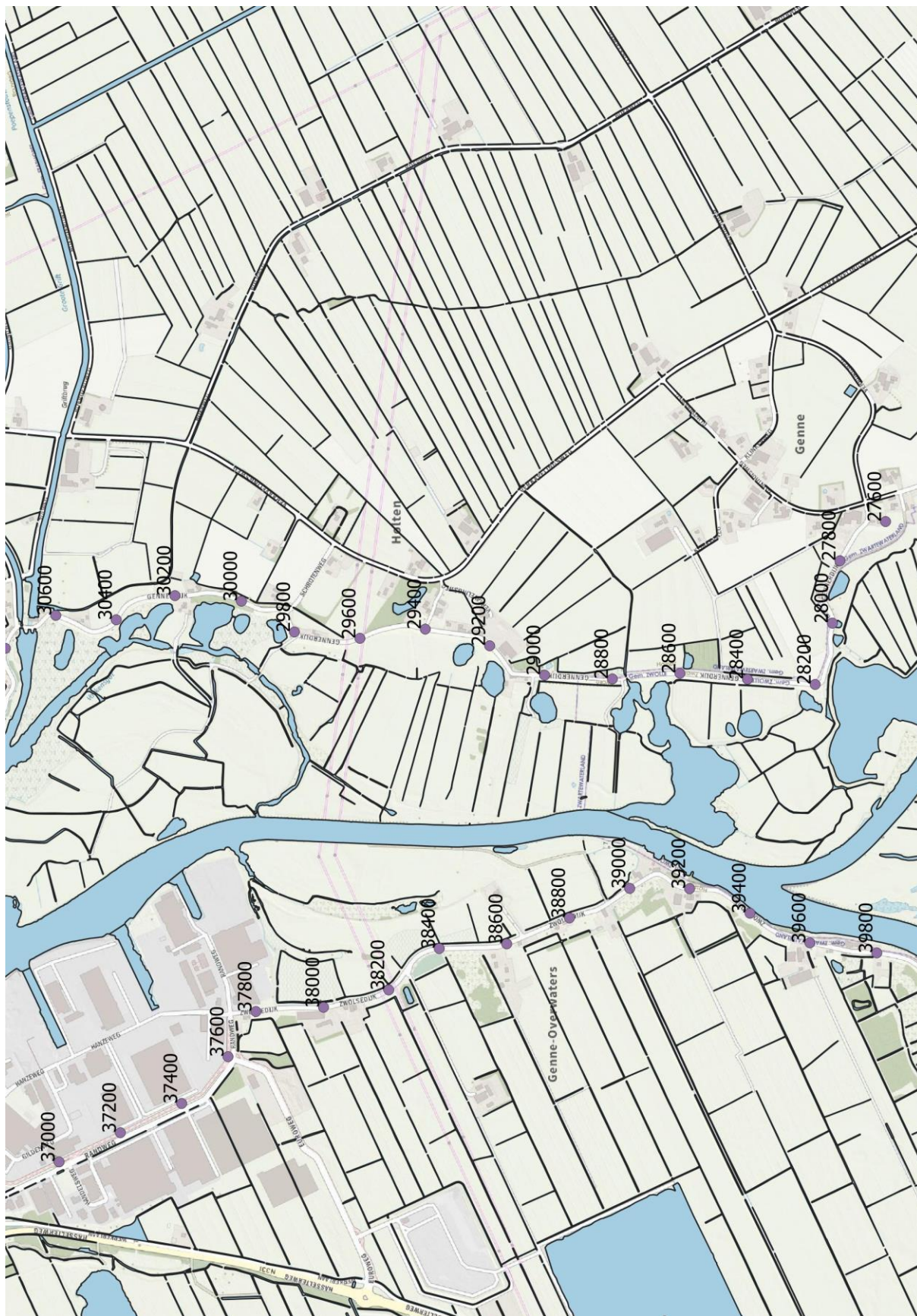
Het voorland wordt begrensd door het Zwartewater, de Molenwaardsstreng, uitvliet De Muizenval, uitwatering Kloosterzijstreng en de buitendijkse kolk ter plaatse van km 33.8-33.9. In het voorland zijn verschillende sloten, greppels en plassen aanwezig (Figuur 36). De dikte van de deklaag in het voorland op basis van het geofysisch onderzoek is gegeven in Figuur 38 en Figuur 39.



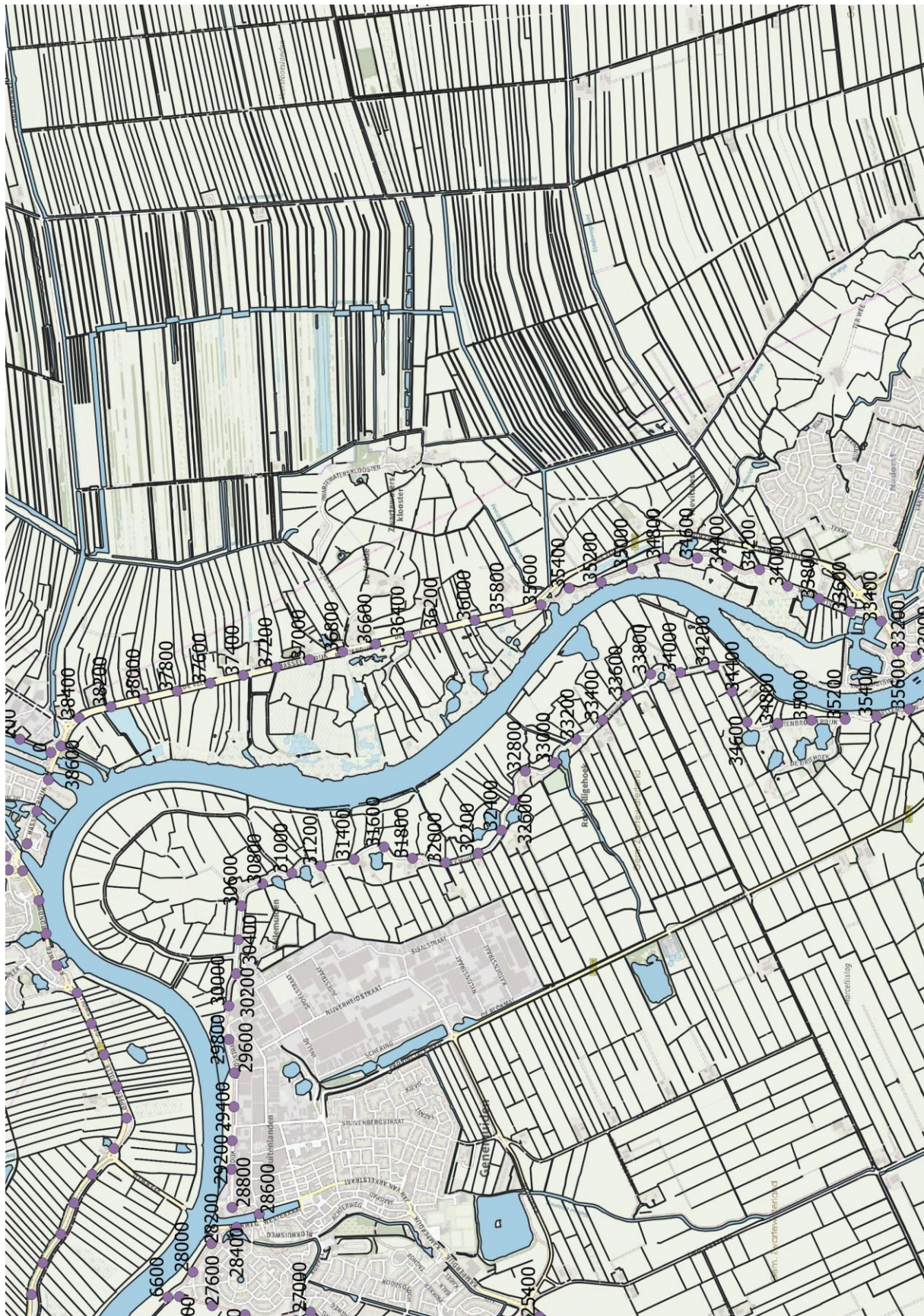
Figuur 33: Ondergrenswaarde buitenwaterstand in [m+NAP]; Genne-Streukel



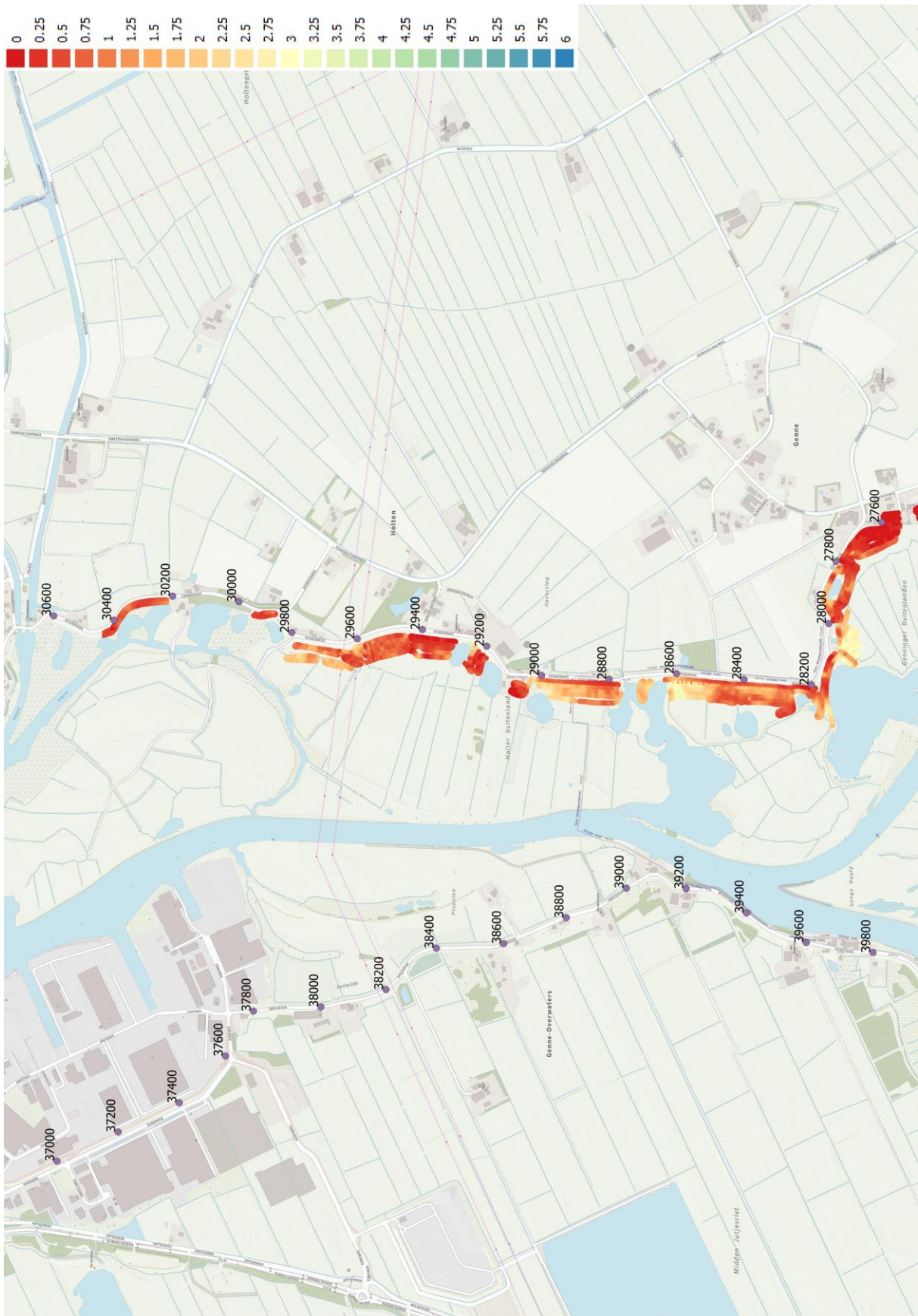
Figuur 34: Ondergrenswaarde buitenwaterstand in [m+NAP]; Hasselt-Zwartsluis



Figuur 35: Open water op basis van Basisregistratie Grootschalige Topografie; Genne-Streukel



Figuur 36: Open water op basis van Basisregistratie Grootchalige Topografie; Hasselt-Zwartsluis



Figuur 37: Dikte deklaag voorland in [m] op basis van geofysisch onderzoek; Genne-Streukel



Figuur 38: Dikte deklaag voorland in [m] op basis van geofysisch onderzoek; Hasselt-Zwartsluis (1)



Figuur 39: Dikte deklaag voorland in [m] op basis van geofysisch onderzoek; Hasselt-Zwartsluis (2)

4.6 Uittreepunt

Met betrekking tot het uittreepunt zijn de volgende informatiebronnen beschikbaar:

- Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)
- Watergangen Waterschap Drents Overijsselse Delta
- Basisregistratie Grootchalige Topografie (BGT)

Er zijn geen registraties van wellen bekend (het is niet bekend of er tijdens hoogwaters naar wellen is gekeken en of deze geregistreerd zijn). Zoals duidelijk zichtbaar in Figuur 35 en Figuur 36 zijn er als gevolg van historische dijkdoorbraken verschillende wielen aanwezig in het gebied.

Genne-Streukel

Het maatgevende uittreepunt ligt in het algemeen bij de binnendijkse sloot. Uitzonderingen hierop zijn km 28.61-28.73 (uittreepunt bij binnenteen), km 29.41-29.51 (uittreepunt bij binnendijkse vijver) en km 29.51-29.65 (uittreepunt op binnendijkse locatie met laag maaiveld)

Hasselt-Zwartsluis

Het maatgevende uittreepunt ligt in het algemeen bij de binnendijkse sloot. Uitzondering hierop is km 34.55-34.75 (uittreepunt bij binnendijkse kolk).

4.7 Onderkant zandpakket

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

- Stochastisch Ondergrond Schematisatie (WBI-SOS)
- Ondergrondmodel REGIS II
- Ondergrondmodel NL3D

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

Genne-Streukel

De bodemopbouw op basis van WBI-SOS is gegeven in Figuur 26. Voor het traject Genne-Streukel is SOS segment 9008 van toepassing. De onderkant van het zandpakket ligt op NAP -30.5 m.³

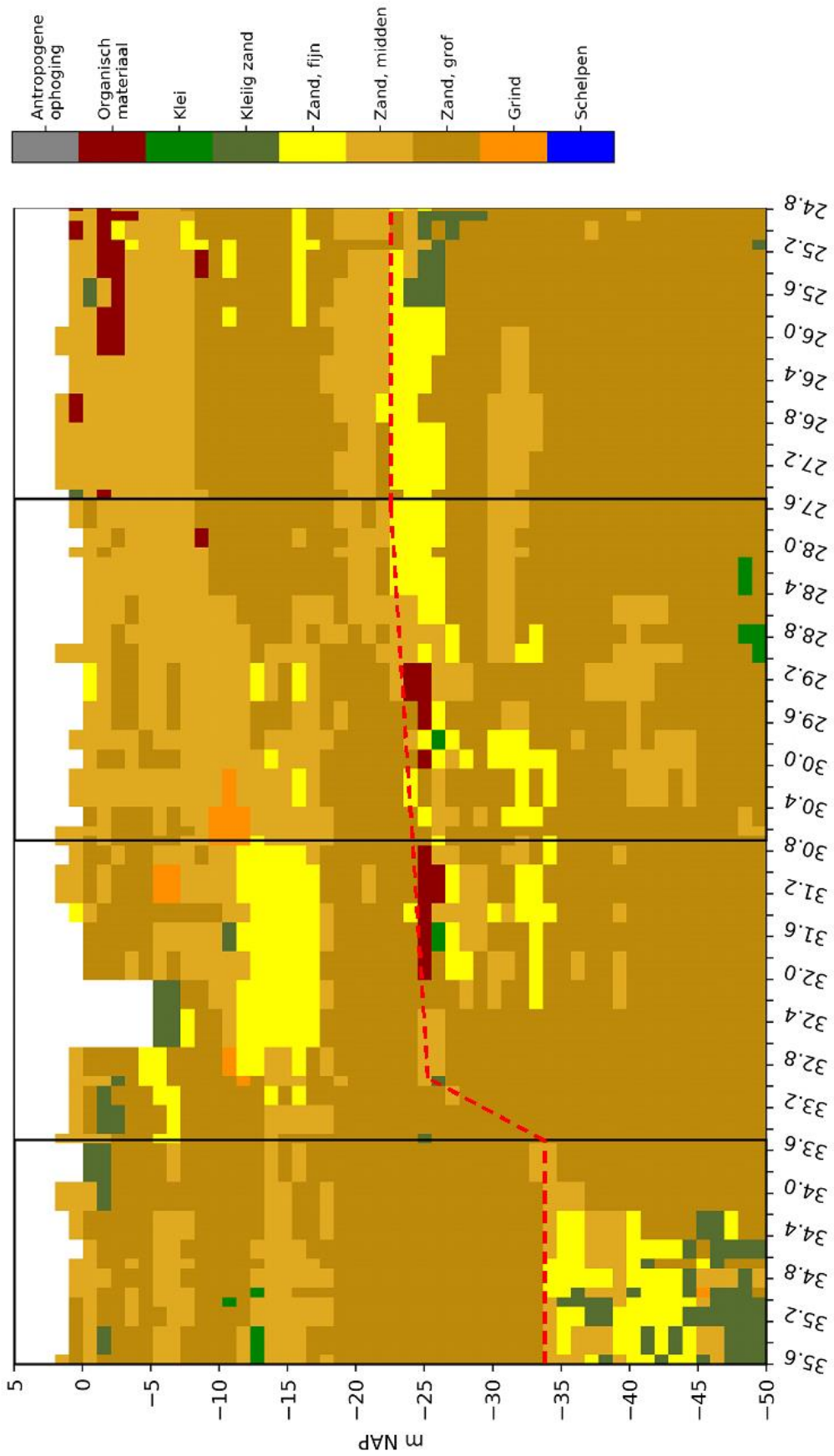
De bodemopbouw ter plaatse van de waterkering op basis van ondergrondmodel NL3D is gegeven in Figuur 40. De meest representatieve lithoklassen voor de voxels (blokken van 250 m bij 250 m in horizontale richting en 1 m in verticale richting) beneden NAP -24 m zijn kleiig zand en fijn zand. Verwacht wordt dat de doorlatendheid van de grondlaag beneden NAP -24 m aanzienlijk kleiner is dan die van de bovenliggende zandlagen. Op basis hiervan wordt aangenomen dat de onderkant van het zandpakket op NAP -24 m ligt (6.5 m hoger dan de onderkant van het zandpakket op basis van WBI-SOS).

Hasselt-Zwartsluis

De bodemopbouw op basis van WBI-SOS is gegeven in Figuur 26. Voor het traject Hasselt-Zwartsluis is het SOS segment 9009 van toepassing. De onderkant van het zandpakket ligt op NAP -30.5 m.⁴

³ Volgens scenario 9008_1D1 en 9008_1D2 bevindt zich beneden NAP -30.5 m een zandlaag met een doorlatendheid die aanzienlijk kleiner is dan die van de bovenliggende zandlagen. Op basis hiervan wordt aangenomen dat de onderkant van het zandpakket op NAP -30.5 m ligt.

⁴ Volgens scenario 9009_1D1, 9009_1D2, 9009_1D3 en 9009_1D4 bevindt zich beneden NAP -30.5 m een zandlaag met een doorlatendheid die aanzienlijk kleiner is dan die van de bovenliggende zandlagen. Op basis hiervan wordt aangenomen dat de onderkant van het zandpakket op NAP -30.5 m ligt.



Figuur 40: Bodemopbouw ter plaatse van waterkering op basis van ondergrondmodel NL3D

De bodemopbouw ter plaatse van de waterkering op basis van ondergrondmodel NL3D is gegeven in Figuur 40. De meest representatieve lithoklassen voor de voxels (blokken van 250 m bij 250 m in horizontale richting en 1 m in verticale richting) beneden NAP -34 m zijn kleig zand en fijn zand. Verwacht wordt dat de doorlatendheid van de grondlaag beneden NAP -34 m aanzienlijk kleiner is dan die van de bovenliggende zandlagen. Op basis hiervan wordt aangenomen dat de onderkant van het zandpakket op NAP -34 m ligt (3.5 m lager dan de onderkant van het zandpakket op basis van WBI-SOS).

4.8 Korreldiameter D_{70}

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

- Stochastisch Ondergrond Schematisatie (WBI-SOS)
- Geotechnisch grondonderzoek

Genne-Streukel

De korreldiameter D_{70} op basis van WBI-SOS is gegeven in Tabel 7. Voor het traject Genne-Streukel is de SOS segment 9008 van toepassing. Volgens scenario's 9008_1D1 en 9008_1D2 geldt voor zand boven NAP -5 m een korreldiameter D_{70} van 0.200 mm.

De korreldiameter D_{70} op basis van bepalingen van de korrelgrootteverdeling, uitgezet tegen de diepte van het monster beneden de onderkant van de deklaag, is gegeven in Figuur 42. De ruimtelijke spreiding van de korreldiameter D_{70} is gegeven in Figuur 47. Voor het traject Genne-Streukel varieert de korreldiameter D_{70} in de pipinggevoelige zandlaag tot 2 m beneden de onderkant van de deklaag tussen 0.147 mm en 0.373 mm.

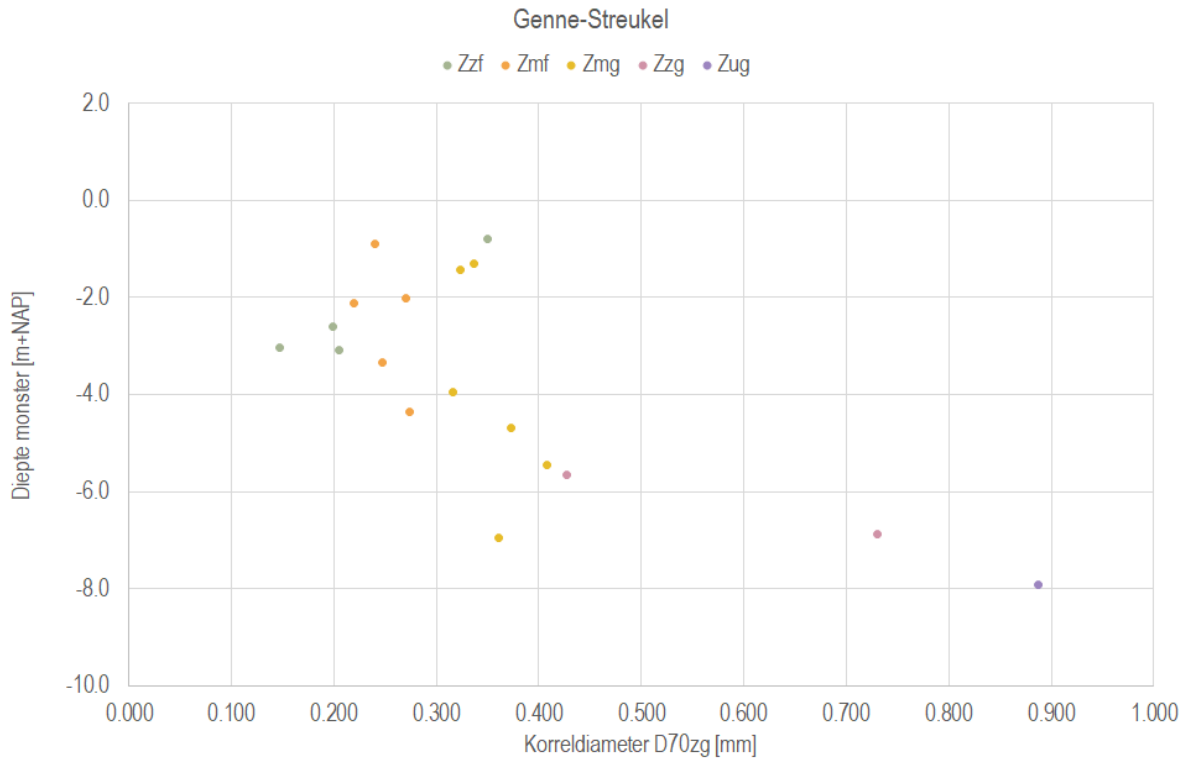
Hasselt-Zwartsluis

De korreldiameter D_{70} op basis van WBI-SOS is gegeven in Tabel 7. Voor het traject Hasselt-Zwartsluis is SOS segment 9009 van toepassing. Volgens scenario's 9009_1D1, 9009_1D2, 9009_1D3 en 9009_1D4 geldt voor zand boven NAP -5 m een korreldiameter D_{70} van 0.200 mm.

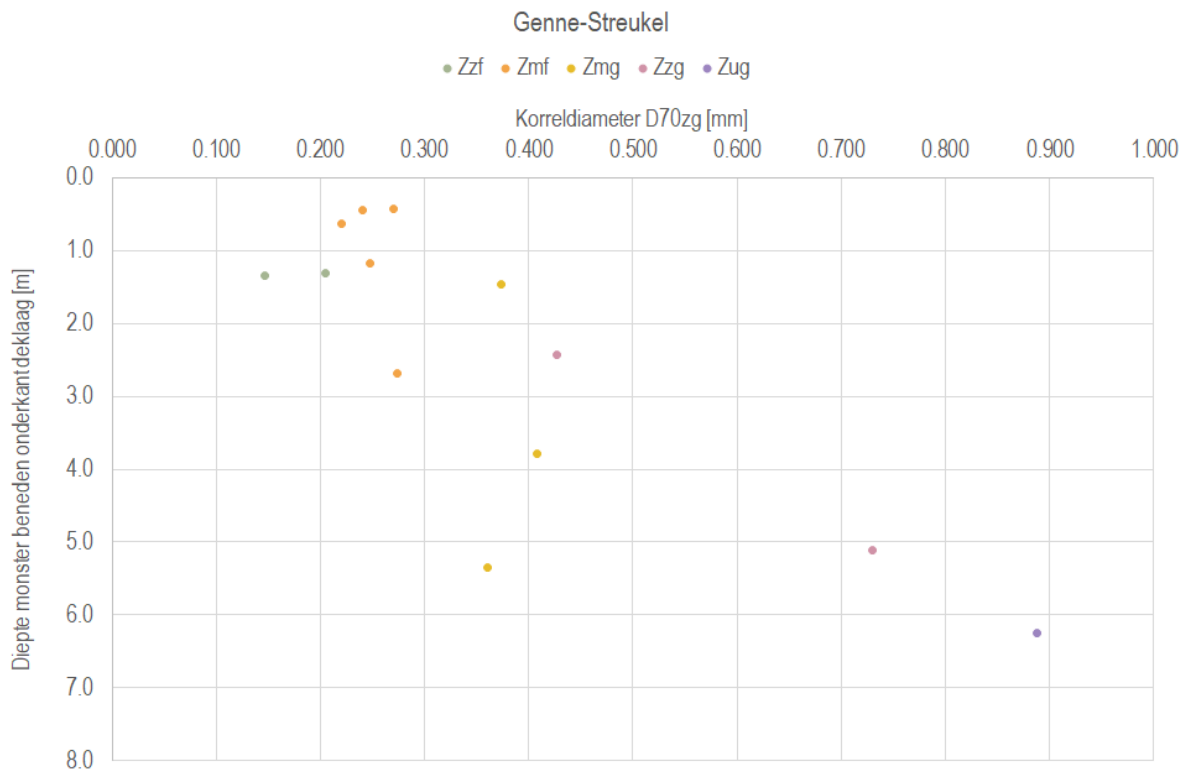
De korreldiameter D_{70} op basis van bepalingen van de korrelgrootteverdeling, uitgezet tegen de diepte van het monster beneden de onderkant van de deklaag, is gegeven in Figuur 44. De ruimtelijke spreiding van de korreldiameter D_{70} is gegeven in Figuur 48. Voor het traject Hasselt-Zwartsluis varieert de korreldiameter D_{70} in de pipinggevoelige zandlaag tot 2 m beneden de onderkant van de deklaag tussen 0.177 mm en 0.474 mm. Opgemerkt moet worden dat de hogere waarden van de korreldiameter D_{70} (groter dan 0.400 mm) uitsluitend zijn aangetroffen op locaties waar een aanzienlijk dikke deklaag aanwezig is (diepte monster beneden NAP -5 m) (Figuur 43).

Tabel 7: Korreldiameter D_{70} op basis van WBI-SOS

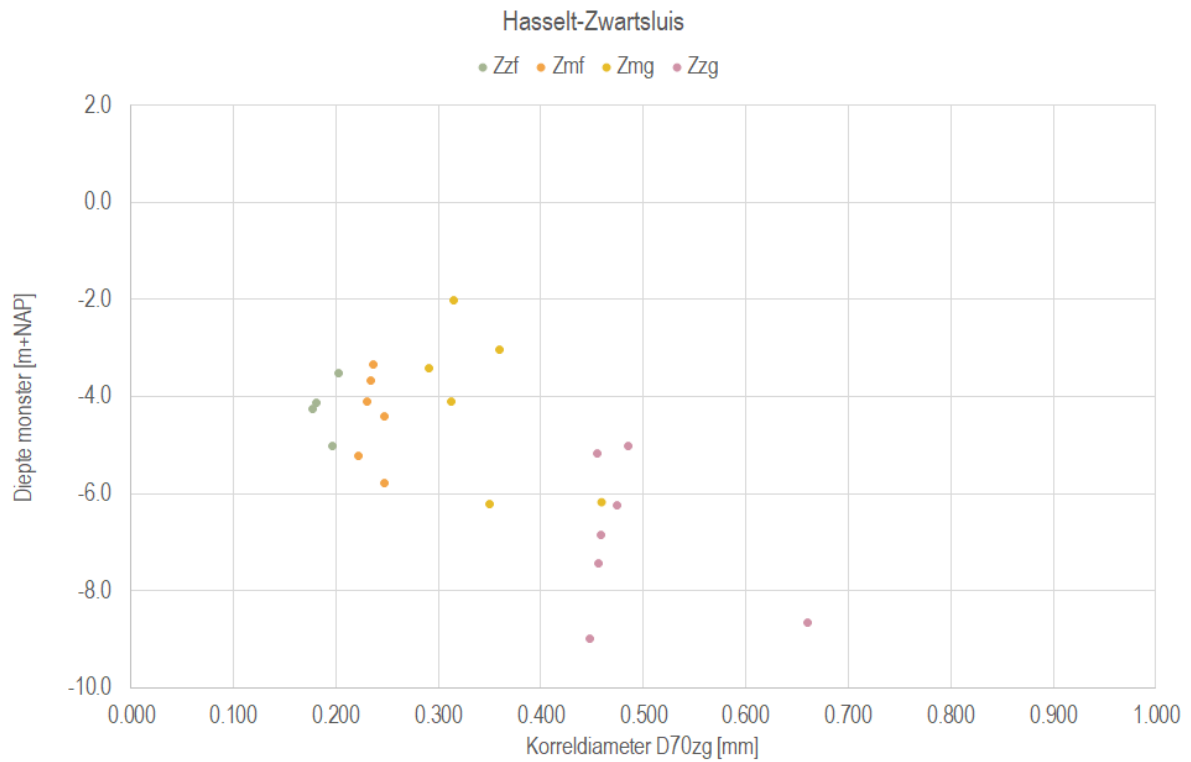
TI-seg	TI-sce	INK-ge	WTI-r	D70_gé	Fm1	d1	D70_gé	Fm2	d2	D70_gé	Fm3	d3	D70_gé	Fm4	d4
9007	1D1	9_C	0.25	250	BX	0.4	250	BX	-0.8	250	BX	-3.55	350	KR	-3.7
9007	1D2	9_C	0.25	250	BX	0.4	250	BX	-0.8	250	BX	-3.55	350	KR	-3.7
9008	1D1	9_B	0.25	200	HL/BX	0	200	HL/BX	-2.9	200	HL/BX	-5	350	KR	
9008	1D2	9_B	0.25	200	HL/BX	0	200	HL/BX	-2.9	200	HL/BX	-5	350	KR	
9009	1D1	9_B	0	200	HL/BX	0	200	HL/BX	-2.9	200	HL/BX	-5	350	KR	
9009	1D2	9_B	0	200	HL/BX	0	200	HL/BX	-2.9	200	HL/BX	-5	350	KR	
9009	1D3	9_B	0	200	HL/BX	0	200	HL/BX	-2.9	200	HL/BX	-5	350	KR	
9009	1D4	9_B	0	200	HL/BX	0	200	HL/BX	-2.9	200	HL/BX	-5	350	KR	



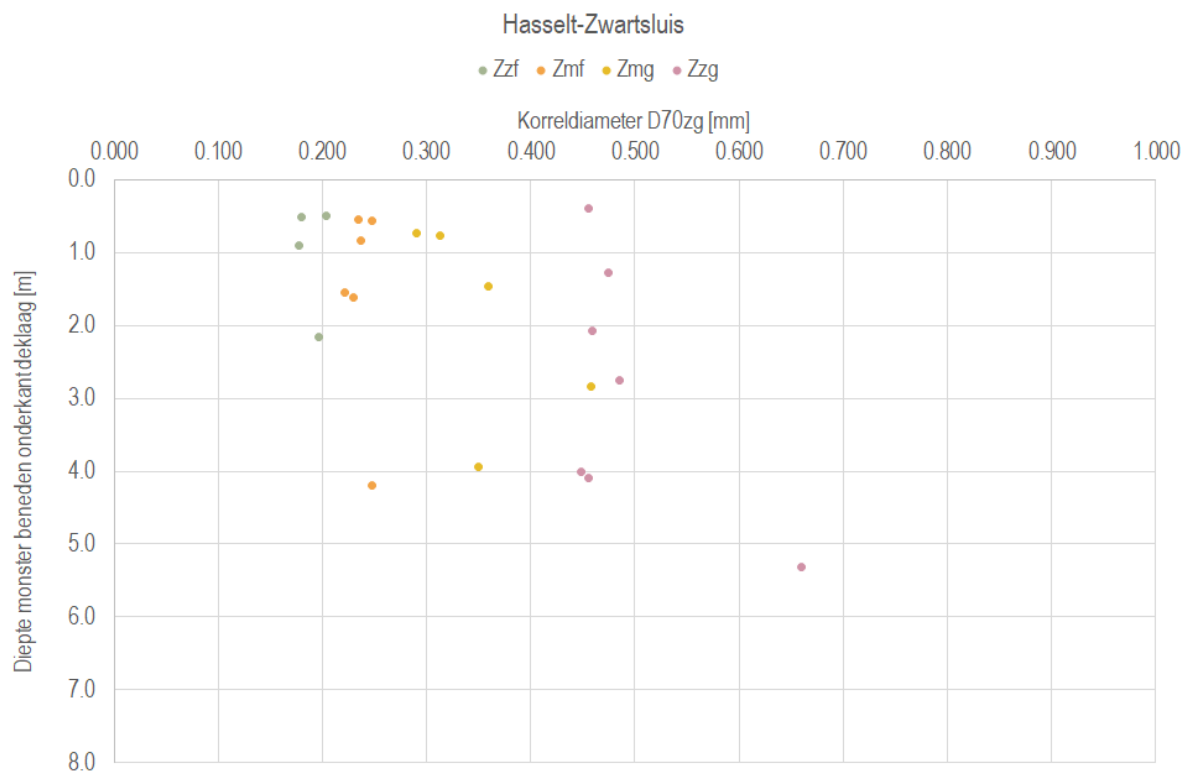
Figuur 41: Korrel diameter D_{70} op basis van bepalingen korrelgrootteverdeling versus gemiddelde diepte monster; Genne-Streukel



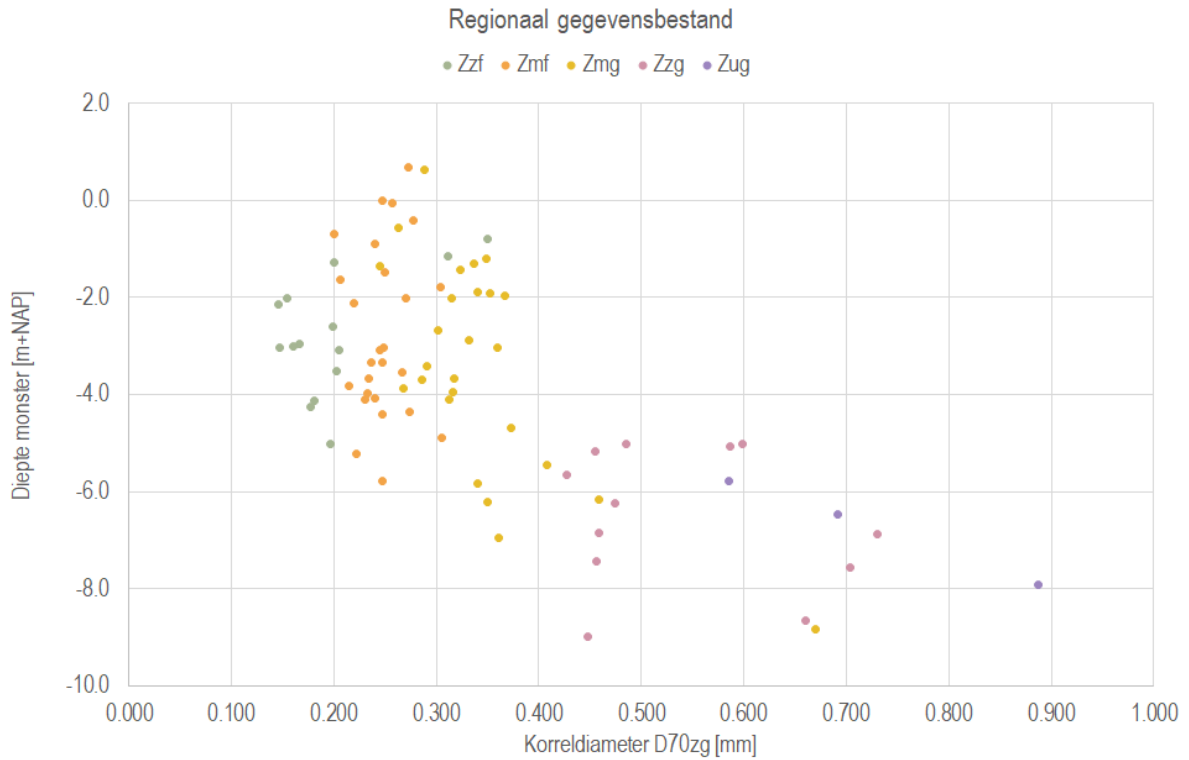
Figuur 42: Korrel diameter D_{70} op basis van bepalingen korrelgrootteverdeling versus gemiddelde diepte monster beneden onderkant deklaag; Genne-Streukel



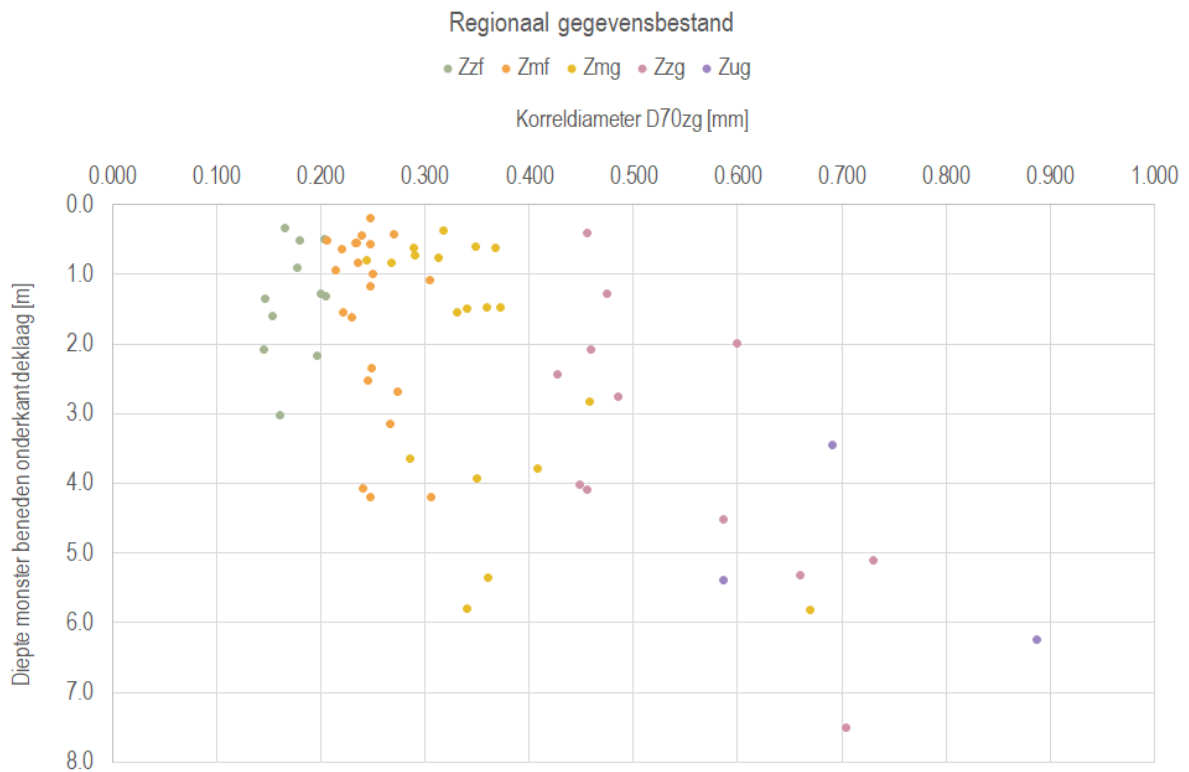
Figuur 43: Korreldeiameter D_{70} op basis van bepalingen korrelgrootteverdeling versus gemiddelde diepte monster; Hasselt-Zwartsluis



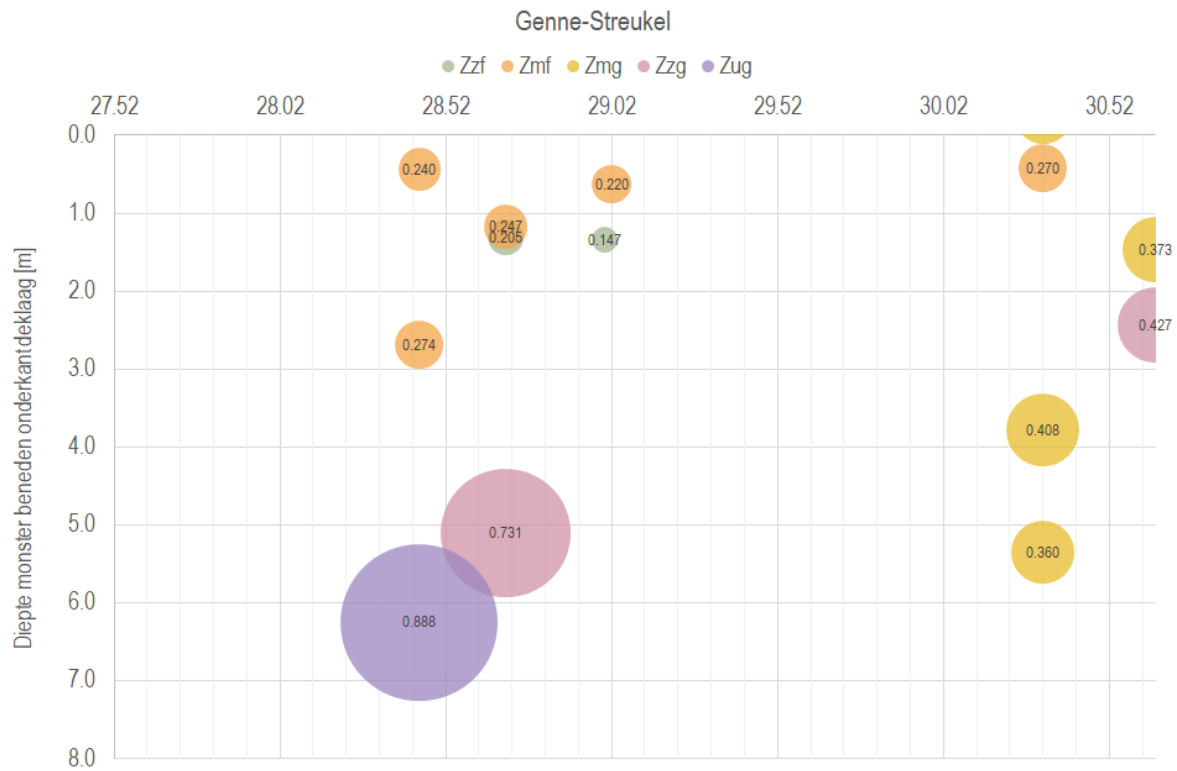
Figuur 44: Korreldeiameter D_{70} op basis van bepalingen korrelgrootteverdeling versus gemiddelde diepte monster beneden onderkant deklaag; Hasselt-Zwartsluis



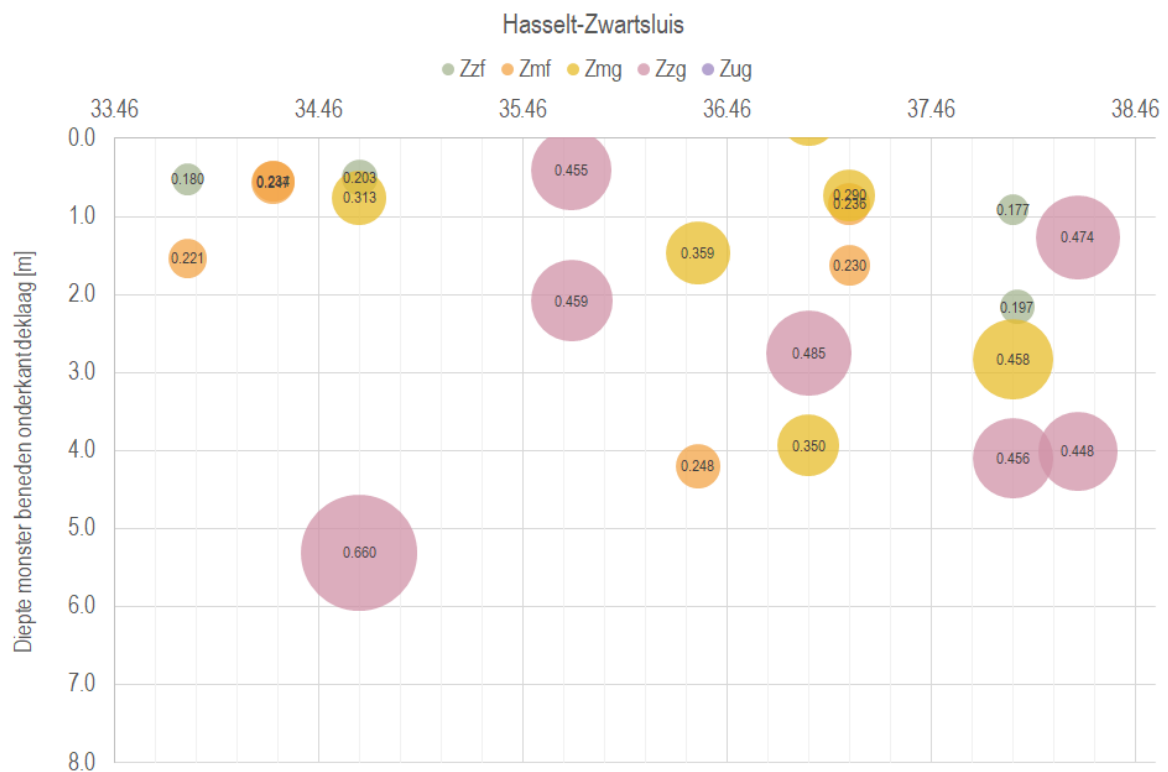
Figuur 45: Korrel diameter D_{70} op basis van bepalingen korrelgrootteverdeling versus gemiddelde diepte monster; regionaal gegevensbestand



Figuur 46: Korrel diameter D_{70} op basis van bepalingen korrelgrootteverdeling versus gemiddelde diepte monster beneden onderkant deklaag; regionaal gegevensbestand



Figuur 47: Ruimtelijke spreiding van korrel diameter D_{70} op basis van bepalingen korrelgrootteverdeling versus gemiddelde diepte monster beneden onderkant deklaag; Genne-Streukel



Figuur 48: Ruimtelijke spreiding van korrel diameter D_{70} op basis van bepalingen korrelgrootteverdeling versus gemiddelde diepte monster beneden onderkant deklaag; Hasselt-Zwartsluis

4.9 Doorlatendheid zandlaag

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

- Stochastisch Ondergrond Schematisatie (WBI-SOS)

Er zijn geen HPT-sonderingen en (mini)pompproeven uitgevoerd.

Genne-Streukel

De doorlatendheid van de zandlaag op basis van WBI-SOS is gegeven in Tabel 8. Voor het traject Genne-Streukel is SOS segment 9008 van toepassing. Volgens scenario's 9008_1D1 en 9008_1D2 is de doorlatendheid van de zandlaag tot NAP -20.5 m gelijk aan 50 m/d en is de doorlatendheid van de zandlaag tussen NAP en NAP -30.5 m gelijk aan 35 m/d.

Hasselt-Zwartsluis

De doorlatendheid van de zandlaag op basis van WBI-SOS is gegeven in Tabel 8. Voor het traject Hasselt-Zwartsluis is SOS segment 9009 van toepassing. Volgens scenario's 9009_1D1, 9009_1D2, 9009_1D3 en 9009_1D4 is de doorlatendheid van de zandlaag tot NAP -20.5 m gelijk aan 50 m/d en is de doorlatendheid van de zandlaag tussen NAP -20.5 m en NAP -30.5 m gelijk aan 35 m/d.

Tabel 8: Doorlatendheid zandlaag op basis van WBI-SOS

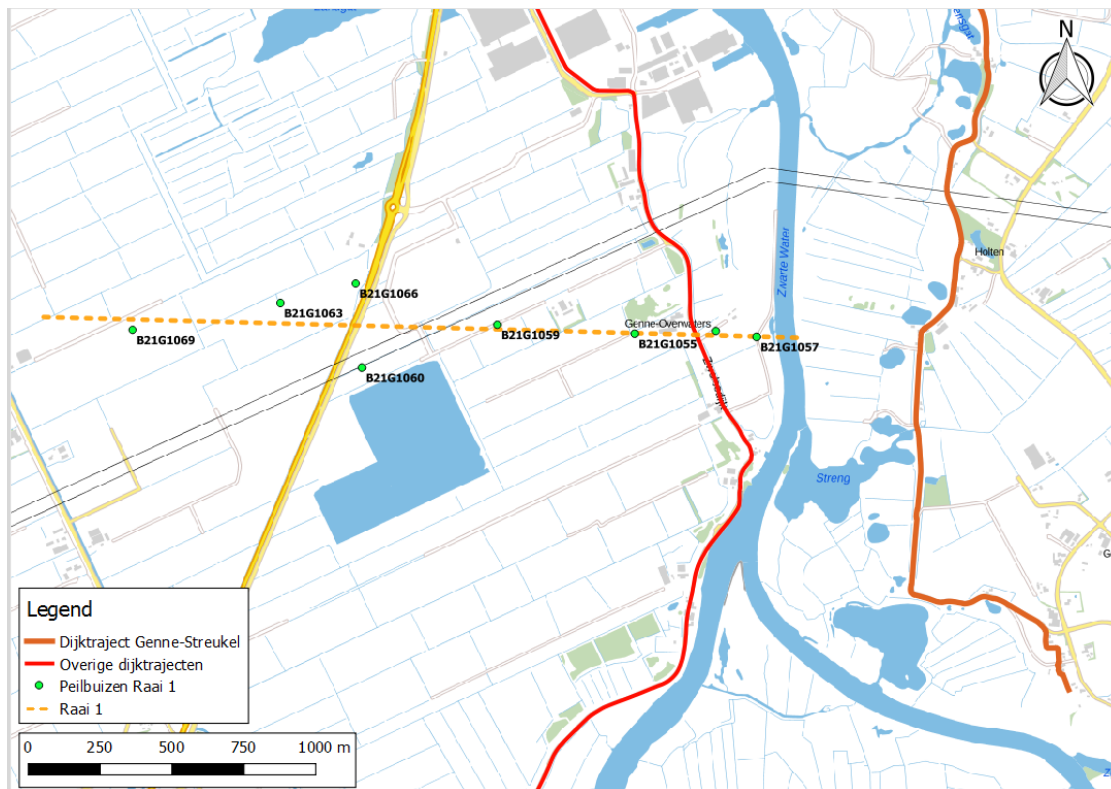
soilprofile_id	top_level	soil_name	max-d	min-d	k-mean
Segment_9007_1D1	0.25	2239_P_Wdz_zf	0.25	0.25	10
Segment_9007_1D1	-3	2242_P_Rg_zg	-2	-3.5	70
Segment_9007_1D1	-22	2243_P_Ggs_zg	-20	-25	100
Segment_9007_1D2	0.25	2240_H_Rk_k	0.25	0.25	
Segment_9007_1D2	-0.25	2241_P_Wdz_zf	0	-0.75	10
Segment_9007_1D2	-3	2242_P_Rg_zg	-2	-3.5	70
Segment_9007_1D2	-22	2243_P_Ggs_zg	-20	-25	100
Segment_9008_1D1	0.25	2246_P_Wdz_zf	0.25	0.25	8
Segment_9008_1D1	-3	2249_P_Rg_zg	-2	-3.5	50
Segment_9008_1D1	-20.5	2249_P_Rg_zg			35
Segment_9008_1D1	-30.5	2249_P_Rg_zg			15
Segment_9008_1D2	0.25	2247_H_Rk_k	0.25	0.25	
Segment_9008_1D2	-0.25	2248_P_Wdz_zf	0	-0.75	8
Segment_9008_1D2	-3	2249_P_Rg_zg	-2	-3.5	50
Segment_9008_1D2	-20.5	2249_P_Rg_zg			35
Segment_9008_1D2	-30.5	2249_P_Rg_zg			15
Segment_9009_1D1	0	2252_H_Mp_k	0	0	
Segment_9009_1D1	-0.5	2253_H_Vhv_v	-0.25	-0.75	
Segment_9009_1D1	-3	2254_P_Rk_k&s	-2.5	-3.5	
Segment_9009_1D1	-6	2261_P_Rg_zg	-5	-7	50
Segment_9009_1D1	-20.5	2261_P_Rg_zg			35
Segment_9009_1D1	-30.5	2261_P_Rg_zg			15
Segment_9009_1D2	0	2255_H_Mp_k	0	0	
Segment_9009_1D2	-0.5	2256_H_Vhv_v	-0.25	-0.75	
Segment_9009_1D2	-1.5	2257_P_Rk_k&s	-1	-2	
Segment_9009_1D2	-6	2261_P_Rg_zg	-5	-7	50
Segment_9009_1D2	-20.5	2261_P_Rg_zg			35
Segment_9009_1D2	-30.5	2261_P_Rg_zg			15
Segment_9009_1D3	0	2258_H_Vhv_v	0	0	
Segment_9009_1D3	-3	2259_P_Rk_k&s	-2.5	-3.5	
Segment_9009_1D3	-6	2261_P_Rg_zg	-5	-7	50
Segment_9009_1D3	-20.5	2261_P_Rg_zg			35
Segment_9009_1D3	-30.5	2261_P_Rg_zg			15
Segment_9009_1D4	0	2260_H_Mr_kz	0	0	
Segment_9009_1D4	-11.5	2261_P_Rg_zg	-10	-13	50
Segment_9009_1D4	-20.5	2261_P_Rg_zg			35
Segment_9009_1D4	-30.5	2261_P_Rg_zg			15

4.10 Doorlatendheid deklaag

Voor het bepalen van de doorlatendheid van de deklaag wordt in deze gevoeligheidsanalyse gebruik gemaakt van peilbuisdata aan de overzijde van het traject Genne - Streukel. Op deze locatie is een raai over de dijk aanwezig. Daarnaast zijn een significant aantal peilbuizen in de omgeving van deze raai beschikbaar. Dit maakt het mogelijk een 3D grondwatermodel op te zetten. Een overzicht is weergegeven in Figuur 49.

Voor het watervoerend pakket worden doorlatendheden en bodemlaaghoogtes vanuit het SOS gebruikt. Met deze vaste uitgangspunten wordt een 3D grondwatermodel opgezet en gekalibreerd op de doorlatendheden van de deklaag. Aan de hand van het gekalibreerde model wordt een uitgangspunt voor de deklaagweerstand verkregen. Dit geldt als input voor de verdere berekeningen. De uitwerking van de uitgangspunten zijn gegeven in Bijlage 10.

Voor de afleiding van de doorlatendheid van de deklaag op het voorland dient een situatie met hoogwater te worden gebruikt waarbij het gehele voorland onder is gelopen. Het hoogwater in januari 2012 heeft de meeste beschikbare peilbuisdata en heeft een hoogwater met een voldoende waterstand om het gehele voorland onder te doen laten lopen.



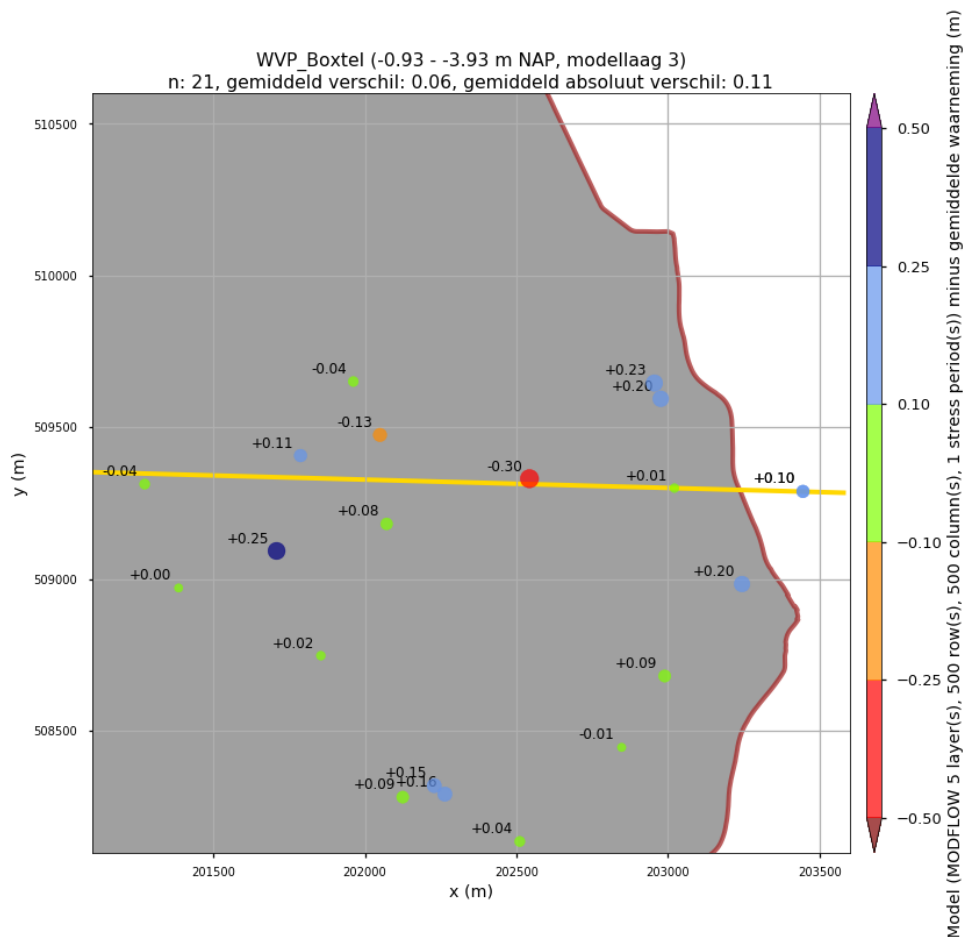
Figuur 49: Locatie raai peilbuizen over de dijk

Resultaten

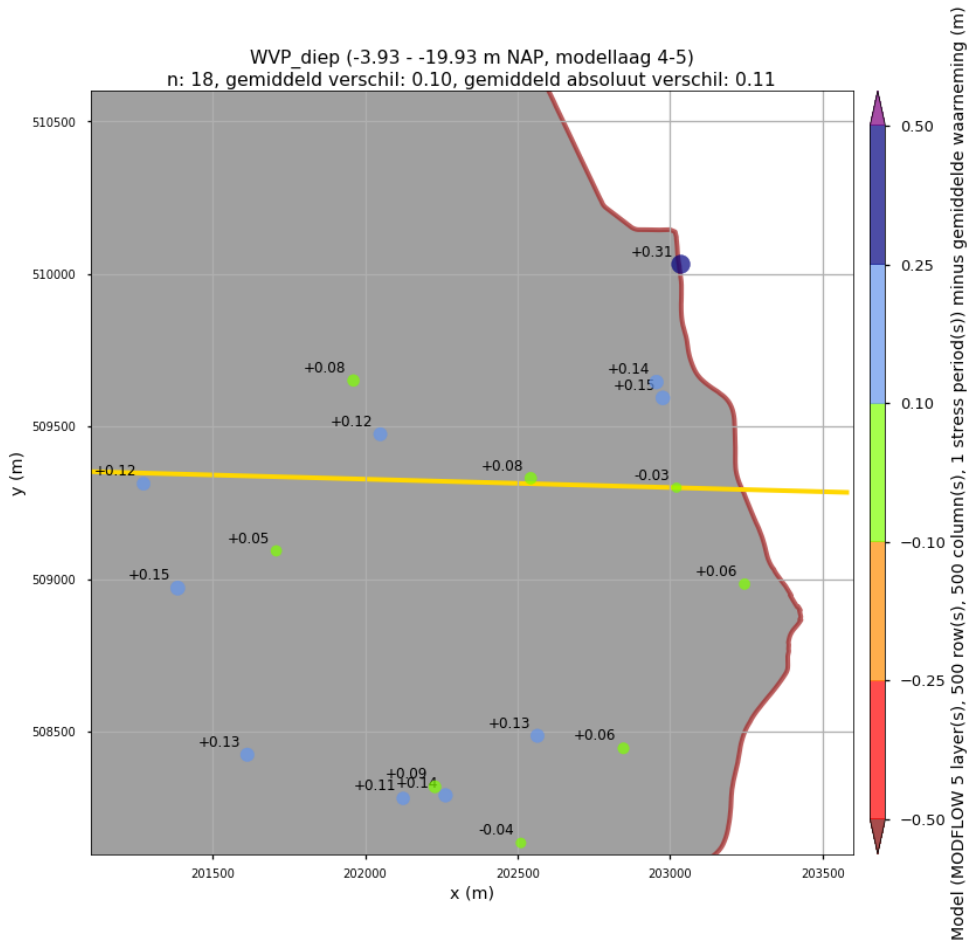
Een gekalibreerd model wordt gevonden bij een doorlatendheid van de deklaag van 0,01 meter per dag. Dit resultaat wordt gevonden bij een meerderheid aan peilbuizen met een acceptabele range tussen berekende en gemeten grondwaterstand. De resultaten van het gekalibreerde model zijn gegeven in Figuur 50 en Figuur 51. Figuur 53 weergeeft een doorsnede met de resulterende gemodelleerde grondwaterstanden over de peilbuisraai. Met het grondwatermodel is een analyse gedaan naar de acceptabele boven- en ondergrens van de kalibratie. Deze analyse is gegeven in Bijlage 10.

In de bollenkaart is 1 peilbuiswaarneming te vinden met een berekend verschil van -0.3 meter. Dit betekent dat in de modellering de peilbuis 30 centimeter droger is dan bij de meting. Dit kan verklaard worden door de reactie van de peilbuis op de neerslag die hiervoor gevallen is. Deze peilbuis verkrijgt lokaal een sterke invloed, waardoor een grondwaterstand gelijk aan maaiveld gemeten is. Figuur 52 weergeeft een reactie van de peilbuis op de neerslag, voordat de hoogwaterpiek plaats vindt. Deze peilbuis reageert intenser op de neerslag in vergelijking met de andere gevonden peilbuizen. Hierdoor wordt niet verder gekalibreerd op een verder effect voor deze peilbuis. De andere peilbuismetingen bevinden zich namelijk op een acceptabele range van de berekende grondwaterstand in het model.

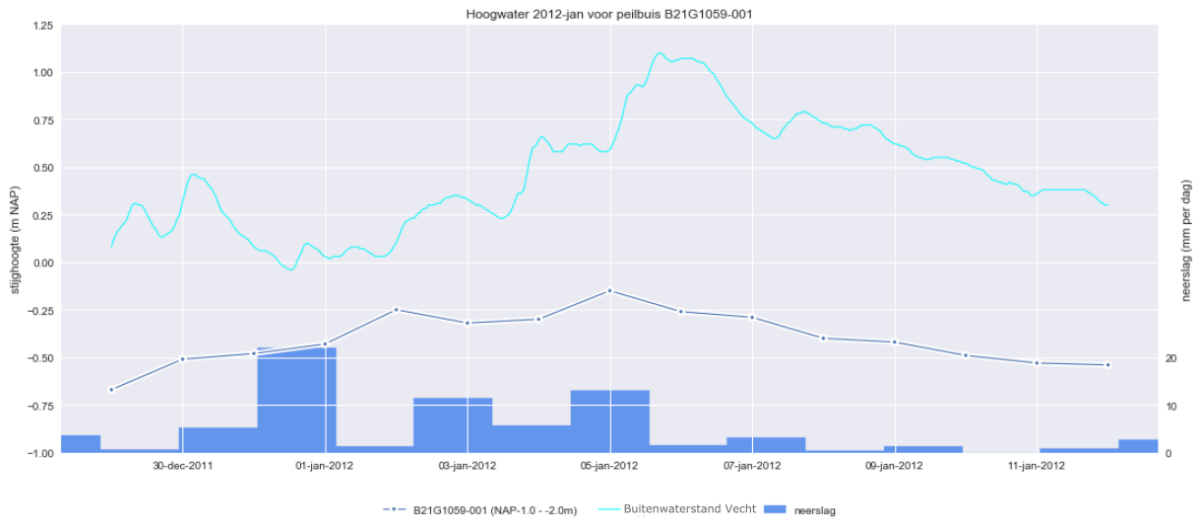
Een essentiële peilbuis is B21G1057. Deze ligt in het voorland en is bepalend voor inschatting van de weerstand in het voorland. Tijdens het hoogwater heeft deze peilbuis continue metingen uitgevoerd. Zoals weergegeven in Figuur 52 is de stijghoogte in de peilbuis lager als de buitenwaterstand tijdens het hoogwater. Dit betekent dat de peilbuis een goede afdichting heeft gehad en bruikbaar is voor het afleiden van een weerstand in het voorland. Aan de hand van de buitenwaterstand tijdens het hoogwater en kaarten met het omliggend maaiveld, kan gesteld worden dat de peilbuis tijdens het hoogwater is ondergelopen.



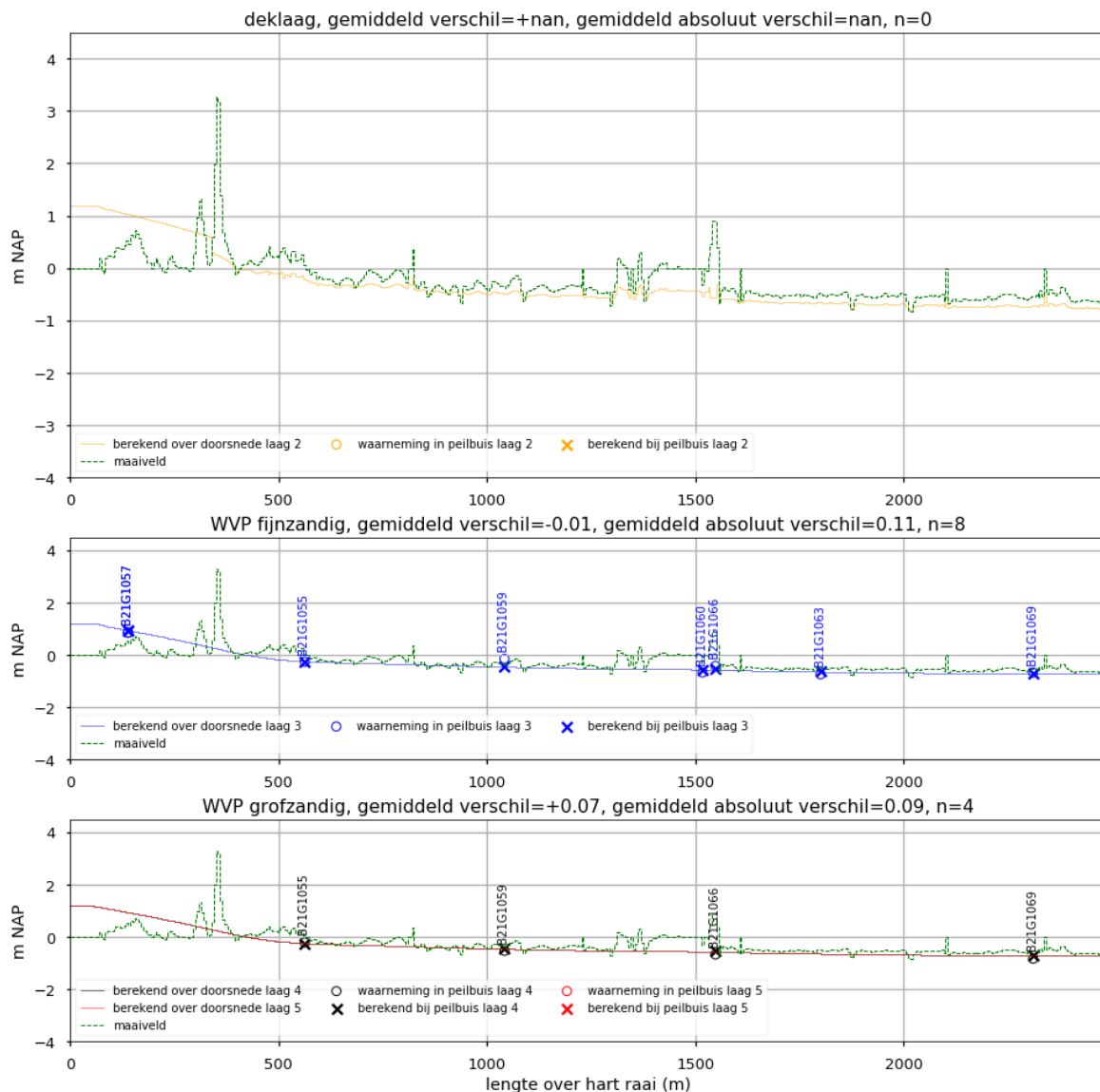
Figuur 50: Overzicht bollenkaart eerste laag watervoerend pakket gekalibreerd model



Figuur 51: Overzicht bollenkaart tweede en derde laag watervoerend pakket gekalibreerd model



Figuur 52: Peilbuis data B21G1059-001 gedurende het hoogwater



Figuur 53: Berekende en gemeten grondwaterstanden bij de raai over de dijk

Conclusie

De beste kalibratie wordt gevonden bij een doorlatendheid van de deklaag van 0,01 meter per dag. De berekende boven- en ondergrenswaarde voor de verticale doorlatendheid van de deklaag zijn respectievelijk 0,05 en 0,005 meter per dag (Bijlage 10). Voor de dikte van de deklaag is 1 meter aangehouden. Er is gewerkt met een anisotropie van 1. Om een conservatief uitgangspunt aan te houden voor de doorlatendheid van de deklaag wordt verder gerekend met de bovengrens van 0,05 meter per dag.

Deze waarden zijn bepaald op enige afstand van de daadwerkelijk te toetsen trajecten, waardoor de waarden mogelijk niet betrouwbaar zijn voor de toets-trajecten. Peilbuismetingen in de vorm van een vergelijkbare raai in het toetstraject zijn benodigd om een lokale bepaling van de weerstand van deklaag uit te kunnen voeren. Of de resultaten moeten worden vermenigvuldigd met een onzekerheidsfactor. Voor deze gevoeligheidsanalyse wordt het acceptabel bevonden om door te rekenen met deze doorlatendheid van de deklaag, omdat er geen verdere bronnen van informatie betreffende de deklaag aanwezig zijn en zowel de meerwaarde van peilbuizenmetingen rondom dijktrajecten wordt aangegeven.

5 Vakindeling

5.1 Bepaling vakgrenzen

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 de slootbodembodem of het maaiveld) en variaties in ondergrond (dikte van de deklaag, en aard en samenstelling van het watervoerend pakket).

Genne-Streukel

De uiteindelijke vakindeling voor het traject Genne-Streukel is gegeven in Tabel 9 en Figuur 54. De vakken GEN_V4 (kerende constructie), GEN_V6 (sluis Gennegerzijk), GEN_V15 (drainageconstructie) en GEN_V16 (gemaal Streukelerzijk) worden niet beschouwd.

Tabel 9: Vakindeling; Genne-Streukel

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Achtergrond vakindeling geometrie	Achtergrond vakindeling ondergrond
GEN_V1	27.52	27.75	Binnendijkse sloot. Peilgebied 223 (zp. = - 0.50 m; wp. = - 0.70 m). Hoog maaiveld.	SOS segment 9008. Deklaag dun of afwezig.
GEN_V2	27.75	28.27	Buitendijkse kolken. Binnendijkse sloot. Peilgebied 224 (zp. = - 0.40 m; wp. = - 0.70 m).	SOS segment 9008. Deklaag dun of afwezig.
GEN_V3	28.27	28.55	Binnendijkse sloot. Peilgebied 224 (zp. = - 0.40 m; wp. = - 0.70 m).	SOS segment 9008.
GEN_V4	28.55	28.61	Kerende constructie.	
GEN_V5	28.61	28.73	Buitendijkse kolk. Peilgebied 224 (zp. = - 0.40 m; wp. = - 0.70 m).	SOS segment 9008.
GEN_V6	28.73	28.79	Sluis Gennegerzijk.	
GEN_V7	28.79	29.05	Buitendijkse kolken. Binnendijkse sloot. Peilgebied 224 (zp. = - 0.40 m; wp. = - 0.70 m).	SOS segment 9008.
GEN_V8	29.05	29.21	Buitendijkse kolken. Binnendijkse sloot. Peilgebied 224 (zp. = - 0.40 m; wp. = - 0.70 m).	SOS segment 9008. Deklaag dun of afwezig.
GEN_V9	29.21	29.41	Buitendijkse kolk. Binnendijkse sloot. Peilgebied 324 (zp. = - 0.60 m; wp. = - 0.90 m). Hoog maaiveld.	SOS segment 9008. Deklaag dun of afwezig.
GEN_V10	29.41	29.51	Binnendijkse vijver. Peilgebied 324 (zp. = - 0.60 m; wp. = - 0.90 m).	SOS segment 9008. Deklaag dun of afwezig.
GEN_V11	29.51	29.65	Peilgebied 324 (zp. = - 0.60 m; wp. = - 0.90 m). Laag maaiveld.	SOS segment 9008. Deklaag dun of afwezig.
GEN_V12	29.65	29.79	Binnendijkse sloot. Peilgebied 324 (zp. = - 0.60 m; wp. = - 0.90 m).	SOS segment 9008.
GEN_V13	29.79	30.21	Buitendijkse kolken. Binnendijkse sloot. Peilgebied 324 (zp. = - 0.60 m; wp. = - 0.90 m).	SOS segment 9008. Deklaag dun of afwezig.
GEN_V14	30.21	30.51	Buitendijkse kolken. Binnendijkse sloot. Peilgebied 324 (zp. = - 0.60 m; wp. = - 0.90 m).	SOS segment 9008. Deklaag dun of afwezig.
GEN_V15	30.51	30.63	Drainageconstructie.	
GEN_V16	30.63	30.66	Gemaal Streukelerzijk.	

Hasselt-Zwartsluis

De uiteindelijke vakindeling voor het traject Hasselt-Zwartsluis is gegeven in Tabel 10 en Figuur 55. De vakken HAS_V1 (jachthaven), HAS_V2 (kerende constructie), HAS_V4 (kerende constructie), HAS_V8 (gemaal Kloosterzijl) en HAS_V23 (De Grote Kranerwaard) worden niet beschouwd.

Tabel 10: Vakindeling; Hasselt-Zwartsluis

Vak ID	Begin vak	Einde vak	Achtergrond vakindeling geometrie	Achtergrond vakindeling ondergrond
HAS_V1	33.46	33.49	Jachthaven.	
HAS_V2	33.49	33.61	Kerende constructie.	
HAS_V3	33.61	33.77	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V4	33.77	33.93	Kerende constructie.	
HAS_V5	33.93	34.55	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V6	34.55	34.75	Binnendijkse kolk. Peilgebied 908 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V7	34.75	35.51	Binnendijkse sloot. Peilgebied 908 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V8	35.51	35.59	Gemaal Kloosterzijl.	
HAS_V9	35.59	35.89	Binnendijkse sloot. Peilgebied 908 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V10	35.89	36.29	Binnendijkse sloot. Peilgebied 908 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V11	36.29	36.55	Binnendijkse sloot. Peilgebied 908 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V12	36.55	36.65	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V13	36.65	36.77	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m). Hoog maaiveld.	SOS segment 9009.
HAS_V14	36.77	36.95	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V15	36.95	37.03	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009. Deklaag dun of afwezig.
HAS_V16	37.03	37.17	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009. Deklaag dun of afwezig.
HAS_V17	37.17	37.39	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V18	37.39	37.55	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V19	37.55	37.79	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V20	37.79	37.91	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V21	37.91	38.25	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V22	38.25	38.45	Binnendijkse sloot. Peilgebied 929 (zp. = - 1.00 m; wp. = - 1.20 m).	SOS segment 9009.
HAS_V23	38.45	38.56	De Grote Kranerwaard.	

5.2 Bepaling maatgevende profielen

Voor elk vak is een maatgevend profiel bepaald. Het maatgevende profiel is het profiel binnen het betrokken vak dat naar verwachting het meest pipinggevoelig is, en is bepaald op basis van de aanwezige kwelweglengte in combinatie met de hoogte van de slootbodem of het maaiveld.

Genne-Streukel

Maatgevende profielen voor het traject Genne-Streukel zijn gegeven in Tabel 11.

Tabel 11: Maatgevende profielen; Genne-Streukel

Vak ID	Maatgevend profiel	Dijkbasis [m]	Ondergrens buiten-waterstand [m+NAP]	Polderpeil (winter) [m+NAP]	Breedte slootbodem [m]	Hoogte slootbodem [m+NAP]	Dikte deklaag (onder sloot) [m]
GEN_V1	P_09_27.74	132.0	+2.32	-0.70	0.60	-0.90	0.50
GEN_V2	P_09_27.94	37.0	+2.31	-0.70	0.60	-0.90	0.00
GEN_V3	P_09_28.44	33.5	+2.25	-0.70	0.60	-0.90	0.00
GEN_V5	P_09_28.66	34.0	+2.24	-0.70	-	-	0.90
GEN_V7	P_09_29.02	45.0	+2.21	-0.70	0.60	-0.90	1.00
GEN_V8	P_09_29.12	39.5	+2.19	-0.70	0.60	-0.90	0.80
GEN_V9	P_09_29.26	86.0	+2.19	-0.90	0.60	-1.10	0.00
GEN_V10	P_09_29.48	64.5	+2.18	-0.90	25.00	-1.10	0.00
GEN_V11	P_09_29.52	44.0	+2.17	-0.90	-	-	0.40
GEN_V12	P_09_29.66	40.0	+2.17	-0.90	0.60	-1.10	0.20
GEN_V13	P_09_30.02	40.0	+2.15	-0.90	0.60	-1.10	0.00
GEN_V14	P_09_30.24	64.0	+2.14	-0.90	1.50	-1.44	0.00

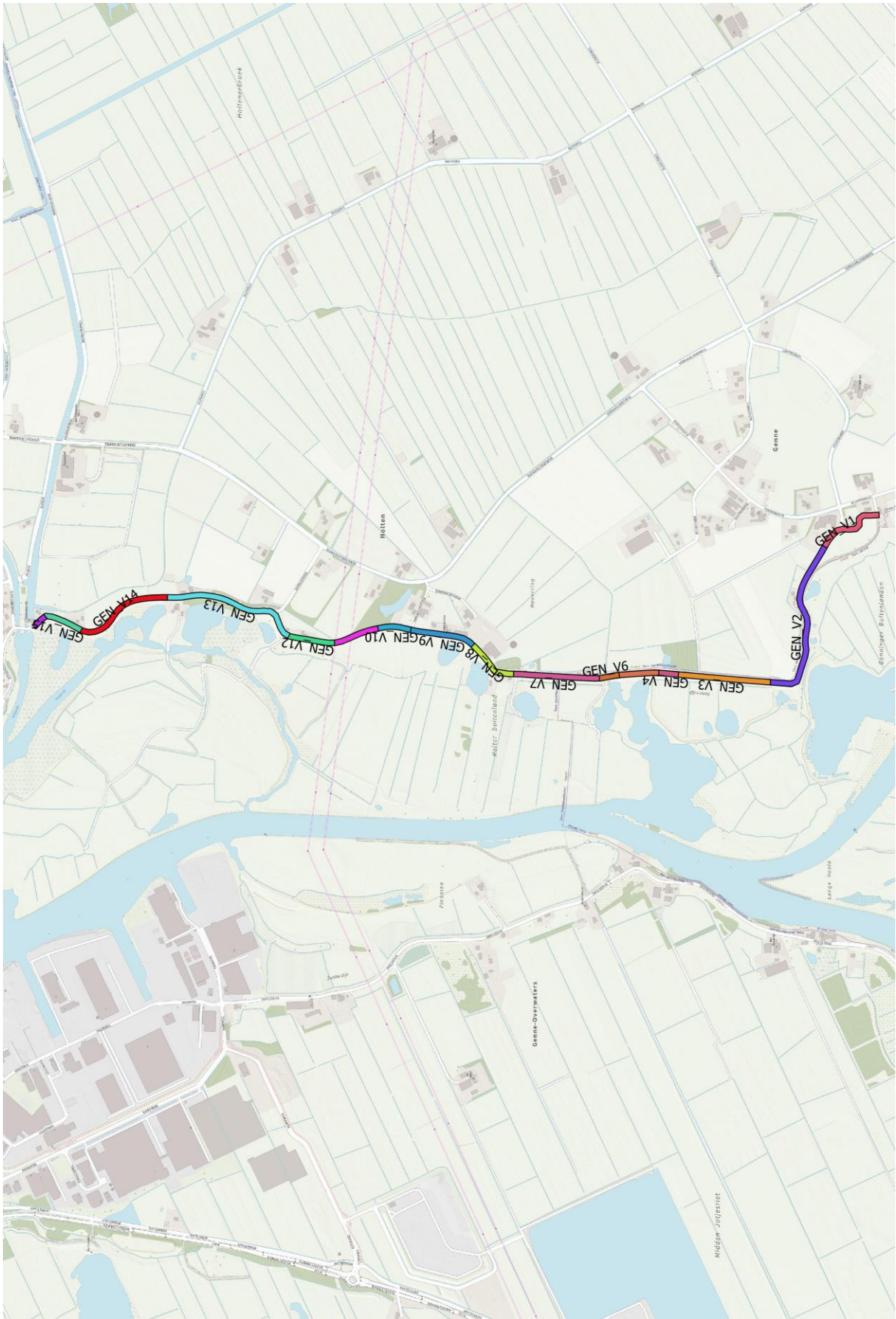
Hasselt-Zwartsluis

Maatgevende profielen voor het traject Hasselt-Zwartsluis zijn gegeven in Tabel 12.⁵

Tabel 12: Maatgevende profielen; Hasselt-Zwartsluis

Vak ID	Maatgevend profiel	Dijkbasis [m]	Ondergrens buiten-waterstand [m+NAP]	Polderpeil (winter) [m+NAP]	Breedte slootbodem [m]	Hoogte slootbodem [m+NAP]	Dikte deklaag (onder sloot) [m]
HAS_V3	P_09_33.72	39.5	+2.00	-1.20	3.52	-1.37	2.03
HAS_V5	P_09_34.08	42.0	+2.00	-1.20	3.19	-1.46	3.34
HAS_V6	P_09_34.64	39.5	+2.00	-1.20	90.00	-6.00	0.00
HAS_V7	P_09_35.22	45.5	+1.98	-1.20	2.00	-1.44	2.26
HAS_V9	P_09_35.84	42.5	+1.96	-1.20	0.70	-1.32	1.28
HAS_V10	P_09_35.94	42.5	+1.96	-1.20	0.70	-1.32	0.78
HAS_V11	P_09_36.30	42.5	+1.96	-1.20	0.70	-1.17	0.83
HAS_V12	P_09_36.56	43.5	+1.95	-1.20	0.70	-1.12	0.00
HAS_V13	P_09_36.74	102.5	+1.95	-1.20	0.70	-1.12	0.28
HAS_V14	P_09_36.88	44.0	+1.95	-1.20	0.70	-1.12	0.28
HAS_V15	P_09_36.96	127.5	+1.95	-1.20	1.00	-1.54	0.00
HAS_V16	P_09_37.12	42.5	+1.94	-1.20	1.00	-1.54	1.06
HAS_V17	P_09_37.36	41.5	+1.94	-1.20	1.00	-1.64	0.36
HAS_V18	P_09_37.50	42.0	+1.93	-1.20	1.00	-1.64	1.16
HAS_V19	P_09_37.70	43.5	+1.93	-1.20	1.00	-2.00	2.10
HAS_V20	P_09_37.82	42.5	+1.93	-1.20	1.00	-2.00	1.40
HAS_V21	P_09_38.18	42.5	+1.92	-1.20	1.00	-2.10	2.20
HAS_V22	P_09_38.30	43.0	+1.92	-1.20	1.00	-2.10	2.30

⁵ Voor de maatgevende profielen van de vakken HAS_V11 t/m HAS_V14 ligt de slootbodem volgens Watergangen Waterschap Drents Overijsselse Delta boven het winterpeil. De berekeningen zijn hier niet op aangepast. Indien de slootbodem in werkelijkheid lager ligt, wordt de lengte van het opbarstkanaal in sommige berekeningen enigszins overschat.



Figuur 54: Vakindeling; Genne-Streukel



Figuur 55: Vakindeling; Hasselt-Zwartsluis

6 Analytische berekeningen

6.1 Algemeen

Om inzicht in de consequenties van de aanpassing van de rekenregel van Sellmeijer (2013) en in de gevoeligheden van de kwelweglengte, de korreldiameter D_{70} , de specifieke doorlatendheid en het slootpeil tijdens hoogwater te verkrijgen is per vak de kritieke buitenwaterstand in opeenvolgende stappen berekend (Tabel 13). Hierbij is de schematisatie steeds verder geactualiseerd.

De berekeningen zijn uitgevoerd met en zonder fictieve lengte van het voorland. In alle berekeningen is rekenregel Sellmeijer 2 (vigerende rekenregel conform Sellmeijer (2011)) gehanteerd.

De berekende kritieke buitenwaterstanden worden ten slotte vergeleken met historische extreme buitenwaterstanden.

Tabel 13: Overzicht analytische berekeningen

Stap	Kwelweglengte	Eigenschappen watervoerend pakket	Rekenwaarden korreldiameter	Rekenwaarden specifieke doorlatendheid	Slootpeil tijdens hoogwater
1A	Dijkbasis	WBI-SOS	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Winterpeil
1B	Fictief, gemaximeerd				
2A	Dijkbasis	WBI-SOS	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Winterpeil
2B	Fictief, gemaximeerd				
3A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Winterpeil
3B	Fictief, gemaximeerd				
4A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Winterpeil
4B	Fictief, gemaximeerd				
5A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Verhoogd slootpeil
5B	Fictief, gemaximeerd				
6A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Verhoogd slootpeil
6B	Fictief, gemaximeerd				

6.2 Randvoorwaarden en uitgangspunten

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

- Gemiddelde korreldiameter schaalproeven $D_{70m} = 0.208$ mm
- 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

Voor dijkkringtraject 9-1 geldt een veiligheidsfactor piping van 1.62. Voor de schematiseringsfactor piping is 1.0 aangehouden.

Bepaling fictieve lengte voorland

De fictieve lengte van het voorland is berekend conform [2], Bijlage E. De berekening van de fictieve lengte van het voorland is opgenomen in Bijlage 7.

De verticale doorlatendheid van de deklaag in het voorland is geschat aan de hand van peilbuismetingen tijdens het hoogwater van januari 2012. Na kalibratie van het 3D grondwatermodel

is een doorlatendheid van 0.005-0.05 m/d voorgesteld. Bij het bepalen van de lek lengte en de fictieve lengte van het voorland is een verticale doorlatendheid van 0.05 m/d aangehouden.

De in rekening te brengen lengte van het voorland en dikte van de deklaag zijn bepaald op basis van de resultaten van het geofysisch onderzoek, en is maximaal gelijk aan de breedte van de strook waar geofysisch onderzoek heeft plaatsgevonden. Bij het bepalen van de lengte van het voorland en de dikte van de deklaag is rekening gehouden met de in [2] 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 4.

Voor berekeningen met fictieve lengte voorland is de aanwezige kwelweglengte gelijkgesteld aan de som van de dijkbasis (horizontale afstand tussen buitenteen en uittreepunt) en de fictieve lengte van het voorland, mits niet langer dan tweemaal de dijkbasis.

Stap 1: Eigenschappen watervoerend pakket op basis van WBI-SOS + karakteristieke waarden van korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid + winterpeil

De hoogte van het maaiveld is ontleend aan het Actueel Hoogtebestand Nederland. De onderkant van de deklaag is ontleend aan de geotechnische profielen. De hoogte van de onderkant van het zandpakket, de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid zijn ontleend aan het betrokken SOS segment. Voor de hoogte van de onderkant van het zandpakket is de gemiddelde waarde volgens het betrokken SOS segment gehanteerd.

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. De bepaling van de effectieve doorlatendheid is opgenomen in Bijlage 6.

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).

Voor de binnendijkse waterstand is in geval van open water het winterpeil aangehouden. Indien geen open water voorkomt, is de binnendijkse waterstand gelijkgesteld aan de hoogte van het maaiveld ter plaatse van het uittreepunt.

Stap 2: Eigenschappen watervoerend pakket op basis van WBI-SOS + gemiddelde waarden van korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid + winterpeil

In tegenstelling tot in Stap 1 zijn bij de controle op piping in Stap 2 de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid gehanteerd.

Stap 3: Eigenschappen watervoerend pakket op basis van onderzoeken en ondergrondmodel NL3D + karakteristieke waarden van korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid + winterpeil

Ten opzichte van de invoer in Stap 1 zijn de hoogte van de onderkant van het zandpakket, de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid aangepast. Op basis van de resultaten van het beschikbare grondonderzoek is aangenomen dat er op het traject Hasselt-Zwartsluis – in tegenstelling tot de bodemopbouw volgens het betrokken SOS segment – direct onder de deklaag een 3.0 m dikke zandlaag met een doorlatendheid van 8 m/d aanwezig is.

De hoogte van de onderkant van het zandpakket is ontleend aan de bodemopbouw op basis van ondergrondmodel NL3D. Rekening houdend met de aanwezigheid van minder doorlatende grondlagen, is de onderkant van het zandpakket voor de trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis gelijkgesteld aan respectievelijk NAP -24 m en NAP -34 m.

De korreldiameter D_{70} is afgeleid uit de korrelgrootteverdelingen van monsters tot 2 m beneden de onderkant van de deklaag op het traject km 27.52-38.56. Hierbij is de korreldiameter D_{70} begrensd tot 0.400 mm, aangezien hogere waarden uitsluitend zijn aangetroffen op locaties waar een aanzienlijk dikke deklaag aanwezig is (diepte monster beneden NAP -5 m).

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. De bepaling van de effectieve doorlatendheid is opgenomen in Bijlage 6.

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

Stap 4: Eigenschappen watervoerend pakket op basis van onderzoeken en ondergrondmodel NL3D + gemiddelde waarden van korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid + winterpeil

In tegenstelling tot in Stap 3 worden bij de controle op piping in Stap 4 de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid gehanteerd.

Stap 5: Eigenschappen watervoerend pakket op basis van onderzoeken en ondergrondmodel NL3D + karakteristieke waarden van korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil

Ten opzichte van de invoer in Stap 3 is bij de controle op piping in Stap 5 in geval van open water een verhoogd (sloot)peil aangehouden. Deze is bepaald op basis van de hoogte van het maaiveld in de omgeving. De binnendijkse waterstand voor de trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis is in geval van open water gelijkgesteld aan respectievelijk NAP +0.10 m en NAP -0.70 m.

Stap 6: Eigenschappen watervoerend pakket op basis van onderzoeken en ondergrondmodel NL3D + gemiddelde waarden van korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil

In tegenstelling tot in stap 5 worden bij de controle op piping in stap 6 de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid gehanteerd.

6.3 Resultaten

Genne-Streukel

De kritieke buitenwaterstand, het kritiek verval en de kritieke kwelweglengte voor de maatgevende profielen is gegeven in Tabel 14. Voor de rood gearceerde velden geldt dat de berekende kritieke buitenwaterstand lager is dan de voor het betrokken profiel geldende ondergrenswaarde. Voor de groen gearceerde velden geldt dat de berekende kritieke buitenwaterstand hoger is dan de voor het betrokken profiel geldende ondergrenswaarde.

Tabel 14: Kritieke buitenwaterstand, kritiek verval en kritieke kwelweglengte; Genne-Streukel

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand [m+NAP] Kritiek verval [m] Kritieke kwelweglengte (behorend bij ondergrenswaarde) [m]											
	Stap 1: Watervoerend pakket o.b.v. WBI-SOS + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 2: Watervoerend pakket o.b.v. WBI-SOS + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 3: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 4: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 5: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil		Stap 6: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B	6A	6B
GEN_V1	1.89	1.89	2.76	2.76	2.14	2.14	3.17	3.17	2.94	2.94	3.97	3.97
	2.44	2.44	3.31	3.31	2.69	2.69	3.72	3.72	2.69	2.69	3.72	3.72
	158	158	113	113	142	142	99	99	99	99	68	68
GEN_V2	0.12	0.12	0.42	0.42	0.19	0.19	0.53	0.53	0.99	0.99	1.33	1.33
	0.82	0.82	1.12	1.12	0.89	0.89	1.23	1.23	0.89	0.89	1.23	1.23
	167	167	119	119	150	150	104	104	106	106	73	73
GEN_V3	0.05	0.63	0.32	1.10	0.12	0.77	0.43	1.34	0.92	1.57	1.23	2.14
	0.75	1.33	1.02	1.80	0.82	1.47	1.13	2.04	0.82	1.47	1.13	2.04
	166	166	118	118	146	146	102	102	103	103	71	71
GEN_V5	0.84	0.88	1.11	1.17	0.90	0.95	1.21	1.28	0.90	0.95	1.21	1.28
	0.77	0.81	1.04	1.10	0.83	0.88	1.14	1.21	0.83	0.88	1.14	1.21
	116	116	82	82	104	104	72	72	104	104	72	72
GEN_V7	0.56	1.20	0.90	1.77	0.64	1.35	1.04	2.03	1.44	2.15	1.84	2.83
	0.96	1.60	1.30	2.17	1.04	1.75	1.44	2.43	1.04	1.75	1.44	2.43
	142	142	101	101	128	128	89	89	85	85	59	59
GEN_V8	0.40	0.40	0.71	0.71	0.47	0.47	0.83	0.83	1.27	1.27	1.63	1.63
	0.86	0.86	1.17	1.17	0.93	0.93	1.29	1.29	0.93	0.93	1.29	1.29
	145	145	103	103	130	130	90	90	87	87	60	60
GEN_V9	0.77	0.77	1.36	1.36	0.93	0.93	1.64	1.64	1.93	1.93	2.64	2.64
	1.67	1.67	2.26	2.26	1.83	1.83	2.54	2.54	1.83	1.83	2.54	2.54
	172	172	122	122	154	154	107	107	100	100	69	69
GEN_V10	0.41	0.41	0.87	0.87	0.53	0.53	1.08	1.08	1.53	1.53	2.08	2.08
	1.31	1.31	1.77	1.77	1.43	1.43	1.98	1.98	1.43	1.43	1.98	1.98
	171	171	122	122	153	153	107	107	99	99	68	68
GEN_V11	1.47	1.47	1.81	1.81	1.55	1.55	1.94	1.94	1.55	1.55	1.94	1.94
	0.95	0.95	1.29	1.29	1.03	1.03	1.42	1.42	1.03	1.03	1.42	1.42
	85	85	59	59	76	76	52	52	76	76	52	52
GEN_V12	0.03	0.73	0.34	1.28	0.10	0.88	0.47	1.54	1.10	1.88	1.47	2.54
	0.87	1.57	1.18	2.12	0.94	1.72	1.31	2.38	0.94	1.72	1.31	2.38
	167	167	119	119	150	150	104	104	95	95	66	66
GEN_V13	-0.02	-0.02	0.29	0.29	0.05	0.05	0.41	0.41	1.05	1.05	1.41	1.41
	0.88	0.88	1.19	1.19	0.95	0.95	1.31	1.31	0.95	0.95	1.31	1.31
	169	169	120	120	152	152	106	106	97	97	67	67
GEN_V14	0.40	0.40	0.85	0.85	0.52	0.52	1.06	1.06	1.52	1.52	2.06	2.06
	1.30	1.30	1.75	1.75	1.42	1.42	1.96	1.96	1.42	1.42	1.96	1.96
	169	169	120	120	151	151	105	105	97	97	67	67

Hasselt-Zwartsluis

De kritieke buitenwaterstand, het kritiek verval en de kritieke kwelweglengte voor de maatgevende profielen is gegeven in Tabel 15. Voor de rood gearceerde velden geldt dat de berekende kritieke buitenwaterstand lager is dan de voor het betrokken profiel geldende ondergrenswaarde. Voor groen gearceerde velden geldt dat de berekende kritieke buitenwaterstand hoger is dan de voor het betrokken profiel geldende ondergrenswaarde.

Tabel 15: Kritieke buitenwaterstand, kritiek verval en kritieke kwelweglengte; Hasselt-Zwartsluis

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand [m+NAP] Kritiek verval [m] Kritieke kwelweglengte (behorend bij ondergrenswaarde) [m]											
	Stap 1: Watervoerend pakket o.b.v. WBI-SOS + karakteristieke waarden korrel diameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 2: Watervoerend pakket o.b.v. WBI-SOS + gemiddelde waarden korrel diameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 3: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + karakteristieke waarden korrel diameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 4: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + gemiddelde waarden korrel diameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 5: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + karakteristieke waarden korrel diameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil		Stap 6: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + gemiddelde waarden korrel diameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B	6A	6B
HAS_V3	0.27 0.86 141	0.96 1.55 141	0.58 1.17 100	1.51 2.10 100	0.34 0.93 131	1.07 1.66 131	0.70 1.29 90	1.71 2.30 90	0.84 0.93 102	1.57 1.66 102	1.20 1.29 71	2.21 2.30 71
HAS_V5	0.72 0.92 115	1.46 1.66 115	1.04 1.24 82	2.05 2.25 82	0.79 0.99 107	1.58 1.78 107	1.17 1.37 74	2.27 2.46 74	1.29 0.99 80	2.08 1.78 80	1.67 1.37 54	2.77 2.46 54
HAS_V6	-0.34 0.86 178	0.35 1.55 178	-0.03 1.17 127	0.90 2.10 127	-0.27 0.93 165	0.46 1.66 165	0.09 1.29 115	1.10 2.30 115	0.23 0.93 137	0.96 1.66 137	0.59 1.29 95	1.60 2.30 95
HAS_V7	0.45 0.97 135	0.45 0.97 135	0.79 1.31 96	0.79 1.31 96	0.53 1.05 125	0.53 1.05 125	0.93 1.45 87	0.93 1.45 87	1.03 1.05 97	1.03 1.05 97	1.43 1.45 67	1.43 1.45 67
HAS_V9	0.09 0.91 154	0.82 1.64 154	0.42 1.23 109	1.41 2.22 109	0.17 0.98 142	0.95 1.76 142	0.54 1.36 99	1.62 2.44 99	0.67 0.98 114	1.45 1.76 114	1.04 1.36 79	2.12 2.44 79
HAS_V10	-0.06 0.91 164	0.67 1.63 164	0.26 1.23 117	1.25 2.21 117	0.01 0.98 152	0.79 1.75 152	0.39 1.36 105	1.46 2.43 105	0.51 0.98 123	1.29 1.75 123	0.89 1.36 85	1.96 2.43 85
HAS_V11	-0.05 0.91 163	0.47 1.42 163	0.28 1.23 116	0.97 1.92 116	0.03 0.98 151	0.57 1.52 151	0.40 1.35 105	1.16 2.11 105	0.53 0.98 122	1.07 1.52 122	0.90 1.35 84	1.66 2.11 84
HAS_V12	-0.29 0.91 181	0.44 1.64 181	0.04 1.24 129	1.03 2.23 129	-0.21 0.99 168	0.56 1.76 168	0.17 1.37 116	1.24 2.44 116	0.29 0.99 138	1.06 1.76 138	0.67 1.37 96	1.74 2.44 96
HAS_V13	0.80 1.91 174	1.52 2.64 174	1.48 2.59 124	2.46 3.57 124	0.94 2.05 161	1.71 2.82 161	1.72 2.84 112	2.79 3.91 112	1.44 2.05 132	2.21 2.82 132	2.22 2.84 91	3.29 3.91 91
HAS_V14	-0.19 0.93 174	0.56 1.67 174	0.14 1.26 124	1.15 2.27 124	-0.11 1.00 161	0.68 1.80 161	0.27 1.39 112	1.37 2.48 112	0.39 1.00 132	1.18 1.80 132	0.77 1.39 91	1.87 2.48 91
HAS_V15	1.10 2.30 181	1.10 2.30 181	1.92 3.12 129	1.92 3.12 129	1.27 2.47 168	1.27 2.47 168	2.21 3.41 116	2.21 3.41 116	1.77 2.47 138	1.77 2.47 138	2.71 3.41 96	2.71 3.41 96
HAS_V16	0.03 0.91	0.03 0.91	0.35 1.23	0.35 1.23	0.10 0.98	0.10 0.98	0.48 1.36	0.48 1.36	0.60 0.98	0.60 0.98	0.98 1.36	0.98 1.36

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand [m+NAP] Kritiek verval [m] Kritieke kwelweglengte (behorend bij ondergrenswaarde) [m]											
	Stap 1: Watervoerend pakket o.b.v. WBI-SOS + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 2: Watervoerend pakket o.b.v. WBI-SOS + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 3: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 4: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 5: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil		Stap 6: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B	6A	6B
	156	156	111	111	145	145	100	100	116	116	80	80
HAS_V17	-0.20	-0.18	0.11	0.15	-0.13	-0.10	0.24	0.28	0.37	0.40	0.74	0.78
	0.89	0.91	1.20	1.24	0.96	0.99	1.33	1.37	0.96	0.99	1.33	1.37
	170	170	121	121	158	158	110	110	129	129	89	89
HAS_V18	0.05	0.77	0.37	1.35	0.12	0.89	0.50	1.56	0.62	1.39	1.00	2.06
	0.90	1.63	1.22	2.20	0.97	1.75	1.35	2.42	0.97	1.75	1.35	2.42
	154	154	109	109	142	142	99	99	114	114	79	79
HAS_V19	0.37	1.13	0.70	1.73	0.44	1.25	0.83	1.95	0.94	1.75	1.33	2.45
	0.94	1.70	1.27	2.30	1.01	1.82	1.40	2.52	1.01	1.82	1.40	2.52
	134	134	96	96	124	124	86	86	97	97	67	67
HAS_V20	0.13	0.87	0.46	1.46	0.21	0.99	0.59	1.68	0.71	1.49	1.09	2.18
	0.91	1.65	1.24	2.24	0.99	1.77	1.37	2.46	0.99	1.77	1.37	2.46
	148	148	105	105	137	137	95	95	109	109	75	75
HAS_V21	0.38	1.13	0.71	1.72	0.46	1.25	0.84	1.94	0.96	1.75	1.34	2.44
	0.92	1.67	1.25	2.26	1.00	1.79	1.38	2.48	1.00	1.79	1.38	2.48
	132	132	94	94	122	122	84	84	94	94	65	65
HAS_V22	0.42	1.18	0.75	1.77	0.50	1.30	0.88	2.00	1.00	1.80	1.38	2.50
	0.93	1.69	1.26	2.28	1.01	1.81	1.39	2.51	1.01	1.81	1.39	2.51
	130	130	92	92	120	120	83	83	92	92	64	64

6.4 Evaluatie

Genne-Streukel

Uit Tabel 14 volgt dat berekende kritieke buitenwaterstand slechts in enkele gevallen hoger is dan de voor het betrokken profiel geldende ondergrenswaarde. De maatgevende profielen binnen de vakken GEN_V2 en GEN_V5 worden als meest ongunstig aangemerkt. In beide gevallen bevindt zich een buitendijkse kolk op beperkte afstand van de buitenteen.

Gevoeligheid van eigenschappen watervoerend pakket

Bij toepassing van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van de beschikbare grondonderzoeken en het ondergrondmodel NL3D (Stap 3A) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van WBI-SOS (Stap 1A). Dit is het gevolg van het hanteren van een grotere korreldiameter D_{70} en een kleiner doorlaatvermogen in de berekeningen bij Stap 3. De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.1-0.2 m (gemiddeld: 0.1 m), overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 8-19 m (gemiddeld: 16 m) (Figuur 56 en Figuur 57).

Gevoeligheid van slootpeil tijdens hoogwater

Bij toepassing van het verhoogd slootpeil (Stap 5A) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van het winterpeil (Stap 3A). De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.8-1.0 m (gemiddeld: 0.9 m), overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 43-54 m (gemiddeld: 49 m) (Figuur 56 en Figuur 57). De verhoging van de kritieke buitenwaterstand is gelijk aan de gehanteerde verhoging van het slootpeil.

Gevoeligheid van kwelweglengte

Bij toepassing van de kwelweglengte inclusief de fictieve lengte van het voorland (Stap 5B) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de kwelweglengte exclusief de fictieve lengte van het voorland (Stap 5A). Dit geldt uiteraard alleen voor de maatgevende profielen in de vakken GEN_V3, GEN_V5, GEN_V7 en GEN_V12, waar een afdoende deklaag in het voorland aanwezig is. De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.0-0.8 m (gemiddeld: 0.5 m) (Figuur 56 en Figuur 57).

Gevoeligheid van rekenwaarden korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid

Bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 6B) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 5B). Dit is het gevolg van het hanteren van een grotere korreldiameter D_{70} en een lagere specifieke doorlatendheid in de berekeningen bij Stap 6. De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.3-1.0 m (gemiddeld: 0.5 m), overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 24-33 m (gemiddeld: 29 m) (Figuur 56 en Figuur 57).

Hasselt-Zwartsluis

Uit Tabel 15 volgt dat berekende kritieke buitenwaterstand slechts in enkele gevallen hoger is dan de voor het betrokken profiel geldende ondergrenswaarde. De maatgevende profielen binnen de vakken HAS_V16 en HAS_V17 worden als meest ongunstig aangemerkt. In beide gevallen kan door het ontbreken van een behoorlijke deklaag geen voorland in rekening worden gebracht.

Gevoeligheid van eigenschappen watervoerend pakket

Bij toepassing van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van de beschikbare grondonderzoeken en het ondergrondmodel NL3D (Stap 3A) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van WBI-SOS (Stap 1A). Dit is hoofdzakelijk het gevolg van het hanteren van een grotere korreldiameter D_{70} in de berekeningen bij Stap 3 (het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket is bij het aanpassen van de eigenschappen van het watervoerend pakket nagenoeg ongewijzigd gebleven). De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.1-0.2 m (gemiddeld: 0.1 m), overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 9-13 m (gemiddeld: 11 m) (Figuur 58 en Figuur 59).

Gevoeligheid van slootpeil tijdens hoogwater

Bij toepassing van het verhoogd slootpeil (Stap 5A) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van het winterpeil (Stap 3A). De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.5 m, overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 27-30 m (gemiddeld: 28 m) (Figuur 58 en Figuur 59). De verhoging van de kritieke buitenwaterstand is gelijk aan de gehanteerde verhoging van het slootpeil.

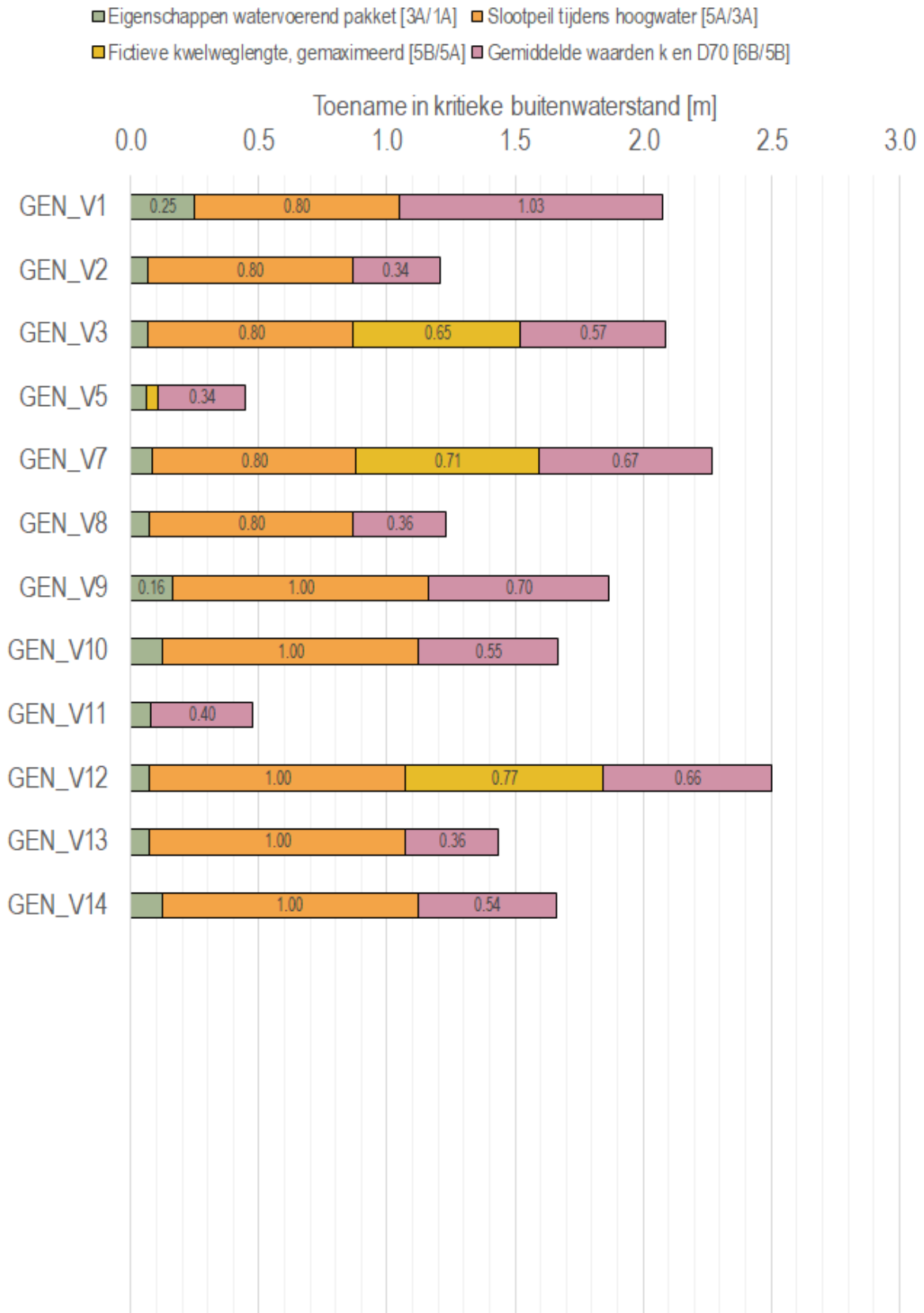
Gevoeligheid van kwelweglengte

Bij toepassing van de kwelweglengte inclusief de fictieve lengte van het voorland (Stap 5B) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de kwelweglengte exclusief de fictieve lengte van het voorland (Stap 5A). Dit geldt uiteraard alleen voor de maatgevende profielen in de vakken waar een afdoende deklaag in het voorland aanwezig is. Voor de maatgevende profielen binnen de vakken HAS_V15 en HAS_V16 geldt dat er geen afdoende deklaag in het voorland aanwezig is. Voor het maatgevende profiel in het vak HAS_V7 geldt dat er in het geheel geen voorland aanwezig is. De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.0-0.8 m (gemiddeld: 0.7 m) (Figuur 58 en Figuur 59).

Gevoeligheid van rekenwaarden korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid

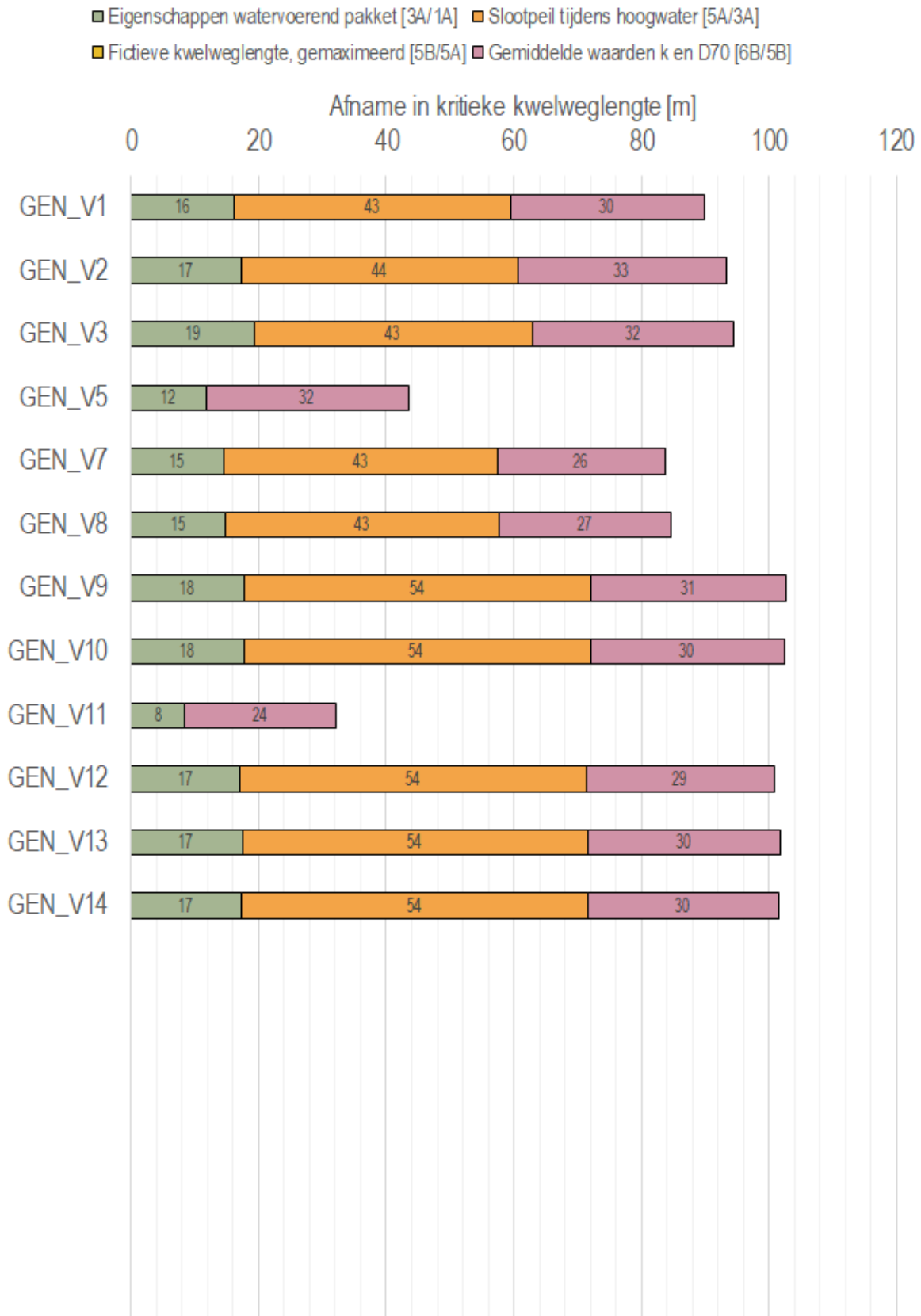
Bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 6B) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 5B). Dit is het gevolg van het hanteren van een grotere korreldiameter D_{70} en een lagere specifieke doorlatendheid in de berekeningen bij Stap 6. De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.4-1.1 m (gemiddeld: 0.7 m), overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 25-43 m (gemiddeld: 36 m) (Figuur 58 en Figuur 59).

Genne-Streukel



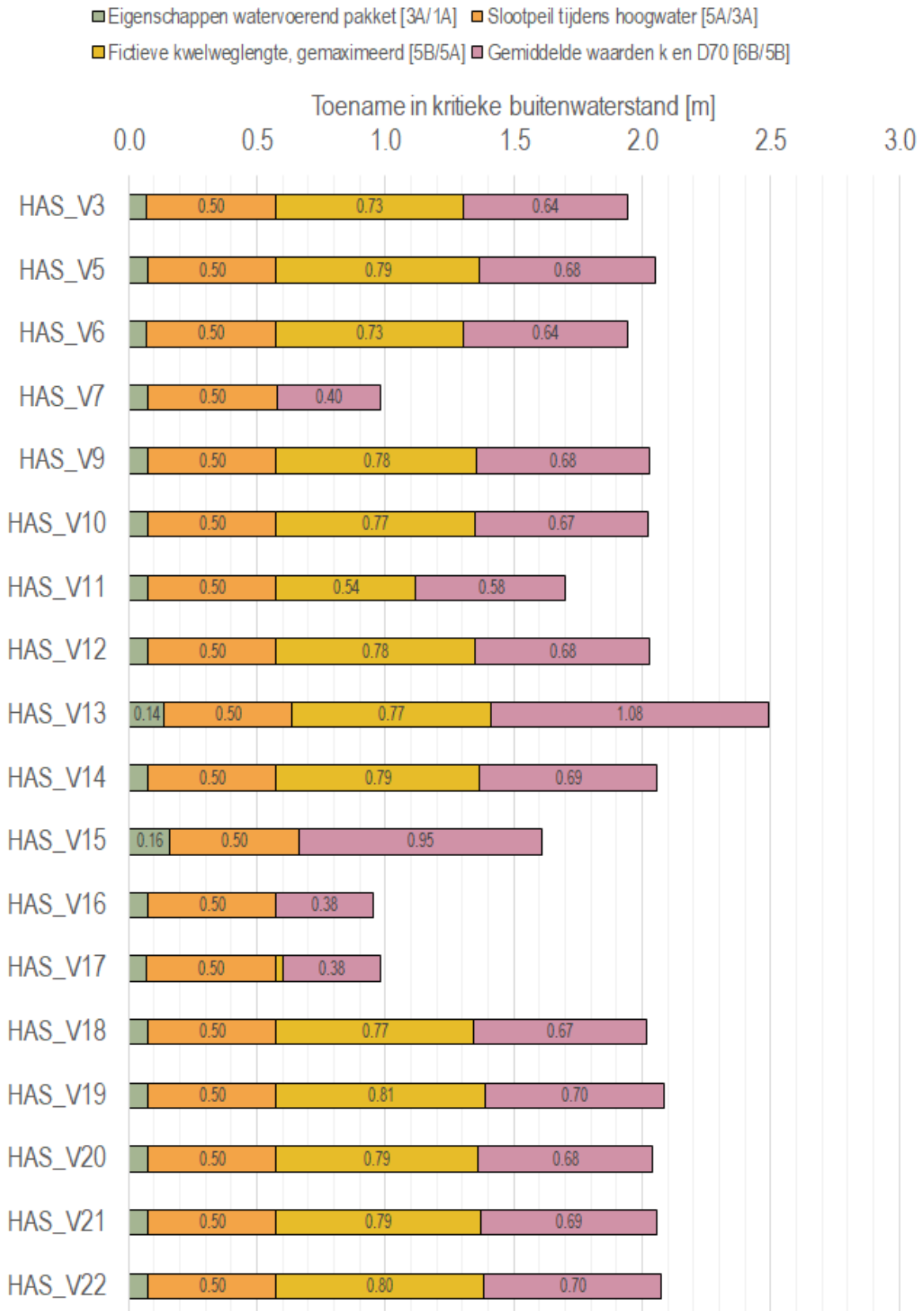
Figuur 56: Invloeden van eigenschappen watervoerend pakket, kwelweglengte, slootpeil en rekenwaarden korrel diameter D_{70} en specifieke doorlatendheid op kritieke buitenwaterstand; Genne-Streukel

Genne-Streukel



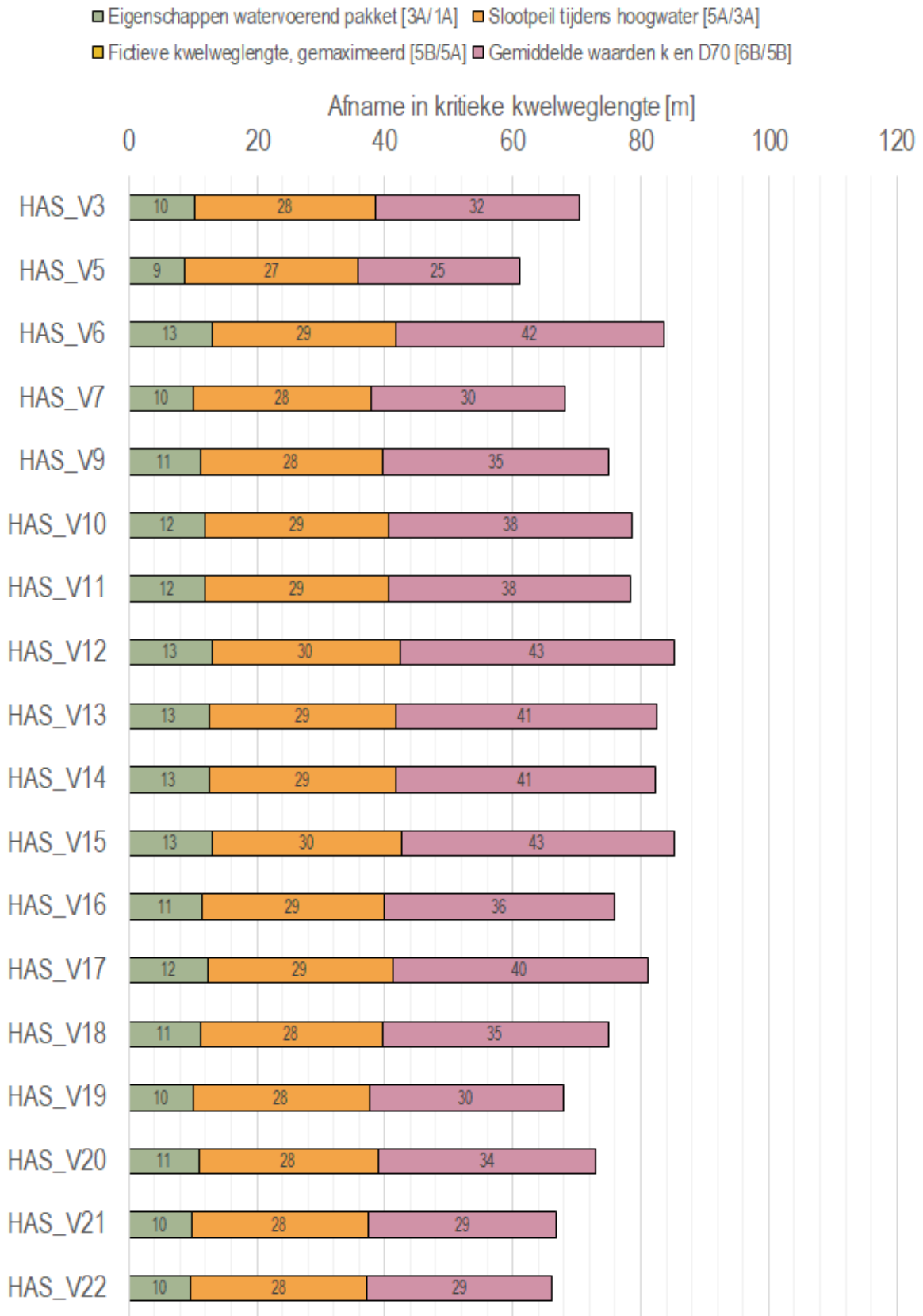
Figuur 57: Invloeden van eigenschappen watervoerend pakket, kwelweglengte, slootpeil en rekenwaarden korrel diameter D_{70} en specifieke doorlatendheid op kritieke kwelweglengte; Genne-Streukel

Hasselt-Zwartsluis



Figuur 58: Invloeden van eigenschappen watervoerend pakket, kwelweglengte, slooppeil en rekenwaarden korrel diameter D_{70} en specifieke doorlatendheid op kritieke buitenwaterstand; Hasselt-Zwartsluis

Hasselt-Zwartsluis



Figuur 59: Invloeden van eigenschappen watervoerend pakket, kwelweglengte, slooppeil en rekenwaarden korrel diameter D_{70} en specifieke doorlatendheid op kritieke kwelweglengte; Hasselt-Zwartsluis

6.5 Beslisboom piping

In [8] wordt aangegeven dat recent het beeld is 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. Voorwaarde is dat er in dijkversterkingsplannen ruimte wordt gereserveerd voor een pipingmaatregel.

De resultaten van de analytische berekeningen in Stap 1 t/m Stap 6 worden ter verkenning ingevoerd in het processchema van de beslisboom piping. Opgemerkt moet worden dat gebruik is gemaakt van de conceptversie van de beslisboom piping (Bijlage 9).

Genne-Streukel

Het tekort aan kwelweglengte na het delen van de kritieke kwelweglengte door een factor 2 is gegeven in Tabel 16.⁶ Voor de groen gearceerde profielen is geen pipingmaatregel benodigd (omdat de aanwezige kwelweglengte langer is dan de kritieke kwelweglengte). Voor de oranje gearceerde profielen dient volgens de beslisboom ruimte te worden gereserveerd voor een pipingmaatregel (omdat de aanwezige kwelweglengte korter is dan de kritieke kwelweglengte, maar langer dan 50% van de kritieke kwelweglengte). Voor de rood gearceerde profielen dient volgens de beslisboom een pipingmaatregel te worden uitgevoerd (omdat de aanwezige kwelweglengte korter is dan 50% van de kritieke kwelweglengte), tenzij er lokale criteria van toepassing zijn.

Tabel 16: Tekort aan kwelweglengte na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2; Genne-Streukel

Vak ID	Tekort aan kwelweglengte na delen kritieke kwelweglengte door factor 2 [m]											
	Stap 1: Watervoerend pakket o.b.v. WBI-SOS + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 2: Watervoerend pakket o.b.v. WBI-SOS + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 3: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 4: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 5: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil		Stap 6: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B	6A	6B
GEN_V1	-53	-53			-61	-61						
GEN_V2	46	46	22	22	38	38	15	15	16	16	0	0
GEN_V3	49	16	25	-8	40	6	17	-16	18	-16	2	-31
GEN_V5	24	21	7	4	18	15	2	0	18	15	2	0
GEN_V7	26	-11	6	-31	19	-18	-1	-38	-3	-40	-16	
GEN_V8	33	33	12	12	26	26	6	6	4	4	-9	-9
GEN_V9	0	0	-25	-25	-9	-9	-32	-32	-36	-36		
GEN_V10	21	21	-4	-4	12	12	-11	-11	-15	-15	-30	-30
GEN_V11	-2	-2	-14	-14	-6	-6	-18	-18	-6	-6	-18	-18
GEN_V12	43	3	19	-21	35	-5	12	-28	8	-32	-7	
GEN_V13	45	45	20	20	36	36	13	13	9	9	-6	-6
GEN_V14	20	20	-4	-4	12	12	-11	-11	-16	-16	-30	-30

⁶ 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 [8]. Gekozen is om de factor op de kritieke kwelweglengte toe te passen.

Hasselt-Zwartsluis

Het tekort aan kwelweglengte na het delen van de kritieke kwelweglengte door een factor 2 is gegeven in Tabel 17.⁷ Voor de groen gearceerde profielen is geen pipingmaatregel benodigd (omdat de aanwezige kwelweglengte langer is dan de kritieke kwelweglengte). Voor de oranje gearceerde profielen dient volgens de beslisboom ruimte te worden gereserveerd voor een pipingmaatregel (omdat de aanwezige kwelweglengte korter is dan de kritieke kwelweglengte, maar langer dan 50% van de kritieke kwelweglengte). Voor de rood gearceerde profielen dient volgens de beslisboom een pipingmaatregel te worden uitgevoerd (omdat de aanwezige kwelweglengte korter is dan 50% van de kritieke kwelweglengte), tenzij er lokale criteria van toepassing zijn.

Tabel 17: Tekort aan kwelweglengte na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2; Hasselt-Zwartsluis

Vak ID	Tekort aan kwelweglengte na delen van kritieke kwelweglengte door factor 2 [m]											
	Stap 1: Watervoerend pakket o.b.v. WBI-SOS + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 2: Watervoerend pakket o.b.v. WBI-SOS + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 3: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 4: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil		Stap 5: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil		Stap 6: Watervoerend pakket o.b.v. ond./NL3D + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B	6A	6B
HAS_V3	31	-9	11	-29	26	-14	6	-34	12	-28	-4	
HAS_V5	16	-26	-1		11	-31	-5		-2		-15	
HAS_V6	50	10	24	-15	43	4	18	-22	29	-11	8	-32
HAS_V7	22	22	3	3	17	17	-2	-2	3	3	-12	-12
HAS_V9	34	-8	12	-30	29	-14	7	-36	14	-28	-3	
HAS_V10	39	-3	16	-27	33	-9	10	-32	19	-24	0	
HAS_V11	39	9	16	-14	33	3	10	-20	19	-11	0	-30
HAS_V12	47	3	21	-23	40	-3	15	-29	26	-18	4	-39
HAS_V13	-16	-60	-41		-22	-66	-47		-37			
HAS_V14	43	-1	18	-26	37	-7	12	-32	22	-22	2	-42
HAS_V15	-37	-37	-63	-63	-44	-44			-58	-58		
HAS_V16	36	36	13	13	30	30	8	8	16	16	-2	-2
HAS_V17	44	42	19	18	38	36	13	12	23	22	3	2
HAS_V18	35	-7	13	-29	29	-13	7	-35	15	-27	-3	
HAS_V19	24	-20	4	-39	19	-25	0		5	-39	-10	
HAS_V20	32	-11	10	-32	26	-16	5	-37	12	-30	-5	
HAS_V21	23	-19	4	-38	18	-24	0		5	-38	-10	
HAS_V22	22	-21	3	-40	17	-26	-1		3	-40	-11	

⁷ 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 [8]. In deze gevoeligheidsanalyse is ervoor gekozen om de factor op de kritieke kwelweglengte toe te passen.

6.6 Aanvullende berekeningen

Volgens [2] mag de fictieve kwelweglengte niet groter zijn dan tweemaal de dijkbasis (afstand tussen de buitenteen en het uittreepunt), tenzij door de beheerder met aanvullende controles wordt aangetoond dat de fictieve kwelweglengte volledig mag worden meegenomen. Daarnaast dient de afsluitende kleilaag in het voorland verzadigd te zijn, minimaal 1 m dik te zijn en (afhankelijk van het landgebruik) door een toplaag met een dikte van 0.3-0.5 m te worden beschermd.

Om inzicht in de consequenties van beide beperkingen te verkrijgen zijn aanvullende analytische berekeningen uitgevoerd waarbij de fictieve kwelweglengte niet is gemaximeerd tot tweemaal de dijkbasis, maar volledig is meegenomen, en waarbij er bovendien geen beperking is gesteld aan de minimale dikte van de deklaag in het voorland (Tabel 18). Bij het bepalen van de fictieve kwelweglengte is aangenomen dat de (ondiepe) sloten in het voorland voldoende intree weerstand bieden, en dat de dikte van de deklaag in het voorland waar geen geofysisch onderzoek heeft plaatsgevonden gelijk is aan die in dat deel van hetzelfde voorland waar wel geofysisch onderzoek heeft plaatsgevonden. Voor de verticale doorlatendheid van de deklaag is 0.05 m/d aangehouden. De bepaling van de fictieve kwelweglengte is opgenomen in Bijlage 7.

Tabel 18: Overzicht aanvullende analytische berekeningen

Stap	Kwelweglengte	Eigenschappen watervoerend pakket	Rekenwaarden korreldiameter	Rekenwaarden specifieke doorlatendheid	Slootpeil tijdens hoogwater
7	Fictief, niet gemaximeerd	Onderzoek/NL3D	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Verhoogd slootpeil
8	Fictief, niet gemaximeerd	Onderzoek/NL3D	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Verhoogd slootpeil

Genne-Streukel

De kritieke buitenwaterstand, het kritiek verval en de kritieke kwelweglengte (behorend bij de ondergrenswaarde) zijn gegeven in Tabel 19. Ter vergelijking zijn in de tabel tevens de resultaten van de berekeningen bij Stap 3B, Stap 4B, Stap 5B en Stap 6B opgenomen.

Voor de beschouwde profielen binnen het traject Genne-Streukel varieert de lek lengte van het voorland tussen 78 m en 174 m. De verhouding van fictieve kwelweglengte tot dijkbasis varieert tussen 1.00 en 3.64. In verband met de aanwezigheid van buitendijkse kolken is er geen tot weinig voorland aanwezig voor de profielen in de vakken GEN_V2, GEN_V5, GEN_V8, GEN_V9, GEN_V13 en GEN_V14.

Gevoeligheid van kwelweglengte

Bij toepassing van de niet-gemaximeerde fictieve kwelweglengte (Stap 7) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de gemaximeerde fictieve kwelweglengte (Stap 5B). De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.0-2.0 m (gemiddeld: 0.5 m) (Figuur 60 en Figuur 62).

Gevoeligheid van rekenwaarden korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid

Bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 8) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7). Dit is het gevolg van het hanteren van een grotere korreldiameter D_{70} en een lagere specifieke doorlatendheid in de berekeningen bij Stap 8. De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.3-1.1 m (gemiddeld: 0.7 m), overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 24-33 m (gemiddeld: 29 m) (Figuur 60 en Figuur 62).

Tabel 19: Kritieke buitenwaterstand, kritiek verval en kritieke kwelweglengte; Genne-Streukel

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand [m+NAP] Kritiek verval [m] Kritieke kwelweglengte (behorend bij ondergrenswaarde) [m]					
	Stap 3B: Fictieve kwel- weglengte + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil	Stap 4B: Fictieve kwel- weglengte + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil	Stap 5B: Fictieve kwel- weglengte + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 6B: Fictieve kwel- weglengte + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 7: Fictieve kwel- weglengte, niet gemaximeerd + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 8: Fictieve kwel- weglengte, niet gemaximeerd + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil
GEN_V1	2.14 2.69 142	3.17 3.72 99	2.94 2.69 99	3.97 3.72 68	3.22 2.97 99	4.37 4.12 68
GEN_V2	0.19 0.89 150	0.53 1.23 104	0.99 0.89 106	1.33 1.23 73	0.99 0.89 106	1.33 1.23 73
GEN_V3	0.77 1.47 146	1.34 2.04 102	1.57 1.47 103	2.14 2.04 71	2.38 2.28 103	3.26 3.16 71
GEN_V5	0.95 0.88 104	1.28 1.21 72	0.95 0.88 104	1.28 1.21 72	0.95 0.88 104	1.28 1.21 72
GEN_V7	1.35 1.75 128	2.03 2.43 89	2.15 1.75 85	2.83 2.43 59	2.15 1.75 85	2.83 2.43 59
GEN_V8	0.47 0.93 130	0.83 1.29 90	1.27 0.93 87	1.63 1.29 60	1.27 0.93 87	1.63 1.29 60
GEN_V9	0.93 1.83 154	1.64 2.54 107	1.93 1.83 100	2.64 2.54 69	1.93 1.83 100	2.64 2.54 69
GEN_V10	0.53 1.43 153	1.08 1.98 107	1.53 1.43 99	2.08 1.98 68	3.09 2.99 99	4.24 4.14 68
GEN_V11	1.55 1.03 76	1.94 1.42 52	1.55 1.03 76	1.94 1.42 52	3.51 2.99 76	4.66 4.14 52
GEN_V12	0.88 1.72 150	1.54 2.38 104	1.88 1.72 95	2.54 2.38 66	3.09 2.93 95	4.22 4.06 66
GEN_V13	0.05 0.95 152	0.41 1.31 106	1.05 0.95 97	1.41 1.31 67	1.05 0.95 97	1.41 1.31 67
GEN_V14	0.52 1.42 151	1.06 1.96 105	1.52 1.42 97	2.06 1.96 67	1.52 1.42 97	2.06 1.96 67

Hasselt-Zwartsluis

De kritieke buitenwaterstand, het kritiek verval en de kritieke kwelweglengte (behorend bij de ondergrenswaarde) zijn gegeven in Tabel 20. Ter vergelijking zijn in de tabel tevens de resultaten van de berekeningen bij Stap 3B, Stap 4B, Stap 5B en Stap 6B opgenomen.

Voor de beschouwde profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis varieert de lek lengte van het voorland tussen 149 m en 287 m. De verhouding van fictieve kwelweglengte tot dijkbasis varieert tussen 1.00 en 5.94. In verband met de nabijheid van het Zwartewater en uitvliet De Muizenval is er geen tot weinig voorland aanwezig voor de profielen in de vakken HAS_V7 en HAS_V17.⁸

Gevoeligheid van kwelweglengte

Bij toepassing van de niet-gemaximeerde fictieve kwelweglengte (Stap 7) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de gemaximeerde fictieve kwelweglengte (Stap 5B). De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.0-3.0 m (gemiddeld: 1.5 m) (Figuur 63 en Figuur 65).

Gevoeligheid van rekenwaarden korreldiameter D_{70} en specifieke doorlatendheid

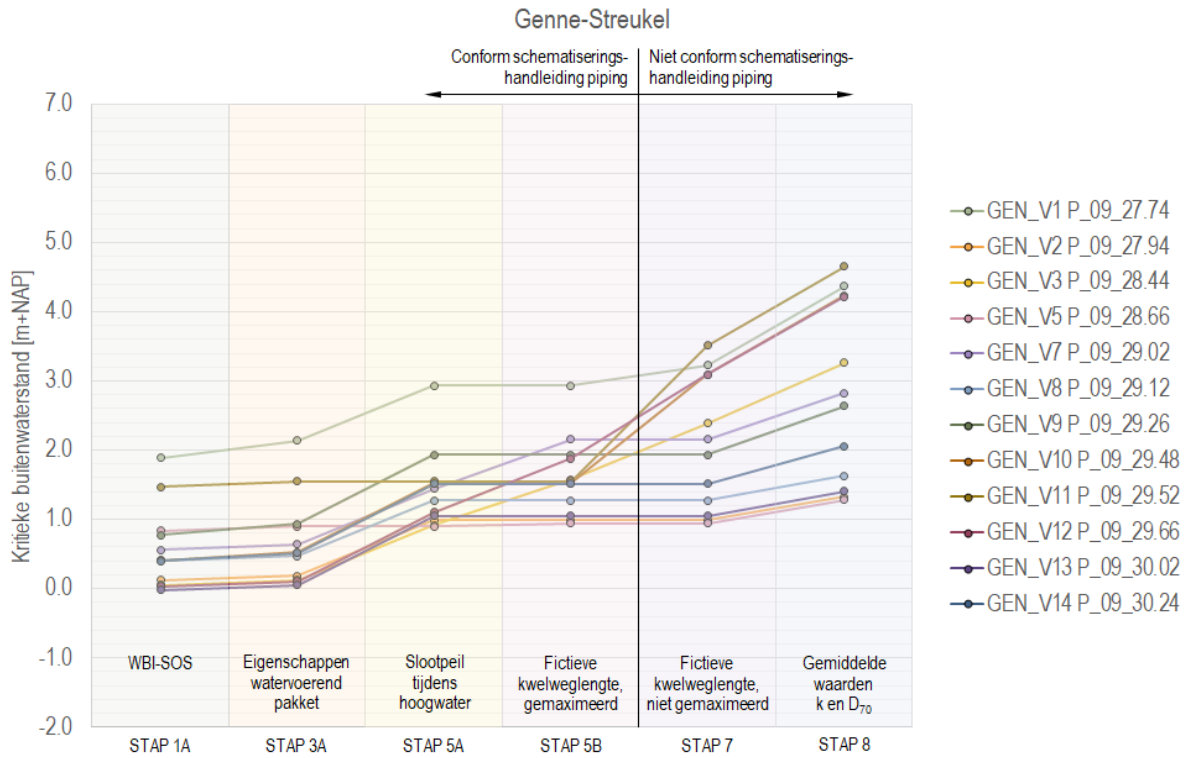
Bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 8) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7). Dit is het gevolg van het hanteren van een grotere korreldiameter D_{70} en een lagere specifieke doorlatendheid in de berekeningen bij Stap 8. De verhoging van de kritieke buitenwaterstand bedraagt 0.4-1.9 m (gemiddeld: 1.2 m), overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 25-43 m (gemiddeld: 36 m) (Figuur 63 en Figuur 65).

Tabel 20: Kritieke buitenwaterstand, kritiek verval en kritieke kwelweglengte; Hasselt-Zwartsluis

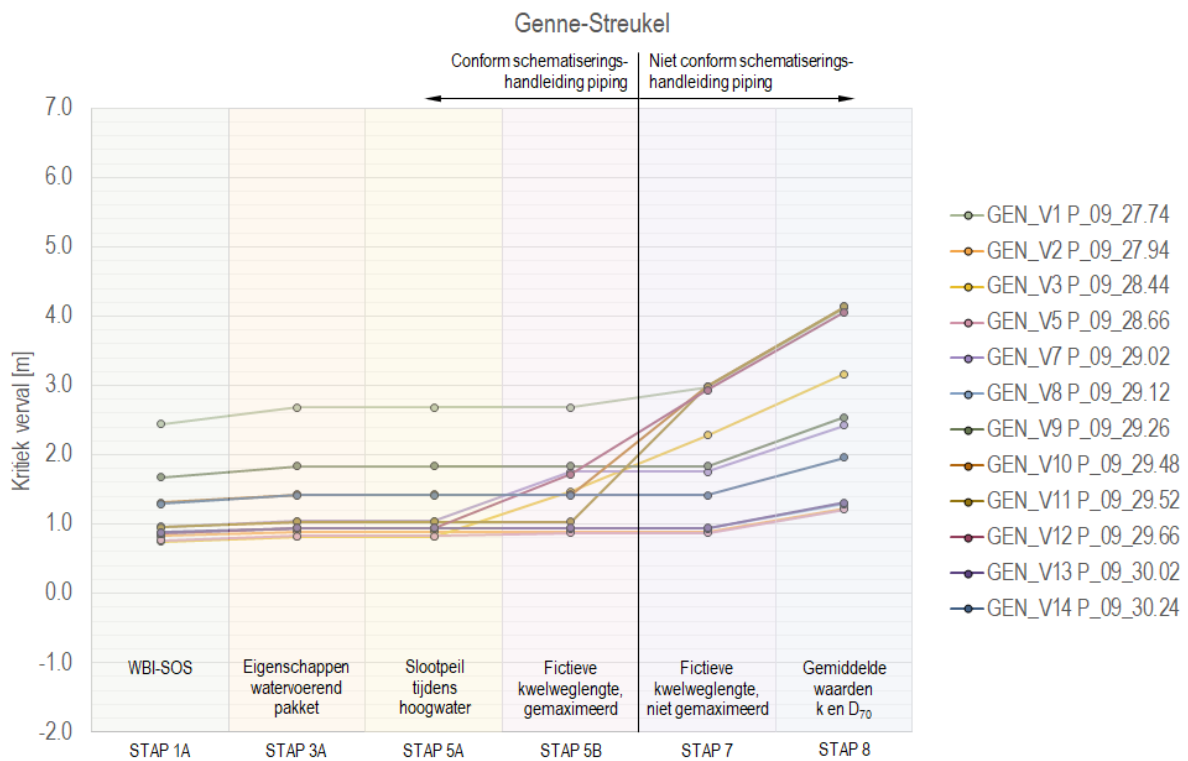
Vak ID	Kritieke buitenwaterstand [m+NAP] Kritiek verval [m] Kritieke kwelweglengte (behorend bij ondergrenswaarde) [m]					
	Stap 3B: Fictieve kwelweglengte + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil	Stap 4B: Fictieve kwelweglengte + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil	Stap 5B: Fictieve kwelweglengte + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 6B: Fictieve kwelweglengte + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 7: Fictieve kwelweglengte, niet gemaximeerd + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 8: Fictieve kwelweglengte, niet gemaximeerd + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil
HAS_V3	1.07 1.66 131	1.71 2.30 90	1.57 1.66 102	2.21 2.30 71	2.30 2.39 102	3.22 3.31 71
HAS_V5	1.58 1.78 107	2.27 2.46 74	2.08 1.78 80	2.77 2.46 54	3.88 3.58 80	5.25 4.95 54
HAS_V6	0.46 1.66 165	1.10 2.30 115	0.96 1.66 137	1.60 2.30 95	2.05 2.75 137	3.10 3.80 95
HAS_V7	0.53	0.93	1.03	1.43	1.03	1.43

⁸ In deze gevoeligheidsanalyse is ervan uitgegaan dat uitvliet De Muizenval onvoldoende intreeweerstand biedt.

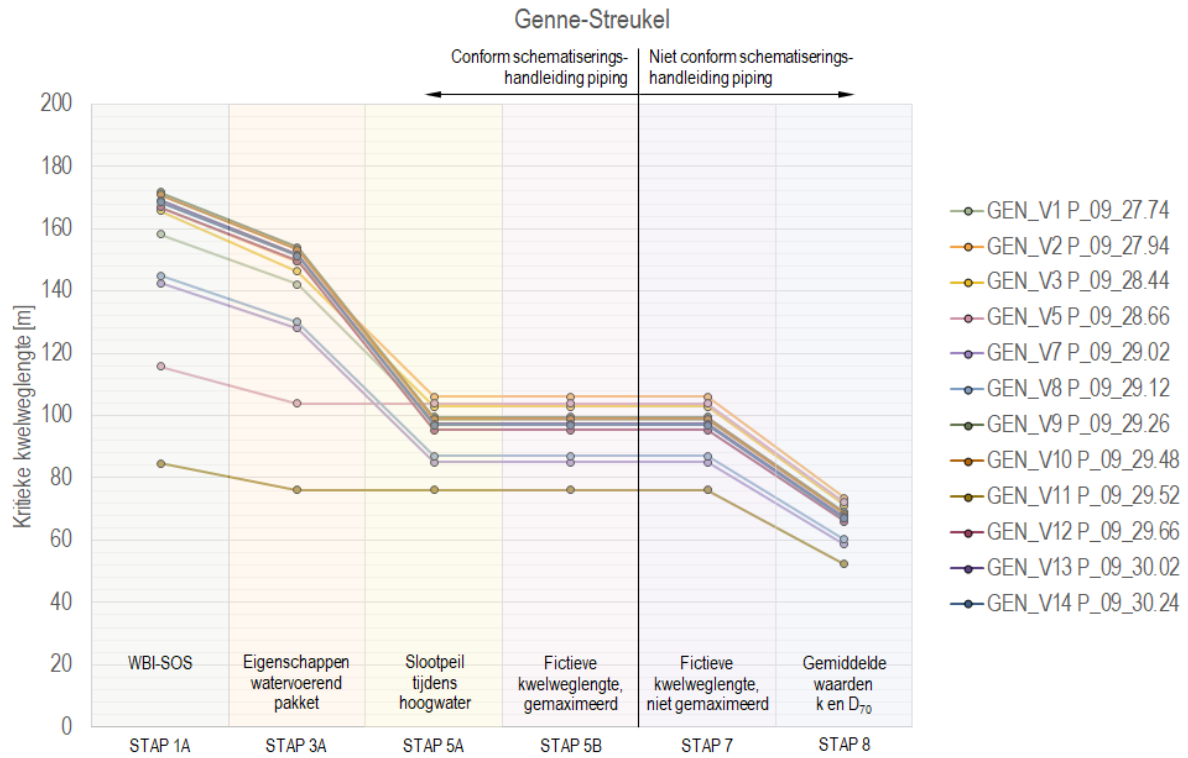
Vak ID	Kritieke buitenwaterstand [m+NAP] Kritiek verval [m] Kritieke kwelweglengte (behorend bij ondergrenswaarde) [m]					
	Stap 3B: Fictieve kwel- weglengte + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil	Stap 4B: Fictieve kwel- weglengte + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil	Stap 5B: Fictieve kwel- weglengte + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 6B: Fictieve kwel- weglengte + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 7: Fictieve kwel- weglengte, niet gemaximeerd + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 8: Fictieve kwel- weglengte, niet gemaximeerd + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil
	1.05 125	1.45 87	1.05 97	1.45 67	1.05 97	1.45 67
HAS_V9	0.95 1.76 142	1.62 2.44 99	1.45 1.76 114	2.12 2.44 79	2.67 2.99 114	3.82 4.13 79
HAS_V10	0.79 1.75 152	1.46 2.43 105	1.29 1.75 123	1.96 2.43 85	2.90 3.36 123	4.19 4.65 85
HAS_V11	0.57 1.52 151	1.16 2.11 105	1.07 1.52 122	1.66 2.11 84	1.68 2.13 122	2.50 2.95 84
HAS_V12	0.56 1.76 168	1.24 2.44 116	1.06 1.76 138	1.74 2.44 96	2.07 2.77 138	3.13 3.83 96
HAS_V13	1.71 2.82 161	2.79 3.91 112	2.21 2.82 132	3.29 3.91 91	3.59 4.21 132	5.21 5.83 91
HAS_V14	0.68 1.80 161	1.37 2.48 112	1.18 1.80 132	1.87 2.48 91	2.07 2.69 132	3.10 3.72 91
HAS_V15	1.27 2.47 168	2.21 3.41 116	1.77 2.47 138	2.71 3.41 96	3.36 4.06 138	4.93 5.63 96
HAS_V16	0.10 0.98 145	0.48 1.36 100	0.60 0.98 116	0.98 1.36 80	2.66 3.04 116	3.82 4.20 80
HAS_V17	-0.10 0.99 158	0.28 1.37 110	0.40 0.99 129	0.78 1.37 89	0.40 0.99 129	0.78 1.37 89
HAS_V18	0.89 1.75 142	1.56 2.42 99	1.39 1.75 114	2.06 2.42 79	2.44 2.79 114	3.51 3.86 79
HAS_V19	1.25 1.82 124	1.95 2.52 86	1.75 1.82 97	2.45 2.52 67	4.75 4.82 97	6.60 6.67 67
HAS_V20	0.99 1.77 137	1.68 2.46 95	1.49 1.77 109	2.18 2.46 75	4.02 4.30 109	5.68 5.96 75
HAS_V21	1.25 1.79 122	1.94 2.48 84	1.75 1.79 94	2.44 2.48 65	4.62 4.66 94	6.41 6.45 65
HAS_V22	1.30 1.81 120	2.00 2.51 83	1.80 1.81 92	2.50 2.51 64	4.49 4.50 92	6.22 6.23 64



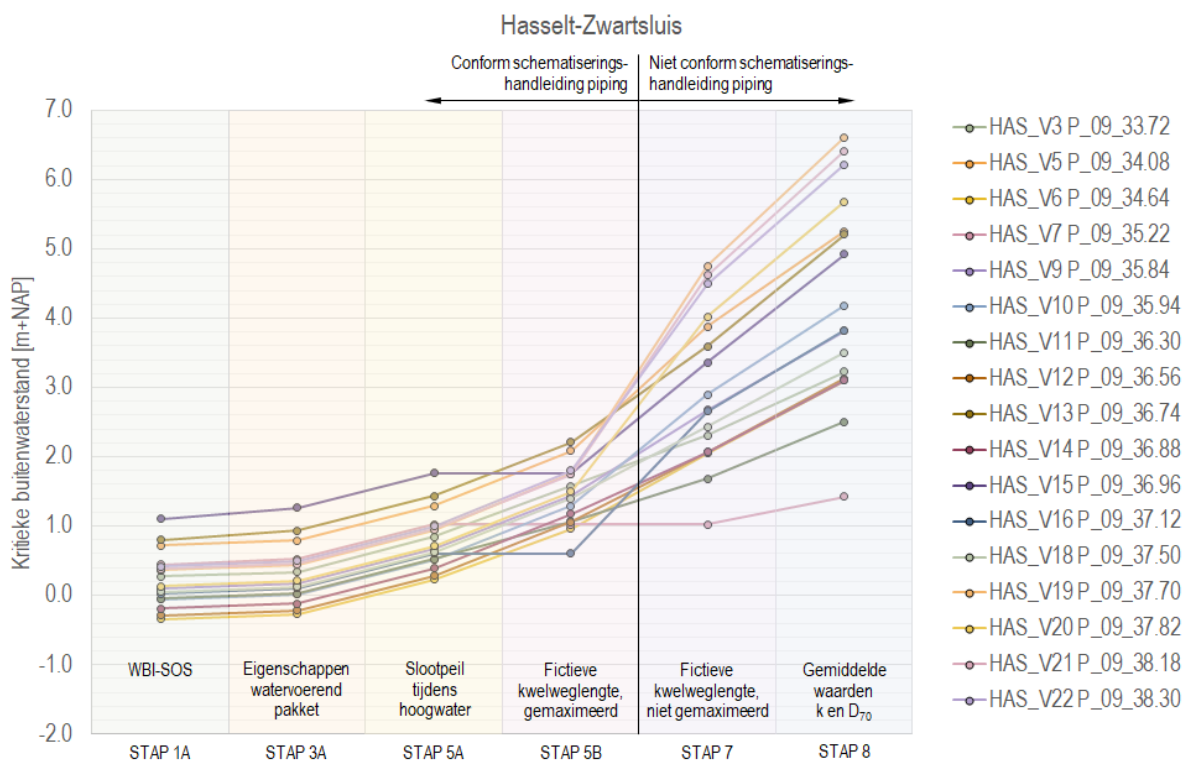
Figuur 60: Kritieke buitenwaterstand; Genne-Streukel



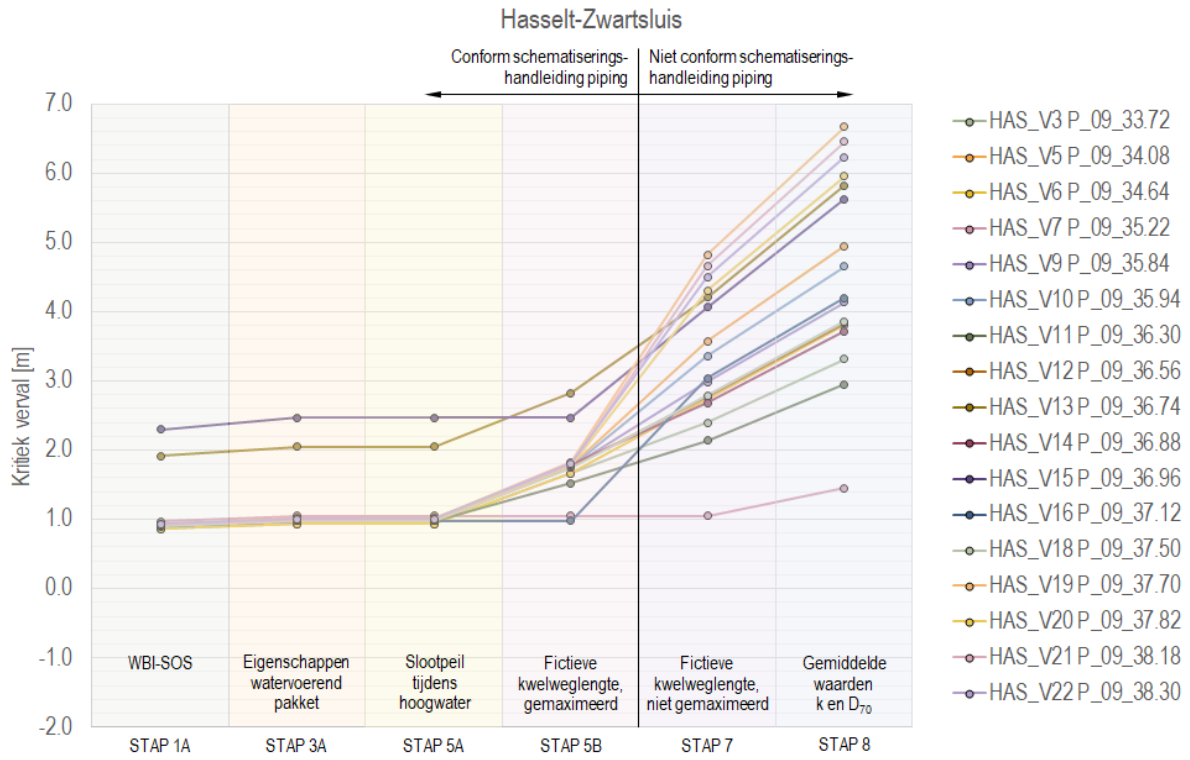
Figuur 61: Kritiek verval; Genne-Streukel



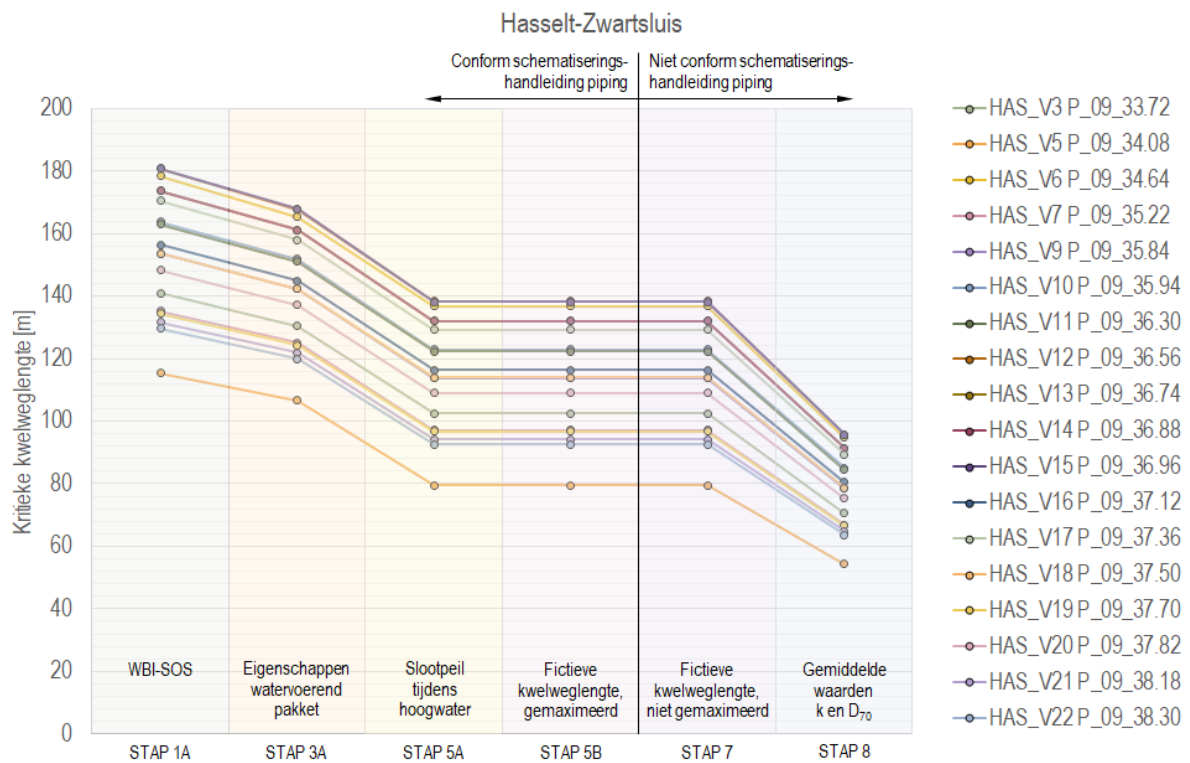
Figuur 62: Kritieke kwelweglengte (behorend bij ondergrenswaarde); Genne-Streukel



Figuur 63: Kritieke buitenwaterstand; Hasselt-Zwartsluis



Figuur 64: Kritiek verval; Hasselt-Zwartsluis



Figuur 65: Kritieke kwelweglengte (behorend bij ondergrenswaarde); Hasselt-Zwartsluis

6.7 Vergelijking met historische extreme buitenwaterstanden

De resultaten van de berekeningen van de kritieke buitenwaterstand in Stap 3B, Stap 4B, Stap 5B en Stap 6B worden vergeleken met historische extreme buitenwaterstanden. Een overzicht van extreme waterstanden van het Zwartewater bij Mond der Vecht en Zwartsluis buiten is gegeven in Tabel 23 en Tabel 24. Opgemerkt moet worden dat er voor Mond der Vecht sprake is van ontbrekende gegevens in de periode november 1983 tot april 1995, waaronder 14 en 15 januari 1984. Het valt op dat de rangorde voor Zwartsluis buiten niet precies overeenkomt met die voor Mond der Vecht. De Ramspolkering is eind 2002 in werking gesteld. Op 14 januari 1984 woedde een zware storm in het noordwesten van het land.

Uit Tabel 23 en Tabel 24 kan worden afgeleid dat de dijken binnen de trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis in de periode 1950-september 2018 zijn blootgesteld aan buitenwaterstanden tot 1.30-1.55 m. Er zijn geen registraties van wellen bekend (het is niet bekend of er in die periode naar wellen is gekeken en of deze geregistreerd zijn).

Genne-Streukel

De kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid (berekend met een schematiseringsfactor piping van 1.0 en een veiligheidsfactor piping van 1.00 (in plaats van 1.62)) is gegeven in Tabel 21.

Tabel 21: Vergelijking kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid met historische extreme buitenwaterstanden; Genne-Streukel

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid [m+NAP]					
	Stap 3B: Fictieve kwelweglengte + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil	Stap 4B: Fictieve kwelweglengte + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil	Stap 5B: Fictieve kwelweglengte + karakteristieke waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 6B: Fictieve kwelweglengte + gemiddelde waarden korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 7: Fictieve kwelweglengte, niet gemaximeerd + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 8: Fictieve kwelweglengte, niet gemaximeerd + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil
GEN_V1	3.80	5.47	4.60	6.27	5.07	6.92
GEN_V2	0.74	1.29	1.54	2.09	1.54	2.09
GEN_V3	1.69	2.60	2.49	3.40	3.80	5.22
GEN_V5	1.49	2.04	1.49	2.04	1.49	2.04
GEN_V7	2.44	3.53	3.24	4.33	3.24	4.33
GEN_V8	1.05	1.63	1.85	2.43	1.85	2.43
GEN_V9	2.07	3.21	3.07	4.21	3.07	4.21
GEN_V10	1.41	2.30	2.41	3.30	4.95	6.81
GEN_V11	2.19	2.83	2.19	2.83	5.36	7.22
GEN_V12	1.94	3.01	2.94	4.01	4.91	6.74
GEN_V13	0.64	1.22	1.64	2.22	1.64	2.22
GEN_V14	1.39	2.27	2.39	3.27	2.39	3.27

Bij toepassing van de gemaximeerde fictieve kwelweglengte in combinatie met het winterpeil en de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 3B) geldt voor meerdere profielen dat de berekende kritieke buitenwaterstand zou zijn overschreden tijdens in het verleden opgetreden hoogwaters. Bij toepassing van het verhoogd slootpeil (Stap 5B) zijn er minder tot geen profielen waarvoor de berekende kritieke buitenwaterstand zou zijn overschreden tijdens in het verleden opgetreden hoogwaters. Bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid in combinatie met het verhoogd slootpeil (Stap

6B) geldt voor alle profielen dat de berekende kritieke buitenwaterstand niet is overschreden tijdens de in het verleden opgetreden hoogwaters. Dit komt overeen met de tijdens de hoogwaters getoonde prestaties van de dijkvakken.

Bij toepassing van de niet-gemaximeerde fictieve kwelweglengte in combinatie met het verhoogd slootpeil en de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7) geldt voor enkele profielen dat de berekende kritieke buitenwaterstand zou zijn overschreden tijdens in het verleden opgetreden hoogwaters. Bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 8) geldt voor alle profielen dat de berekende kritieke buitenwaterstand niet is overschreden tijdens de in het verleden opgetreden hoogwaters. Dit komt overeen met de tijdens de hoogwaters getoonde prestaties van de dijkvakken.

Hasselt-Zwartsluis

De kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid (berekend met een schematiseringsfactor piping van 1.0 en een veiligheidsfactor piping van 1.00 (in plaats van 1.62)) is gegeven in Tabel 22.

Tabel 22: Vergelijking kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid met historische extreme buitenwaterstanden; Hasselt-Zwartsluis

Vak ID	Kritieke buitenwaterstand excl. veiligheid [m+NAP]					
	Stap 3B: Fictieve kwelweglengte + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil	Stap 4B: Fictieve kwelweglengte + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + winterpeil	Stap 5B: Fictieve kwelweglengte + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 6B: Fictieve kwelweglengte + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 7: Fictieve kwelweglengte, niet gemaximeerd + karakteristieke waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil	Stap 8: Fictieve kwelweglengte, niet gemaximeerd + gemiddelde waarden van korreldiameter en specifieke doorlatendheid + verhoogd slootpeil
HAS_V3	2.11	3.14	2.61	3.64	3.79	5.28
HAS_V5	2.69	3.80	3.19	4.30	6.10	8.32
HAS_V6	1.49	2.53	1.99	3.03	3.75	5.46
HAS_V7	1.17	1.83	1.67	2.33	1.67	2.33
HAS_V9	2.04	3.13	2.54	3.63	4.52	6.38
HAS_V10	1.87	2.96	2.37	3.46	4.98	7.07
HAS_V11	1.52	2.46	2.02	2.96	3.01	4.33
HAS_V12	1.66	2.75	2.16	3.25	3.79	5.51
HAS_V13	3.46	5.21	3.96	5.71	6.20	8.82
HAS_V14	1.79	2.91	2.29	3.41	3.74	5.41
HAS_V15	2.79	4.33	3.29	4.83	5.89	8.41
HAS_V16	0.71	1.32	1.21	1.82	4.54	6.43
HAS_V17	0.51	1.12	1.01	1.62	1.01	1.62
HAS_V18	1.98	3.06	2.48	3.56	4.16	5.90
HAS_V19	2.38	3.52	2.88	4.02	7.74	10.74
HAS_V20	2.09	3.20	2.59	3.70	6.69	9.37
HAS_V21	2.36	3.47	2.86	3.97	7.51	10.41
HAS_V22	2.42	3.55	2.92	4.05	7.28	10.08

Bij toepassing van de gemaximeerde fictieve kwelweglengte in combinatie met het winterpeil en de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 3B) geldt voor meerdere profielen dat de berekende kritieke buitenwaterstand zou zijn overschreden tijdens de in het verleden opgetreden hoogwaters. Bij toepassing van het verhoogd slootpeil (Stap 5B) zijn er

minder profielen waarvoor de berekende kritieke buitenwaterstand zou zijn overschreden tijdens de in het verleden opgetreden hoogwaters. Bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid in combinatie met het verhoogd slootpeil (Stap 6B) geldt voor alle profielen dat de berekende kritieke buitenwaterstand niet is overschreden tijdens de in het verleden opgetreden hoogwaters. Dit komt overeen met de tijdens de hoogwaters getoonde prestaties van de dijkvakken.

Bij toepassing van de niet-gemaximeerde fictieve kwelweglengte in combinatie met het verhoogd slootpeil en de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 7) geldt alleen voor het profiel in vak HAS_V17 nabij uitvliet De Muizenval dat de berekende kritieke buitenwaterstand zou zijn overschreden tijdens in het verleden opgetreden hoogwaters.⁹ Bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 8) geldt voor alle profielen dat de berekende kritieke buitenwaterstand niet is overschreden tijdens de in het verleden opgetreden hoogwaters. Dit komt overeen met de tijdens de hoogwaters getoonde prestaties van de dijkvakken.

⁹ In deze gevoeligheidsanalyse is ervan uitgegaan dat uitvliet De Muizenval onvoldoende intreeweerstand biedt.

Tabel 23: Hoogst gemeten waterstand bij Mond der Vecht per jaar in periode 1950-september 2018



Rangorde	Waterstand [m+NAP]	Datum	Rangorde	Waterstand [m+NAP]	Datum en tijd
1	1.44	01/11/1998	30	0.70	15/11/1977
2	1.34	01/02/1983	30	0.70	01/03/2008
3	1.30	26/02/2002	33	0.67	22/01/1956
4	1.23	19/12/1965	33	0.67	26/03/1978
5	1.12	19/01/2007	35	0.65	12/09/1957
6	1.10	01/02/1953	36	0.64	19/01/1951
6	1.10	05/01/2012	36	0.64	30/08/2010
8	1.08	17/01/1984	38	0.63	23/01/1959
9	1.06	06/12/1961	39	0.60	01/01/1975
9	1.06	18/12/1974	39	0.60	12/02/2005
11	1.01	17/02/1962	41	0.59	20/04/1980
12	0.99	09/02/2004	42	0.58	03/01/2003
13	0.98	31/12/1999	43	0.56	07/12/2011
14	0.97	28/12/2001	43	0.56	09/02/2016
15	0.94	22/11/1963	43	0.56	13/09/2017
15	0.94	03/01/2018	46	0.55	25/02/1997
17	0.93	03/01/1966	46	0.55	20/12/2014
18	0.92	03/01/1976	48	0.54	01/11/2006
19	0.90	02/01/1967	49	0.53	17/12/1973
19	0.90	15/03/1981	50	0.52	06/12/2013
21	0.89	04/12/1960	51	0.49	06/11/1996
22	0.88	09/03/2000	52	0.45	18/01/1952
23	0.87	18/01/1968	52	0.45	28/03/1972
23	0.87	31/03/2015	54	0.40	20/05/1969
25	0.78	19/05/1955	55	0.39	06/01/1982
25	0.78	18/12/1979	56	0.38	07/04/1995
27	0.75	07/01/1958	57	0.35	10/07/2009
28	0.72	07/10/1954	58	0.29	22/11/1971
29	0.71	25/04/1950	59	0.11	13/12/1964
30	0.70	04/11/1970			

Tabel 24: Hoogst gemeten waterstand bij Zwartsluis buiten per jaar in periode 1950-september 2018



Rangorde	Waterstand [m+NAP]	Datum	Rangorde	Waterstand [m+NAP]	Datum en tijd
1	1.42	15/01/1984	36	0.61	18/03/1968
2	1.30	01/02/1983	37	0.60	22/01/1956
3	1.21	26/02/2002	37	0.60	23/01/1993
4	1.09	19/12/1965	39	0.59	10/02/1988
4	1.09	30/10/1998	39	0.59	13/06/1996
6	1.00	04/12/1960	41	0.57	30/08/2010
6	1.00	18/01/2007	42	0.56	26/11/1992
8	0.99	05/01/2012	42	0.56	09/02/2016
9	0.98	03/01/1976	42	0.56	13/09/2017
10	0.96	01/02/1953	45	0.54	13/11/1972
11	0.90	28/02/1990	45	0.54	16/12/1982
11	0.90	28/12/2001	47	0.53	03/03/1999
13	0.88	18/12/1974	48	0.52	07/12/2011
14	0.86	03/01/2018	49	0.51	12/02/2005
15	0.85	09/02/2004	50	0.50	21/01/1959
16	0.82	02/01/1995	50	0.50	15/07/1970
17	0.81	31/03/2015	50	0.50	22/12/2014
18	0.78	07/01/1958	53	0.49	06/01/1991
19	0.76	19/12/1986	54	0.48	18/05/1955
20	0.75	06/12/1961	54	0.48	01/01/1975
20	0.75	22/11/1963	54	0.48	01/11/2006
20	0.75	09/03/2000	57	0.47	25/02/1997
23	0.74	12/02/1962	57	0.47	06/12/2013
24	0.72	03/01/1966	59	0.46	20/04/1980
24	0.72	18/12/1979	60	0.44	13/11/1973
26	0.71	25/04/1950	60	0.44	05/02/2003
26	0.71	15/11/1977	62	0.42	28/04/1985
28	0.70	16/01/1954	63	0.40	14/02/1989
29	0.69	12/09/1957	64	0.39	18/01/1951
30	0.66	02/01/1967	65	0.34	18/01/1952
31	0.64	26/03/1978	66	0.32	12/04/1969
32	0.62	01/01/1981	66	0.32	10/07/2009
32	0.62	02/01/1987	68	0.26	22/11/1971
32	0.62	27/01/1994	69	0.18	13/12/1964
32	0.62	01/03/2008			

7 D-Geo Flow berekeningen

7.1 Algemeen

D-Geo Flow is een graphical userinterface 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 verfijning van de bodemlagen in het watervoerend pakket en het toevoegen van anisotropie op 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.

Na afronding van de berekeningen is een issue naar voren gekomen rond de Heave Boundary Condition in de modellering van D-Geo Flow. Bij de oplevering van het onderzoek was nog geen uitsluitsel over de aard en omvang van het issue. Dit betekent dat de gepresenteerde resultaten mogelijk moeten worden herzien in de toekomst.

Er zijn twee dwarsprofielen met D-Geo Flow doorgerekend: Profiel 28.44 op het traject Genne-Streukel en Profiel 37.70 op het traject Hasselt-Zwartsluis. Elk profiel start bij een basismodel volgens de richtlijnen van Sellmeijer. Vervolgens worden stapsgewijs verschillende elementen toegevoegd in de vorm van een gevoeligheidsberekening. In de resultaten wordt gewerkt met de berekende kritieke vervallen en de berekende pipeprogressie voor de gedefinieerde ondergrenswaarde bij de buitenwaterstand voor de dijktrajecten.

7.2 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Bodemopbouw en input parameters

De bodemopbouw en inputparameters zijn in het basismodel met een uniform watervoerend pakket afgestemd op de analytische berekeningen volgens Sellmeijer. De deklaagdoorlatendheid is afgeleid in paragraaf 4.10. Voor het basismodel resulteert in de input gegeven in Tabel 25. Bij de verfijning van het watervoerend pakket wordt de schematisatie aangehouden, zoals bepaald in het SOS. Deze wordt uitgebreid met een piping gevoelige laag onder de deklaag, voortkomend uit het bodemonderzoek in Hoofdstuk 3 en 4. Het verfijnde D-Geo Flow model heeft input zoals gepresenteerd in Tabel 26 en Tabel 27.

Tabel 25: Uitgangspunten doorlatendheden basismodellen

	Karakteristieke waarden		Gemiddelde waarden	
	Uniforme horizontale doorlatendheid (m/dag)	Uniforme verticale doorlatendheid (m/dag)	Uniforme horizontale doorlatendheid (m/dag)	Uniforme verticale doorlatendheid (m/dag)
Dijkpaal				
Profiel 28.44 (Genne-Streukel)	84,8	84,8	43,6	43,6
Profiel 37.70 (Hasselt-Zwartsluis)	75,9	75,9	39,0	39,0

Tabel 26: Uitgangspunten doorlatendheden meerlaags model profiel 28.44

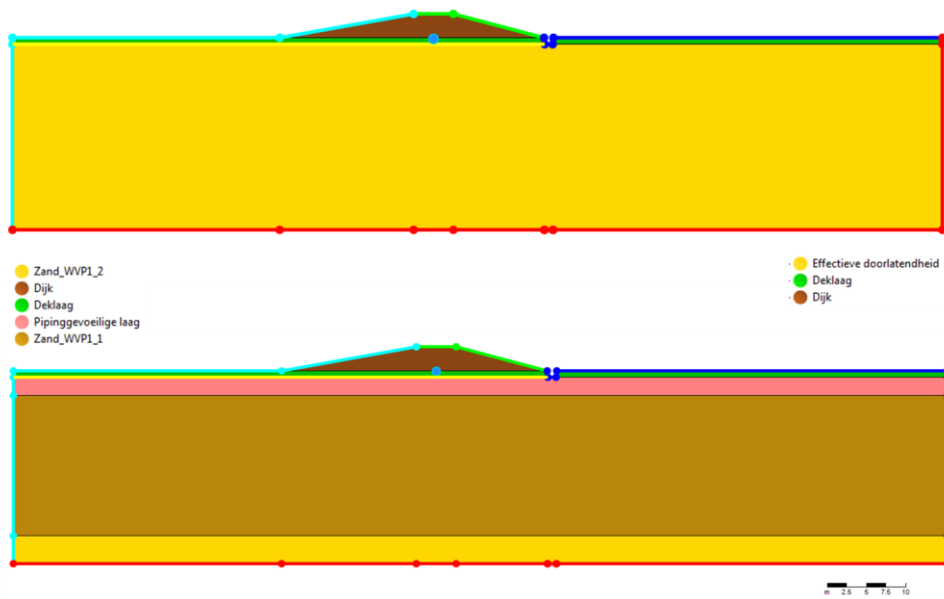
Profiel 28.44	Laagdiepte (m NAP)	Karakteristieke waarden		Gemiddelde waarden	
		Horizontale doorlatendheid (m/dag)	Verticale doorlatendheid (m/dag)	Horizontale doorlatendheid (m/dag)	Verticale doorlatendheid (m/dag)
Deklaag	0,1 t/m -0,7	0,1	0,1	0,05	0,05
Piping-gevoelige laag	-0,7 t/m -3,0	15,6	15,6	8,0	8,0
WVP1_1	-3,0 t/m -20,5	97,3	97,3	50,0	50,0
WVP1_2	-20,5 t/m -24	68,1	68,1	35,0	35,0

Tabel 27: Uitgangspunten doorlatendheden meerlaags model profiel 37.70

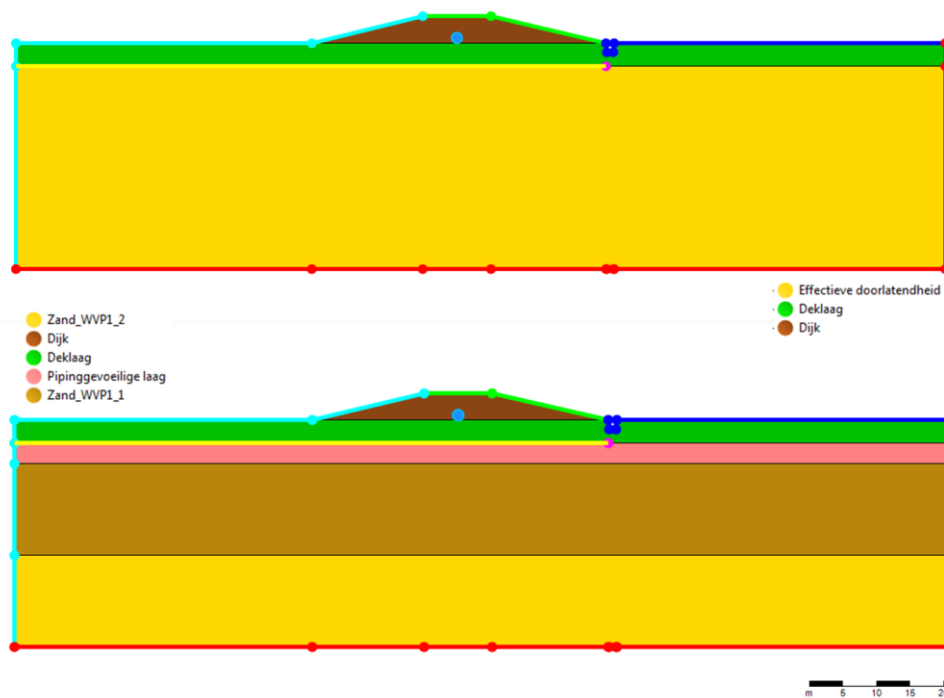
Profiel 37.70	Laagdiepte (m NAP)	Karakteristieke waarden		Gemiddelde waarden	
		Horizontale doorlatendheid (m/dag)	Verticale doorlatendheid (m/dag)	Horizontale doorlatendheid (m/dag)	Verticale doorlatendheid (m/dag)
Deklaag	-0,7 t/m -4,1	0,1	0,1	0,05	0,05
Piping-gevoelige laag	-4,1 t/m -7,1	15,6	15,6	8,0	8,0
WVP1_1	-7,1 t/m -20,5	97,3	97,3	50,0	50,0
WVP1_2	-20,5 t/m -34	68,1	68,1	35,0	35,0

Dwarsprofielen

De dwarsprofielen voor de basismodellen en meerlaagse modellen voor profiel 28.44 en profiel 37.70 zijn gegeven in respectievelijk Figuur 66 en Figuur 67.



Figuur 66: Dwarsprofielen D-Geo Flow basismodel en meerlaags model profiel 28.44 (Genne-Streukel)



Figuur 67: Dwarsprofielen D-Geo Flow basismodel en meerlaags model profiel 37.70 (Hasselt-Zwartsluis)

Waterstanden

Aan de buitendijkse zijde, linkerkzijde in de dwarsprofielen, wordt gebruik gemaakt van een randvoorwaarde met 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. De binnenwaterstand en de ondergrenswaardes van het buitenwater voor beide profielen zijn gegeven in Tabel 28.

Tabel 28: Uitgangspunten waterstanden

Dijkpaal	Binnenwaterstand (m NAP)	Ondergrenswaarde buitenwater (m NAP)
Profiel 28.44 (Genne-Streukel)	+0,10	+2,25
Profiel 37.70 (Hasselt-Zwartsluis)	-0,70	+1,93

Intrede- en uittredepunt

Voor deze gevoeligheidsanalyse is gebruik gemaakt van verschillende gedefinieerde intredepunten. Deze betreffen de buitenteen, een fictief intredepunt en eenmaal de leklengte vanaf de buitenteen. Tabel 29 geeft de exacte getallen aan resulterend voorland. Het intredepunt ligt aan de linkerkzijde van het model, waarbij aangenomen wordt dat de rivier hier insnijdt. In de modellering is geen intredeweerstand aanwezig. De invloed van de buitenwaterstand wordt hierdoor direct op het watervoerend pakket ingebracht. Dit is een conservatief uitgangspunt ten opzichte van de praktijksituatie waar wellicht nog enige bodemweerstand van de rivier aanwezig is.

Tabel 29: Uitgangspunten afstand intredepunt vanaf as van de dijk

Voorland lengte bij de bepaalde intredepunten.	Buitenteen	Fictief intredepunt	Intrede op eenmaal de leklengte vanaf de buitenteen
Profiel 28.44 (Genne-Streukel)	19,5 m	53 m	162 m
Profiel 37.70 (Hasselt-Zwartsluis)	21,5 m	65 m	286 m

De uittredepunten ligt bij profiel 37.70 onder de deklaag. Hierdoor is voor dit profiel gewerkt met de heave randvoorwaarde uit (1). Met behulp van deze randvoorwaarde wordt de uittredeweerstand met de 0.3D regel meegenomen.

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. Bij de modellen met een leklengte aan voorland is in verband met de rekentijd gebruik gemaakt van rekenstappen met 5 centimeter.

Het grid heeft een fijne pipe coarsness. De inputwaarde betreft, afhankelijk van het model, 3 of 4. Dus veel detail. Aangezien veelal een dunnere piping gevoelige laag en deklaag 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 0.5 en 1.5 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 resultaat gevonden voor enkele geschematiseerde lagen met een enkele laag grid cellen.

7.3 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. 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. Dit is toegelicht in Bijlage 12.

7.4 Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse

In Tabel 30 zijn de varianten voor de gevoeligheidsberekeningen van D-Geo Flow gegeven. Er wordt gestart met een eenvoudige basissom, waarna stapsgewijs meer complexiteit in de modellen wordt toegevoegd. Met deze aanpak wordt een beeld gekregen van het effect op het kritiek verval bij de bepaalde wijzigingen in uitgangspunten.

Tabel 30: Overzicht gevoeligheidsberekeningen

Naam berekening	Omschrijving
1) Basissom	Uitgangspunten van de analytische berekening
2) Anisotropie	Anisotropie factor 3 toegepast op de basissom. De verticale doorlatendheid wordt met een factor 3 verkleint ten opzichte van de initiële inputwaarde.
3) Meerlaagsheid	Verskil in laagdiktes en doorlatendheden worden toegepast in het watervoerend pakket
4) Meerlaagsheid en Anisotropie	Combinatie van berekening 2) en 3)
5) Gemiddelde inputwaarden bij het basismodel	Berekening 1) wordt doorgerekend met gemiddelde waarden voor de D70 en de horizontale en verticale doorlatendheid.
6) Gemiddelde inputwaarden bij het model met meerlaagsheid en anisotropie	Berekening 4) wordt doorgerekend met gemiddelde waarden voor de D70 en de horizontale en verticale doorlatendheid.
7) Basismodel zonder voorland	Intredepunt bij de teen van de dijk bij berekening 1)
8) Model met meerlaagsheid en anisotropie zonder voorland	Intredepunt bij de teen van de dijk bij berekening 4)
9) Model met meerlaagsheid en anisotropie met een voorland verlenging	Verlenging van het voorland tot intredepunt bij leklengte bij berekening 4)
10) Model met meerlaagsheid en anisotropie met een voorland verlenging en gemiddelde inputwaarden	Verlenging van het voorland tot intredepunt bij leklengte bij berekening 4) met gemiddelde input waarden voor de D70 en de horizontale en verticale doorlatendheid.

7.5 Resultaten

De resultaten voor de basisberekening en gevoeligheidsberekeningen uit Tabel 30 zijn gegeven in Tabel 31 voor profiel 28.44 en Tabel 32 voor profiel 37.70. Resultaten voor het kritieke verval zijn gepresenteerd inclusief en exclusief het criteria om geen pipegroei voor de buitenteen van de dijk plaats te laten vinden. In dit geval geldt het opgetreden verval bij een pipegroei onder de buitenteen als het kritieke verval. Uit de resultaten blijkt dat dit criteria enkel van toepassing is op de modellen met een voorland boven circa 150 meter. De individuele resultaten per D-Geo Flow berekeningen zijn gegeven in Bijlage 11. In Figuur 68 zijn de resultaten van het kritiek verval uitgezet tegen de voorlandlengte.

In verhouding tot de basissom valt op dat het toevoegen van meerlaagsheid in een klein negatief effect resulteert. Voor anisotropie wordt verwaarloosbaar positief effect van een enkele centimeter berekend. Dit komt voort uit de schematisering van de profielen bij een overgang naar meerlaagsheid. De piping gevoelige laag met een lage doorlatendheid wordt toegevoegd. De onderliggende laag heeft een grotere doorlatendheid ten opzichte van het basismodel. De stromingssituatie wordt hierdoor vermoedelijk op een wijze beïnvloed, dat grotere stroomsnelheden ontstaan in het meerlaags model. Dit resulteert in snellere pipegroei en een lager kritiek verval. Anisotropie geeft slechts een marginale winst in de veiligheid, doordat de grotere horizontale stroming onder de piping gevoelige laag met een verlaagde verticale doorlatendheid minder makkelijk richting de locatie van de pipe kan stromen. Dit zorgt ervoor dat de combinatie meerlaagsheid en anisotropie wederom op een circa gelijk kritiek verval uitkomt als in het basismodel.

De elementen voorlandlengte en karakteristieke tegen gemiddelde inputwaarden geven grotere verschillen in het kritiek verval. In Figuur 68 zijn met de ovalen de groepen met resultaten van sommen gegeven met betrekking tot een aanwezig voorlandlengte. Hieruit komt naar voren dat met een toename van het voorland een duidelijke toename in het kritiek verval ontstaat. Dit komt voort door een combinatie van de toename van de kwelweglengte en weerstand dichtbij de kering. Er vindt meer demping van de stijghoogte plaats rond de dijk met betrekking tot het aanwezig hoogwater.

In de grafiek is zichtbaar dat er een verschil is tussen de gemiddelde en karakteristieke inputwaarden. Gemiddelde inputwaarden leveren circa een meter tot anderhalve meter “winst” in het kritieke verval op ten opzichte van het gebruiken van karakteristieke inputwaarden. Doorlatendheden verkleinen, dus de stromingssnelheid rond de pipe wordt lager. D70 waarden vergroten, dus de korrels eroderen moeilijker.

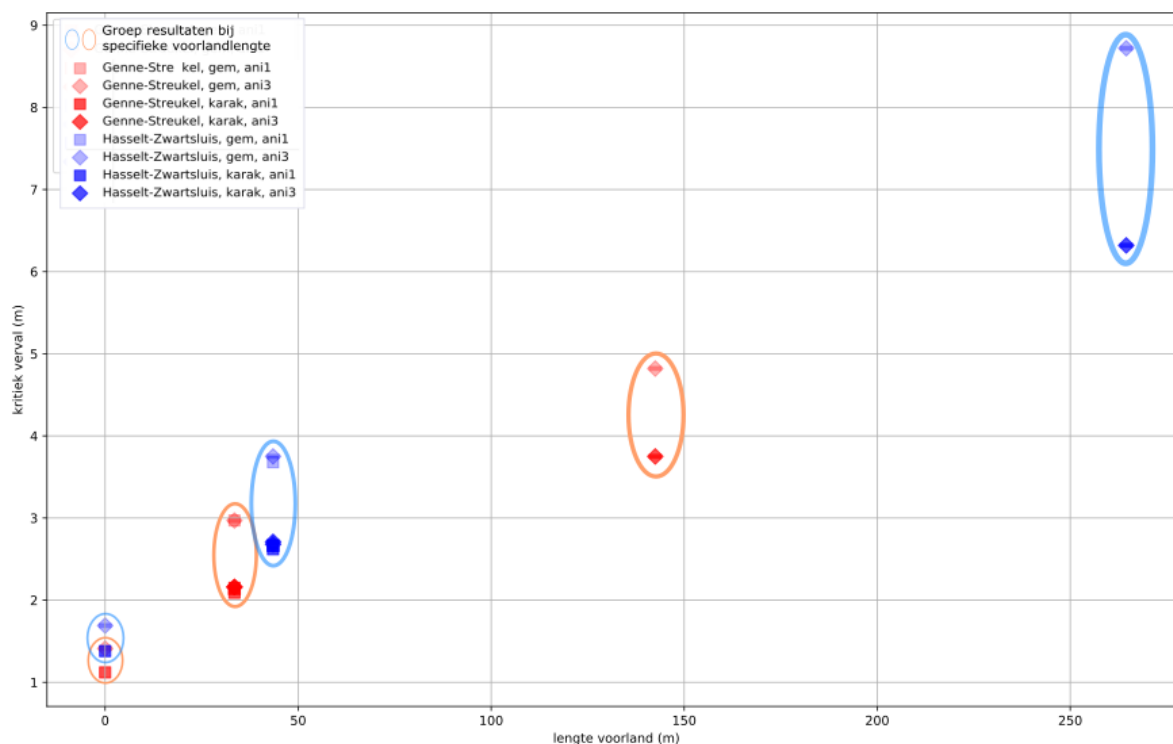
Opgemerkt wordt, dat naarmate de voorlandlengte vergroot de range van het kritieke verval tussen de gemiddelde en karakteristieke inputwaarden ook toeneemt. Een input van gemiddelde waarden bij een grotere aanwezige voorlandlengte levert dus meer extra veiligheid op als bij een korte aanwezige voorlandlengte. Dit wordt verklaard, doordat over een grotere afstand voor de dijk de doorlatendheden in de ondergrond hun invloed uitvoeren. Het effect van de stroming in de ondergrond werkt dus langer positief door rondom de pipe.

Tabel 31: Resultaten kritieke verval D-Geo Flow Profiel 28.44

Berekeningsnummer Profiel 28.44 (Genne-Streukel)	Kritiek verval	Kritiek verval incl. criteria nul progressie onder voorland
1) Basissom	2,15 m	2,15 m
2) Anisotropie	2,16 m	2,16 m
3) Meerlaagsheid	2,09 m	2,09 m
4) Meerlaagsheid en anisotropie	2,16 m	2,16 m
5) Basissom met gemiddelde waarden	2,97 m	2,97 m
6) Meerlaagsheid en anisotropie met gemiddelde waarden	2,97 m	2,97 m
7) Basissom zonder voorland	1,12 m	1,12 m
8) Meerlaagsheid en anisotropie zonder voorland	1,41 m	1,41 m
9) Meerlaagsheid en anisotropie met voorland verlenging	4,45 m	3,75 m
10) Meerlaagsheid en anisotropie met gemiddelde waarden en voorland verlenging	5,95 m	4,82 m

Tabel 32: Resultaten kritieke verval D-Geo Flow Profiel 37.70

Berekeningsnummer profiel 37.70 (Hasselt-Zwartsluis)	Kritiek verval	Kritiek verval incl. criteria nul progressie onder voorland
1) Basissom	2,66 m	2,66 m
2) Anisotropie	2,68 m	2,68 m
3) Meerlaagsheid	2,62 m	2,62 m
4) Meerlaagsheid en anisotropie	2,71 m	2,71 m
5) Basissom met gemiddelde waarden	3,68 m	3,68 m
6) Meerlaagsheid en anisotropie met gemiddelde waarden	3,75 m	3,75 m
7) Basissom zonder voorland	1,38 m	1,38 m
8) Meerlaagsheid en anisotropie zonder voorland	1,69 m	1,69 m
9) Meerlaagsheid en anisotropie met voorland verlenging	7,94 m	6,32 m
10) Meerlaagsheid en anisotropie met gemiddelde waarden en voorland verlenging	11,08 m	8,72 m

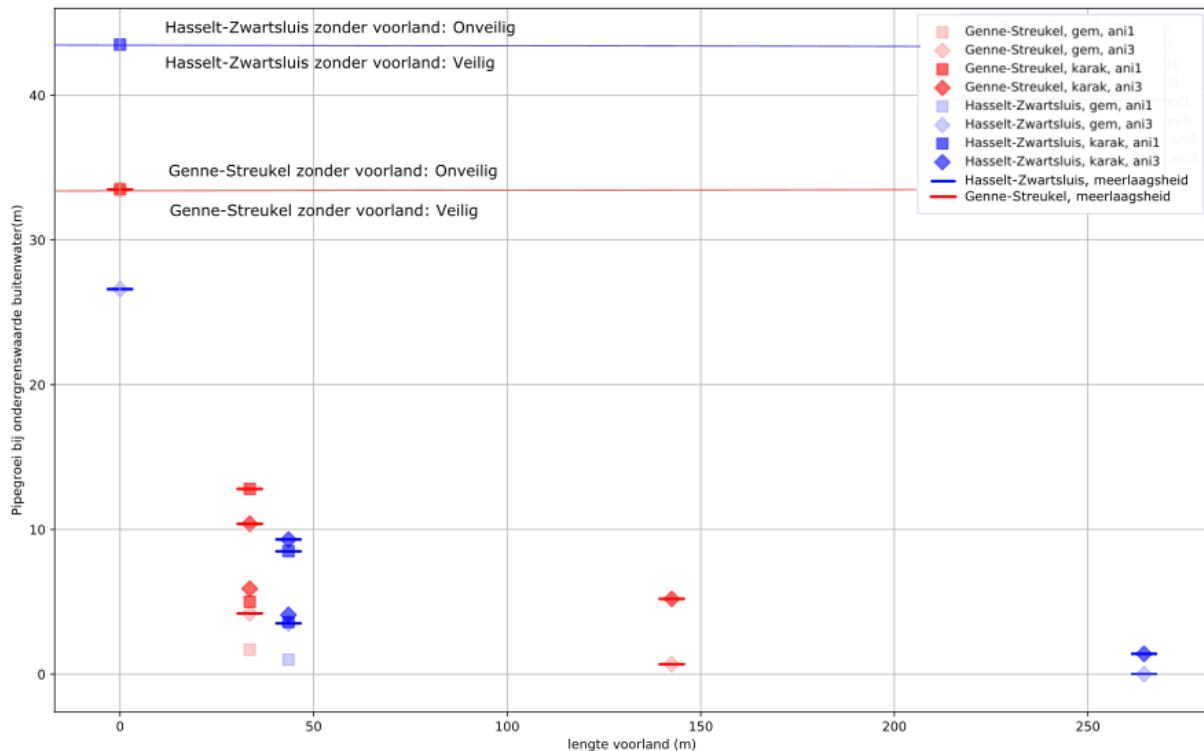


Figuur 68: Resultaten D-Geo Flow berekeningen aan de hand van het kritiek verval incl. pipegroei criteria

De inpassing van meerlaagsheid en anisotropie geven meer inzicht in de invloed op de berekende pipe progressie. In Tabel 33 en Figuur 69 is een overzicht gegeven van de pipegroei op het moment dat de ondergrenswaarde van het buitenwater bereikt is. Wederom worden de invloeden van voorlandlengte en de invloeden van karakteristieke en gemiddelde waarden gevonden. Het belangrijkste resultaat betreft het verschil in pipegroei tussen de basissom en het model met inpassing van meerlaagsheid en anisotropie. Zoals beschreven geven de karakteristieken van deze dwarsprofielen een vergrootte horizontale stroming, wanneer de stap naar een meerlaags model met anisotropie gemaakt wordt. Hierdoor wordt een grotere pipegroei gegeven voor deze modellen ten opzichte van het basismodel. Ondanks dat de resultaten van het kritieke verval gelijk zijn, treedt er voor de doorgerekende profielen 2,5 keer zoveel pipe groei op bij de modellen met meerlaagsheid en anisotropie.

Tabel 33: Resultaten pipe progressie bij de ondergrenswaarde van het buitenwater.

Naam berekening	Pipe progressie bij ondergrenswaarde buitenwaterstand voor profiel 28.44 (Genne-Streukel)	Pipe progressie bij ondergrenswaarde buitenwaterstand voor profiel 37.70 (Hasselt-Zwartsluis)
1) Basissom	5,0 m	3,6 m
2) Anisotropie	5,9 m	4,1 m
3) Meerlaagsheid	12,8 m	8,5 m
4) Meerlaagsheid en anisotropie	10,4 m	9,3 m
5) Basissom met gemiddelde waarden	1,7 m	1,0 m
6) Meerlaagsheid en anisotropie met gemiddelde waarden	4,2 m	3,5 m
7) Basissom zonder voorland	faalt (33,5 m)	faalt (43,5 m)
8) Meerlaagsheid en anisotropie zonder voorland	faalt (33,5 m)	26,6 m
9) Meerlaagsheid en anisotropie met voorland verlenging	5,2 m	1,4 m
10) Meerlaagsheid en anisotropie met gemiddelde waarden en voorland verlenging	0,7 m	0,0 m



Figuur 69: Resulterende pipegroei bij de ondergrenswaarde voor de buitenwaterstand.

7.6 Conclusies D-Geo Flow

Voor beide doorgerkende profielen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Variatie van voorlandlengte heeft groter effect op kritiek verval dan anisotropie en/of meerlaagsheid;
- Gemiddelde inputwaarden leveren circa een meter tot anderhalve meter “winst” in het kritieke verval op ten opzichte van het gebruiken van karakteristieke inputwaarden.
- Meerlaagsheid en/of anisotropie geven geen winst in het kritiek verval met het basismodel dat is gebaseerd op de formule van Sellmeijer;
- Het toevoegen van enkel meerlaagsheid resulteert in een onveilig kritiek verval ten opzichte van het basismodel.
- De inpassing van meerlaagsheid en anisotropie hebben invloed op de berekende pipe progressie
- Ondanks een gelijk kritiek verval, treedt er 2,5 keer zoveel pipe groei op voor modellen inclusief meerlaagsheid en anisotropie.
- Naarmate de voorlandlengte toeneemt, vergroot de range van het kritieke verval tussen de gemiddelde en karakteristieke inputwaarden.

Bijlage 13 bevat een nadere gevoeligheidsanalyse naar de schematisatie voor de randvoorwaarde van het buitenwater. Deze analyse is opgesteld in aanvulling op het huidige project naar aanleiding van de uitgevoerde berekeningen. In de analyse worden keuzes in de schematisatie, diepte tot waar het buitenwater reikt, en de locatie, afstand tot de buitenteen onderzocht. Deze kunnen tientallen centimeters effect hebben op het kritiek verval. Deze keuzes kunnen doorwerken in de effecten op het gehele geohydrologisch systeem van het model. Er kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de effecten omtrent radiale stroming.

7.7 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 rekenregel Sellmeijer 2. De parameters voor de analytische berekeningen zijn bepaald aan de hand van de invoer van de D-Geo Flow berekeningen. 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. Opgemerkt moet worden dat de doorlatendheid van de deklaag niet als parameter in rekenregel Sellmeijer 2 voorkomt.

Genne-Streukel

De resultaten van berekeningen van het kritieke verval voor het profiel bij km 28.44 zijn samengevat in Tabel 34. Op basis van de vergelijking met het berekende kritieke verval exclusief veiligheid kan het volgende worden geconcludeerd:

- Voor het beschouwde profiel geldt dat het verschil tussen kritiek verval volgens D-Geo Flow en kritiek verval volgens rekenregel Sellmeijer 2 veelal beperkt is tot 0.3 m, zowel voor berekeningen met een enkellaags watervoerend pakket in D-Geo Flow als 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. Wel moet worden opgemerkt dat met rekenregel Sellmeijer 2 consequent een hoger kritiek verval wordt berekend dan met D-Geo Flow.
- Het rivierwaarts verplaatsen van het intreepunt neigt tot overschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow. Het landwaarts verplaatsen van het intreepunt neigt tot onderschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow.
- Bij het rivierwaarts verplaatsen van het intreepunt tot eenmaal de lek lengte van het voorland (143 m) ten opzichte van de buitenteen wordt het kritieke verval volgens D-Geo Flow aanzienlijk overschat. Het verschil in kritiek verval bedraagt in dat geval 1.20 m bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid en 1.86 m bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid.

Tabel 34: Vergelijking met kritiek verval volgens analytische berekening; P_09_28.44

ID	Verval bij ondergrens-waarde [m]	Kritiek verval D-Geo Flow [m]	Kritiek verval Sellmeijer 2 [m]	Vershil in kritiek verval t.o.v. basis-berekening D-Geo Flow [m]	Vershil in kritiek verval t.o.v. basis-berekening Sellmeijer 2 [m]	Vershil in kritiek verval D-Geo Flow / Sellmeijer 2 [m]
B_09_28.44_1	2.15	2.15	2.39	0.00	0.00	-0.24
B_09_28.44_2	2.15	2.16	2.39	0.01	0.00	-0.23
B_09_28.44_3	2.15	2.09	2.39	-0.06	0.00	-0.30
B_09_28.44_4	2.15	2.16	2.39	0.01	0.00	-0.23
B_09_28.44_5	2.15	2.97	3.30	0.82	0.92	-0.33
B_09_28.44_6	2.15	2.97	3.30	0.82	0.92	-0.33
B_09_28.44_7	2.15	1.12	1.33	-1.03	-1.06	-0.21
B_09_28.44_8	2.15	1.41	1.33	-0.74	-1.06	0.08
B_09_28.44_9	2.15	4.45	5.65	2.30	3.26	-1.20
B_09_28.44_10	2.15	5.95	7.81	3.80	5.43	-1.86

Om de veiligheid te piping te waarborgen/vergroten kan worden overwogen om gebruik te maken van het aanwezige voorland. Hieronder enkele getallen ter illustratie:

- De kritieke kwelweglengte exclusief veiligheid voor het profiel bij km 28.44 bedraagt 60 m (volgens rekenregel Sellmeijer 2). Gegeven de dijkbasis van 34 m, dient ten minste 26 m voorland in rekening te worden gebracht om het optredende verval bij de ondergrenswaarde te weerstaan.
- De kritieke kwelweglengte inclusief veiligheid voor het profiel bij km 28.44 bedraagt 103 m (volgens rekenregel Sellmeijer 2). Gegeven de dijkbasis van 34 m, dient ten minste 70 m voorland in rekening te worden gebracht om het optredende verval bij de ondergrenswaarde te weerstaan, waarvan een strook met een breedte van ten minste 18 m (aanvullende) maatregelen behoeft om te voorkomen dat het kanaal tot voorbij de dijk en onder het voorland loopt.

Hasselt-Zwartsluis

De resultaten van berekeningen van het kritieke verval voor het profiel bij km 37.70 zijn samengevat in Tabel 34. Op basis van de vergelijking met het berekende kritieke verval exclusief veiligheid kan het volgende worden geconcludeerd:

- Voor het beschouwde profiel geldt dat het verschil tussen kritiek verval volgens D-Geo Flow en kritiek verval volgens rekenregel Sellmeijer 2 veelal beperkt is tot 0.3 m, zowel voor berekeningen met een enkellaags watervoerend pakket in D-Geo Flow als 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. Wel moet worden opgemerkt dat met rekenregel Sellmeijer 2 consequent een hoger kritiek verval wordt berekend dan met D-Geo Flow.
- Het rivierwaarts verplaatsen van het intreepunt neigt tot overschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow. Het landwaarts verplaatsen van het intreepunt neigt tot onderschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow.
- Bij het rivierwaarts verplaatsen van het intreepunt tot eenmaal de leklengte van het voorland (265 m) ten opzichte van de buitenteen wordt het kritieke verval volgens D-Geo Flow aanzienlijk overschat. Het verschil in kritiek verval bedraagt in dat geval 1.22 m bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid en 1.59 m bij toepassing van gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid.

Tabel 35: Vergelijking met kritiek verval volgens analytische berekening; P_09_37.70

ID	Verval bij ondergrenswaarde [m]	Kritiek verval D-Geo Flow [m]	Kritiek verval Sellmeijer 2 [m]	Vershil in kritiek verval t.o.v. basisberekening D-Geo Flow [m]	Vershil in kritiek verval t.o.v. basisberekening Sellmeijer 2 [m]	Vershil in kritiek verval D-Geo Flow / Sellmeijer 2 [m]
B_09_37.70_1	2.63	2.66	2.95	0.00	0.00	-0.29
B_09_37.70_2	2.63	2.68	2.95	0.02	0.00	-0.27
B_09_37.70_3	2.63	2.62	2.95	-0.04	0.00	-0.33
B_09_37.70_4	2.63	2.71	2.95	0.05	0.00	-0.24
B_09_37.70_5	2.63	3.68	4.09	1.02	1.13	-0.41
B_09_37.70_6	2.63	3.75	4.09	1.09	1.13	-0.34
B_09_37.70_7	2.63	1.38	1.64	-1.28	-1.31	-0.26
B_09_37.70_8	2.63	1.69	1.64	-0.97	-1.31	0.05
B_09_37.70_9	2.63	7.94	9.16	5.28	6.20	-1.22
B_09_37.70_10	2.63	11.08	12.67	8.42	9.72	-1.59

Om de veiligheid te piping te waarborgen/vergroten kan worden overwogen om gebruik te maken van het aanwezige voorland. Hieronder enkele getallen ter illustratie:

- De kritieke kwelweglengte exclusief veiligheid voor het profiel bij km 37.70 bedraagt 55 m (volgens rekenregel Sellmeijer 2). Gegeven de dijkbasis van 44 m, dient ten minste 12 m voorland in rekening te worden gebracht om het optredende verval bij de ondergrenswaarde te weerstaan.
- De kritieke kwelweglengte inclusief veiligheid voor het profiel bij km 30.77 bedraagt 97 m (volgens rekenregel Sellmeijer 2). Gegeven de dijkbasis van 44 m, dient ten minste 54 m voorland in rekening te worden gebracht om het optredende verval bij de ondergrenswaarde te weerstaan, waarvan een strook met een breedte van ten minste 5 m (aanvullende) maatregelen behoeft om te voorkomen dat het kanaal tot voorbij de dijk en onder het voorland loopt.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Algemeen

De conclusies uit deze gevoeligheidsanalyse zijn alleen van toepassing op de trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis. 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 Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis.

8.2 Analytische berekeningen

De trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis 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 de slootbodembodem of het maaiveld). Om inzicht in de consequenties van de aanpassing van de rekenregel van Sellmeijer en in de gevoeligheden van de kwelweglengte, de korreldiameter D_{70} , de specifieke doorlatendheid en het slootpeil tijdens hoogwater te verkrijgen is per vak de kritieke buitenwaterstand in opeenvolgende stappen berekend. Er zijn tevens berekeningen uitgevoerd waarbij de fictieve kwelweglengte – tegenstrijdig met de richtlijnen in [2] – niet is gemaximeerd tot tweemaal de dijkbasis (afstand tussen de buitenteen en het uittreepunt), maar volledig is meegenomen, en waarbij bovendien geen beperking is gesteld aan de minimale dikte van de deklaag in het voorland (Tabel 36).

Tabel 36: Overzicht analytische berekeningen

Stap	Kwelweglengte	Eigenschappen watervoerend pakket	Rekenwaarden korreldiameter	Rekenwaarden specifieke doorlatendheid	Slootpeil tijdens hoogwater
1A	Dijkbasis	WBI-SOS	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Winterpeil
1B	Fictief, gemaximeerd				
2A	Dijkbasis	WBI-SOS	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Winterpeil
2B	Fictief, gemaximeerd				
3A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Winterpeil
3B	Fictief, gemaximeerd				
4A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Winterpeil
4B	Fictief, gemaximeerd				
5A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Verhoogd slootpeil
5B	Fictief, gemaximeerd				
6A	Dijkbasis	Onderzoek/NL3D	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Verhoogd slootpeil
6B	Fictief, gemaximeerd				
7	Fictief, niet gemaximeerd	Onderzoek/NL3D	Karakteristieke waarden	Karakteristieke waarden	Verhoogd slootpeil
8	Fictief, niet gemaximeerd	Onderzoek/NL3D	Gemiddelde waarden	Gemiddelde waarden	Verhoogd slootpeil

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

- De berekende kritieke buitenwaterstand is slechts in enkele gevallen hoger dan de voor het betrokken profiel geldende ondergrenswaarde conform de Regeling primaire waterkeringen 2017. Voor het traject Genne-Streukel geldt dat de maatgevende profielen binnen de vakken GEN_V2 en GEN_V5 als meest ongunstig moeten worden aangemerkt. In beide gevallen bevindt zich een buitendijkse kolk op beperkte afstand van de buitenteen. Voor het traject Hasselt-Zwartsluis geldt dat de maatgevende profielen binnen de vakken HAS_V16 en HAS_V17 als meest ongunstig moeten worden aangemerkt. In beide gevallen kan door het ontbreken van een behoorlijke deklaag geen fictieve lengte van het voorland in rekening worden gebracht.

- Bij toepassing van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van de beschikbare grondonderzoeken en het ondergrondmodel NL3D (Stap 3A) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de eigenschappen van het watervoerend pakket op basis van WBI-SOS (Stap 1A). De verhoging van de kritieke buitenwaterstand is het gevolg van het hanteren van een grotere korreldiameter D_{70} en een kleiner doorlaatvermogen van het watervoerend pakket in de berekeningen bij Stap 3. Voor de maatgevende profielen binnen het traject Genne-Streukel bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.1-0.2 m, overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 8-19 m. Voor de maatgevende profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.1-0.2 m, overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 9-13 m.
- Bij toepassing van het verhoogd slootpeil (Stap 5A) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van het winterpeil (Stap 3A). Voor de maatgevende profielen binnen het traject Genne-Streukel bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.8-1.0 m, overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 43-54 m. Voor de maatgevende profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.5 m, overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 27-30 m. De verhoging van de kritieke buitenwaterstand is gelijk aan de gehanteerde verhoging van het slootpeil.
- Bij toepassing van de gemaximeerde fictieve kwelweglengte (Stap 5B) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de kwelweglengte exclusief de fictieve lengte van het voorland (Stap 5A). Dit geldt uiteraard alleen voor de profielen in de vakken waar een afdoende deklaag in het voorland aanwezig is. Voor verschillende profielen kan door het ontbreken van een behoorlijke deklaag geen fictieve lengte van het voorland in rekening worden gebracht. Voor de maatgevende profielen binnen het traject Genne-Streukel bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.0-0.8 m. Voor de maatgevende profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.0-0.8 m.
- Bij toepassing van de niet-gemaximeerde fictieve kwelweglengte (Stap 7) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de gemaximeerde fictieve kwelweglengte (Stap 5B). Voor de beschouwde profielen binnen het traject Genne-Streukel bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.0-2.0 m. Voor de beschouwde profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.0-3.0 m.
- Bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid (Stap 8) is de berekende kritieke buitenwaterstand hoger dan bij toepassing van de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid. Dit is het gevolg van het hanteren van een grotere korreldiameter D_{70} en een lagere specifieke doorlatendheid in de berekeningen bij Stap 8. Voor de beschouwde profielen binnen het traject Genne-Streukel bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.3-1.1 m, overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 24-33 m. Voor de beschouwde profielen binnen het traject Hasselt-Zwartsluis bedraagt de verhoging van de kritieke buitenwaterstand 0.4-1.9 m, overeenkomend met een afname van de kritieke kwelweglengte van 25-43 m.

Vergelijking met historische extreme buitenwaterstanden

De kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid (berekend met een schematiseringsfactor van 1.0 en een veiligheidsfactor van 1.00 (in plaats van 1.62)) is vergeleken met historische extreme buitenwaterstanden. Uit metingen van de waterstand van het Zwartewater bij Mond der Vecht en Zwartsluis buiten kan worden afgeleid dat de dijken binnen de trajecten Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis in de periode 1950-september 2018 zijn blootgesteld aan buitenwaterstanden tot 1.30-

1.55 m. Er zijn geen registraties van wellen bekend (het is niet bekend of er in die periode naar wellen is gekeken en of deze geregistreerd zijn).

Op basis van de vergelijking van de berekende kritieke buitenwaterstand exclusief veiligheid met historische extreme buitenwaterstanden kan het volgende worden geconcludeerd:

- Het hanteren van een slootpeil dat hoger is dan het winterpeil heeft een positieve invloed op de kritieke buitenwaterstand. Het wordt daarom aanbevolen om het daadwerkelijke slootpeil tijdens hoogwater vast te stellen, rekening houdend met de lokale omstandigheden en in nauwe samenwerking met de beheerder.
- Bij toepassing van de karakteristieke waarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid in combinatie met het verhoogd slootpeil (Stap 5B en Stap 7) geldt voor verschillende profielen dat de berekende kritieke buitenwaterstand zou zijn overschreden tijdens in het verleden opgetreden hoogwaters, terwijl dit niet het geval is bij toepassing van de gemiddelde waarden van de korreldiameter D_{70} en (Stap 6B en Stap 8). Het laatste komt overeen met de tijdens de hoogwaters getoonde prestaties van de dijkvakken.

8.3 D-Geo Flow berekeningen

Voor de profielen bij km 28.44 en km 37.70 zijn D-Geo Flow berekeningen uitgevoerd. Onderzocht zijn de gevoeligheden van de kwelweglengte, de gelaagdheid van de grondopbouw, de anisotropie van de grondlagen in de het watervoerend pakket, de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid.

Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsberekeningen voor de profielen bij km 28.44 en km 37.70 kan het volgende worden geconcludeerd:

- Variatie van voorlandlengte heeft groter effect op kritiek verval dan anisotropie en/of meerlaagsheid;
- Gemiddelde inputwaarden leveren circa een meter tot anderhalve meter “winst” in het kritieke verval op ten opzichte van het gebruiken van karakteristieke inputwaarden.
- Meerlaagsheid en/of anisotropie geven geen winst in het kritiek verval met het basismodel dat is gebaseerd op de formules van Sellmeijer;
- Het toevoegen van enkel meerlaagsheid resulteert in een onveiliger kritiek verval ten opzichte van het basismodel.
- De inpassing van meerlaagsheid en anisotropie hebben invloed op de berekende pipe progressie
- Ondanks een gelijk kritiek verval, treedt er 2,5 keer zoveel pipe groei op voor modellen inclusief meerlaagsheid en anisotropie.
- Naarmate de voorlandlengte toeneemt, vergroot de range van het kritieke verval tussen de gemiddelde en karakteristieke inputwaarden.

Bijlage 13 bevat een nadere gevoeligheidsanalyse naar de schematisatie voor de randvoorwaarde van het buitenwater. Deze analyse is opgesteld in aanvulling op het huidige project naar aanleiding van de uitgevoerde berekeningen. In de analyse worden keuzes in de schematisatie, diepte tot waar het buitenwater reikt, en de locatie, afstand tot de buitenteen onderzocht. Deze kunnen tientallen centimeters effect hebben op het kritiek verval. Deze keuzes kunnen doorwerken in de effecten op het gehele geohydrologisch systeem van het model. Er kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de effecten omtrent radiale stroming.

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 rekenregel Sellmeijer 2. Voor de specifieke doorlatendheid is hierbij de effectieve doorlatendheid van het totale zandpakket gehanteerd.

Op basis van de resultaten van de analytische controleberekeningen voor de profielen bij km 28.44 en km 37.70 kan het volgende worden geconcludeerd:

- Voor de beschouwde profielen geldt dat het verschil in kritiek verval volgens D-Geo Flow en kritiek verval volgens rekenregel Sellmeijer 2 veelal beperkt is tot 0.3 m, zowel voor berekeningen met een enkellaags watervoerend pakket in D-Geo Flow als 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. Wel moet worden opgemerkt dat met rekenregel Sellmeijer 2 consequent een hoger kritiek verval wordt berekend dan met D-Geo Flow.
- Het rivierwaarts verplaatsen van het intreepunt neigt tot overschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow. Het landwaarts verplaatsen van het intreepunt neigt tot onderschatting van het kritieke verval volgens D-Geo Flow.
- Bij het rivierwaarts verplaatsen van het intreepunt tot eenmaal de leklengte van het voorland ten opzichte van de buitenteen wordt het kritieke verval volgens D-Geo Flow aanzienlijk overschat. Het verschil in kritiek verval bedraagt in dat geval 1.2-1.9 m voor het profiel bij km 28.44 en 1.2-1.6 m voor het profiel bij km 37.70, afhankelijk van de rekenwaarden van de korreldiameter D_{70} en de specifieke doorlatendheid.

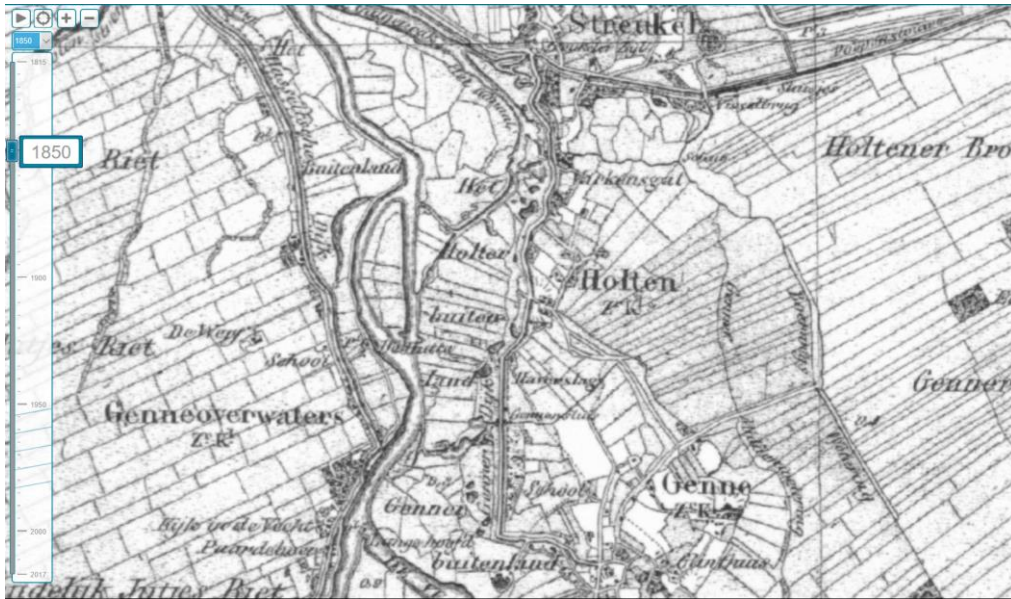
9 Referenties

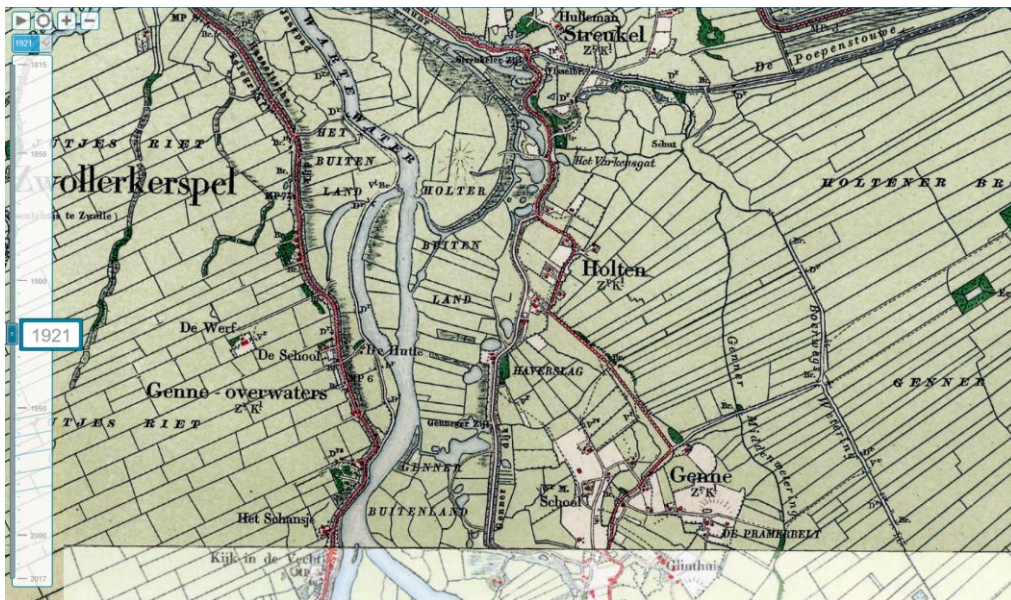
- [1] POV-piping portaal, sl: Waterschap Rivierenland, Royal HaskoningDHV, 2018.
- [2] Schematiseringshandleiding piping; WBI 2017, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017.
- [3] <https://www.dinoloket.nl/regis-ii-het-hydrogeologische-model>
- [4] Globale stochastische ondergrondschematisatie (WBI-SOS) voor de primaire waterkeringen; Deltares, september 2015.
- [5] <https://www.grondwatertools.nl/nl3d>
- [6] Waterstandsverlopen Vecht- en IJsseldelta, Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017; Deltares, februari 2016.
- [7] Rapport geofysisch onderzoek betreffende elektromagnetisch en grondradar onderzoek voor HWBP Vecht Noord en Vecht Zuid; Fugro, december 2016.
- [8] https://www.pov-piping.nl/couch/uploads/file/factsheet-beslisboom-piping_loos.pdf

Bijlagen

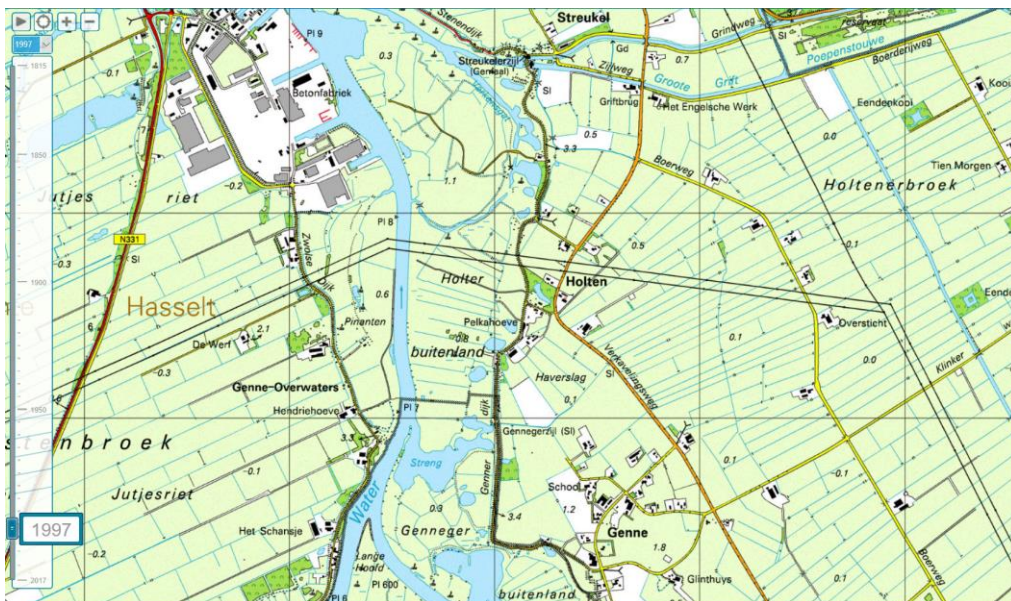
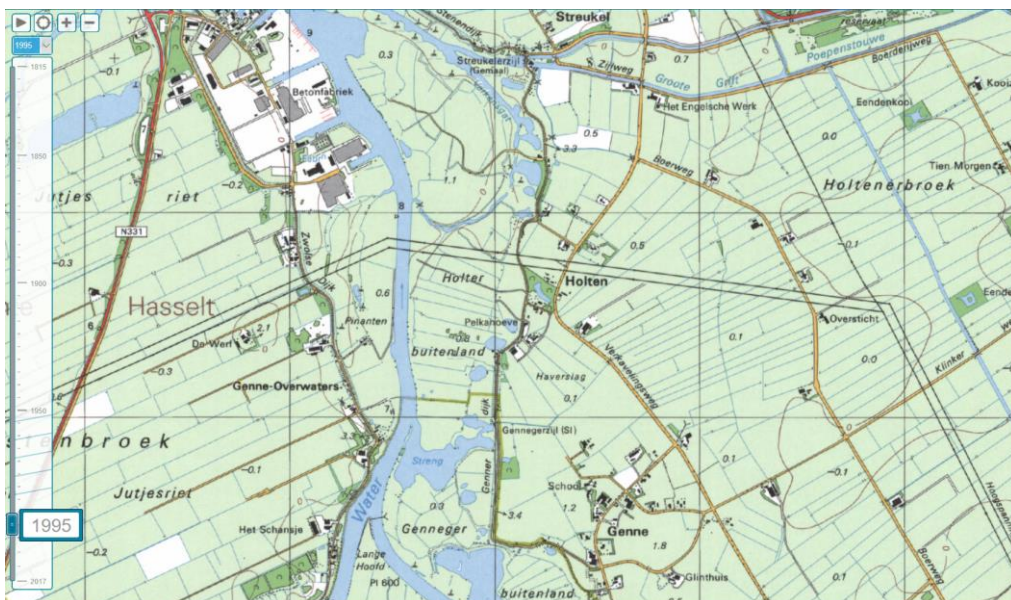
BIJLAGE 1	HISTORISCHE KAARTEN GENNE - STREUKEL
BIJLAGE 2	HISTORISCHE KAARTEN HASSELT - DE VELDE
BIJLAGE 3	HISTORISCHE KAARTEN DE VELDE - ZWARTSLUIS
BIJLAGE 4	MAATGEVENDE PROFIELEN GENNE-STREUKEL
BIJLAGE 5	MAATGEVENDE PROFIELEN HASSELT-ZWARTSLUIS
BIJLAGE 6	BEPALING EFFECTIEVE DOORLATENDHEID
BIJLAGE 7	BEPALING FICTIEVE LENGTE VOORLAND
BIJLAGE 8	RESULTATEN ANALYTISCHE BEREKENINGEN
BIJLAGE 9	PROCESSHEMA BESLISBOOM PIPING
BIJLAGE 10	GRONDWATERMODELLERING
BIJLAGE 11	RESULTATEN D-GEO FLOW BEREKENINGEN
BIJLAGE 12	TOELICHTING D-GEO FLOW RANDVOORWAARDE
BIJLAGE 13	D-GEO FLOW RANDVOORWAARDE BUITENWATER

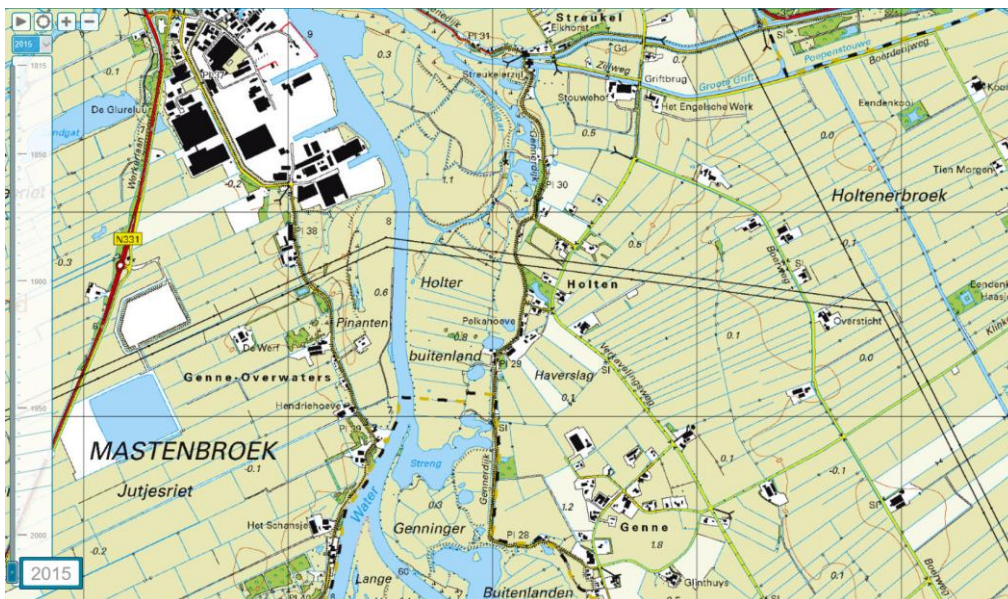
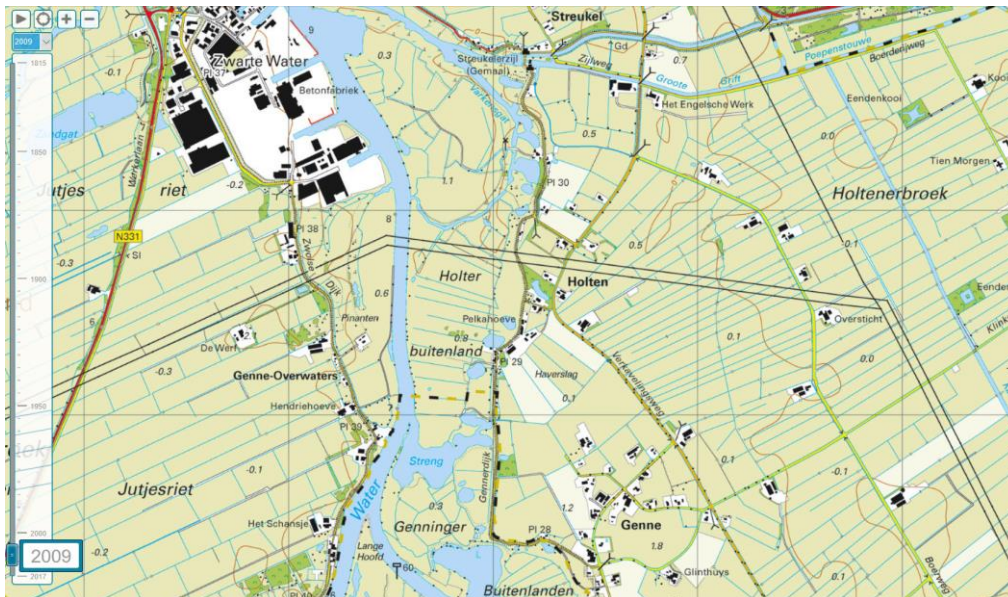
Bijlage 1 Historische kaarten Genne - Streukel





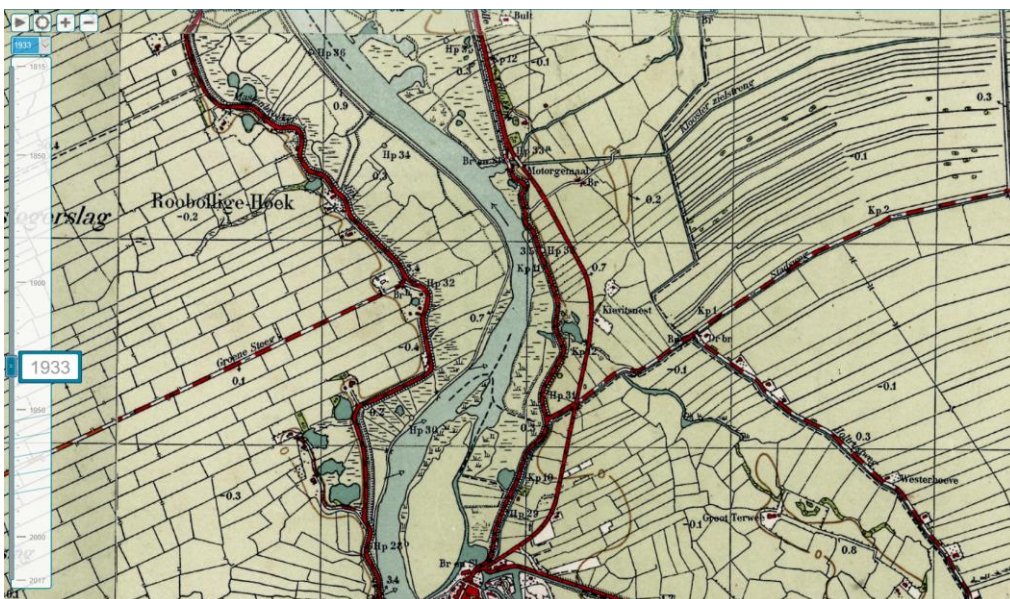
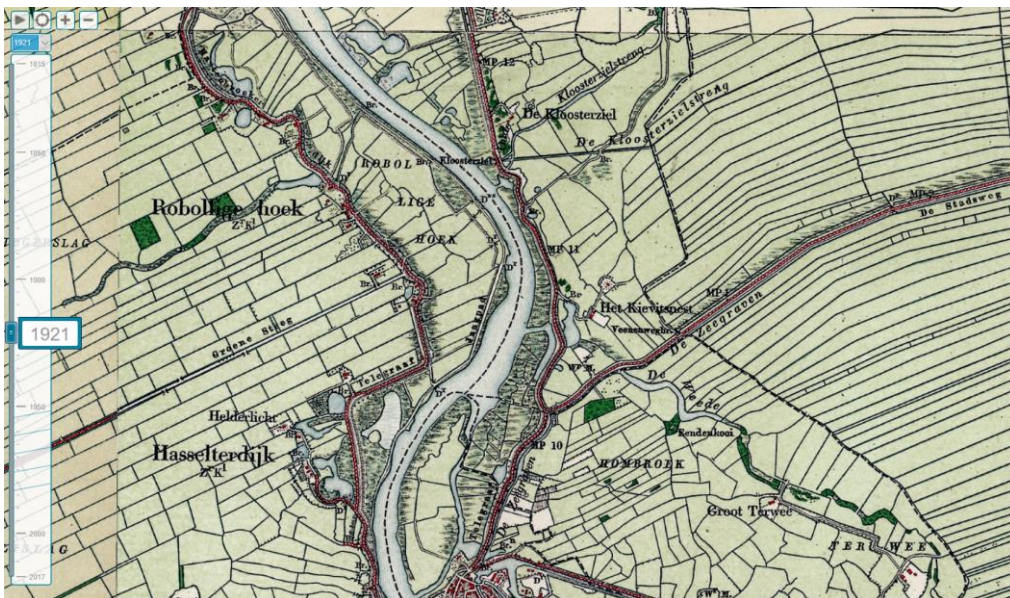


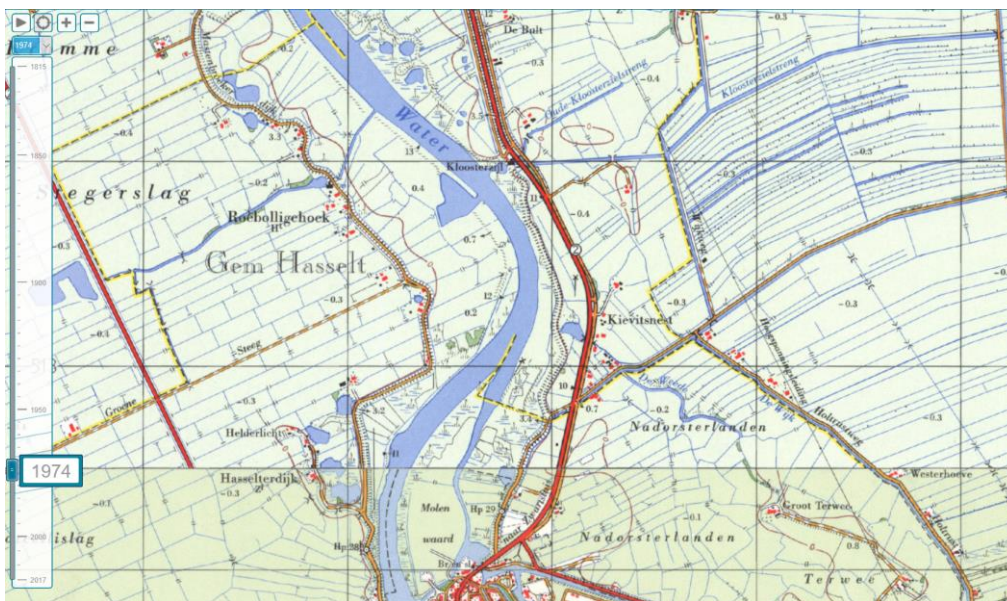
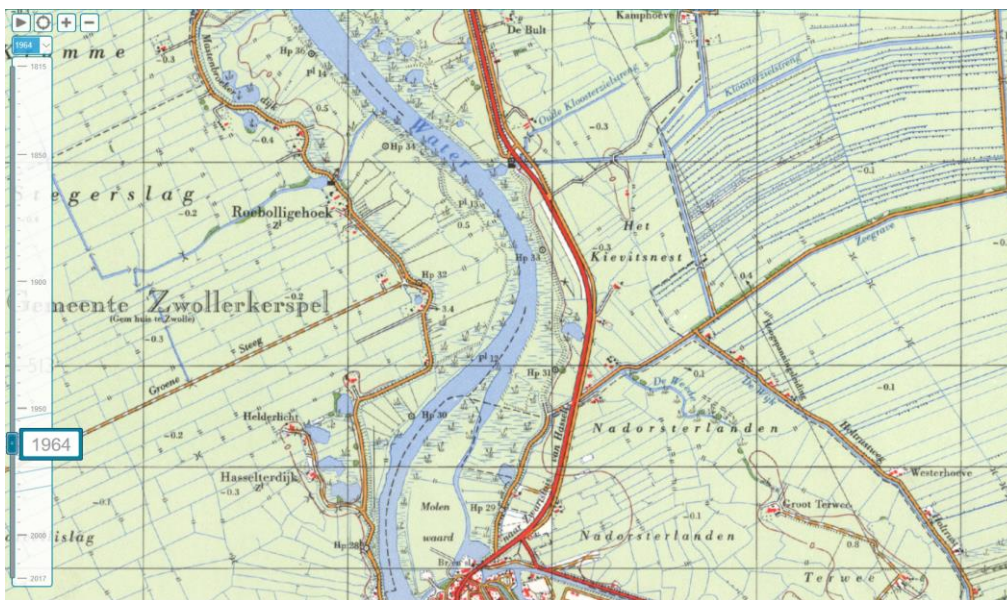
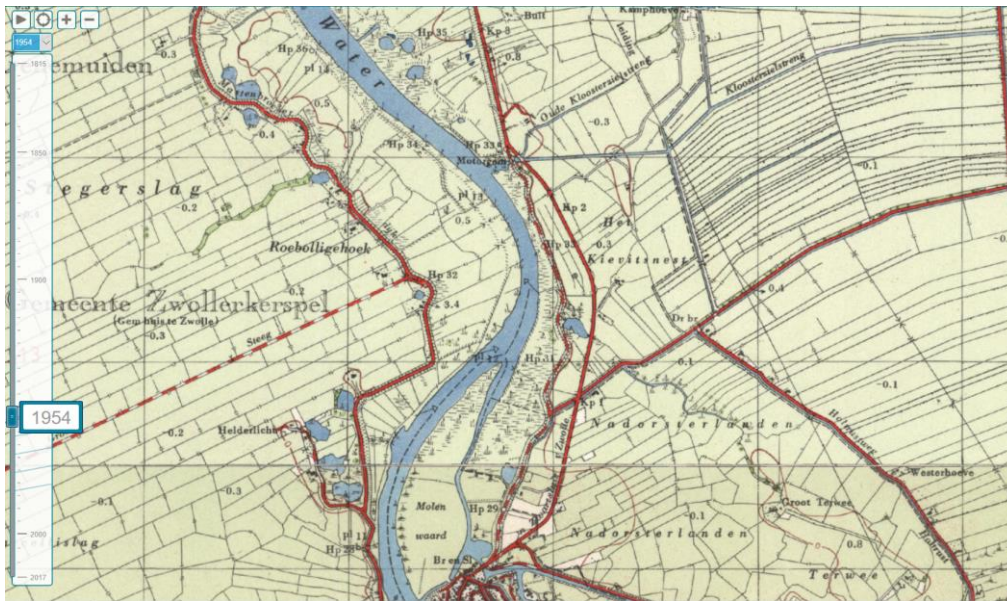




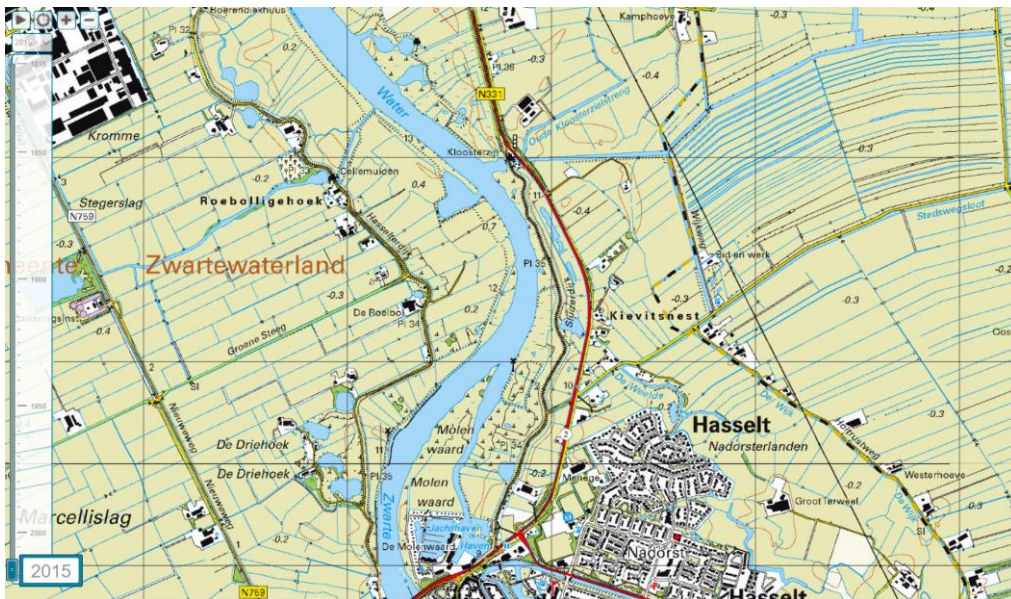
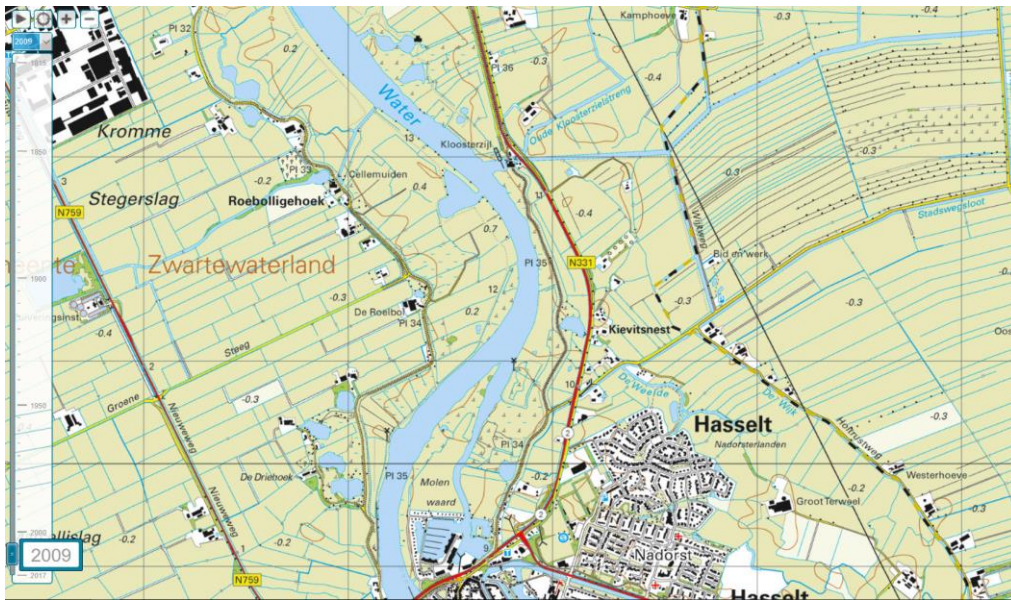
Bijlage 2 Historische kaarten Hasselt - De Velde









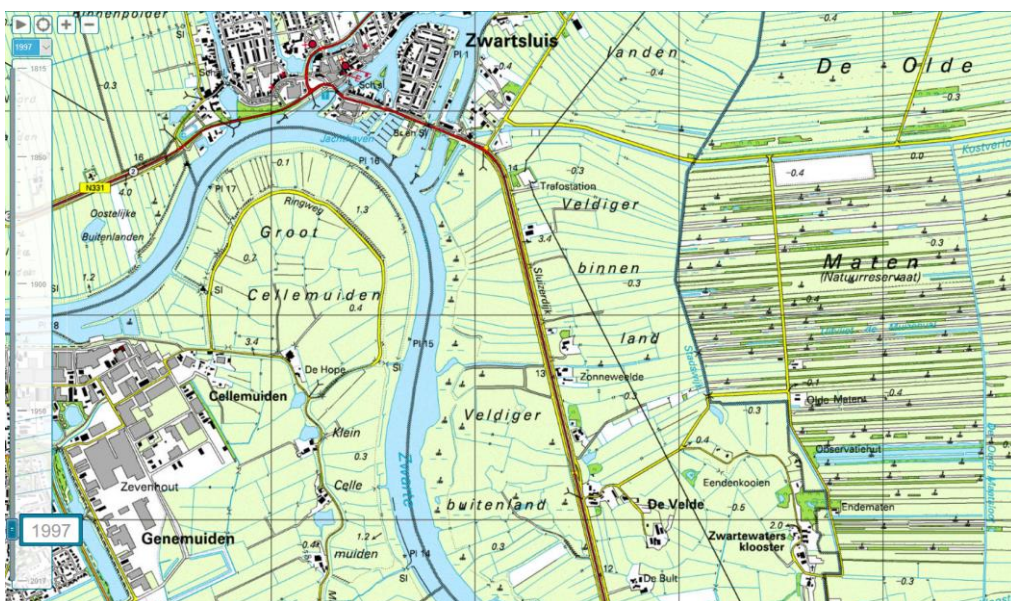


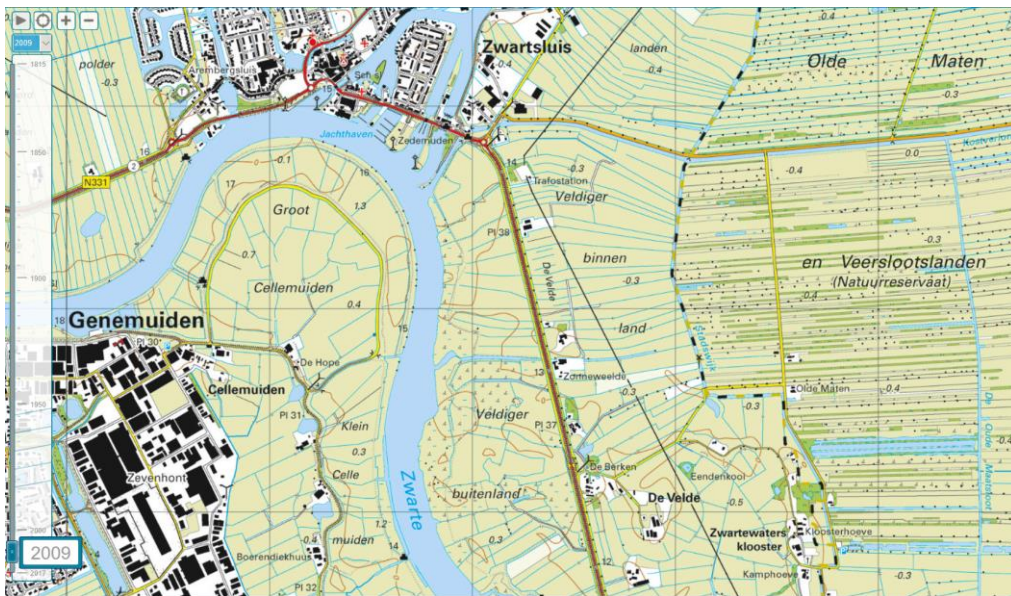
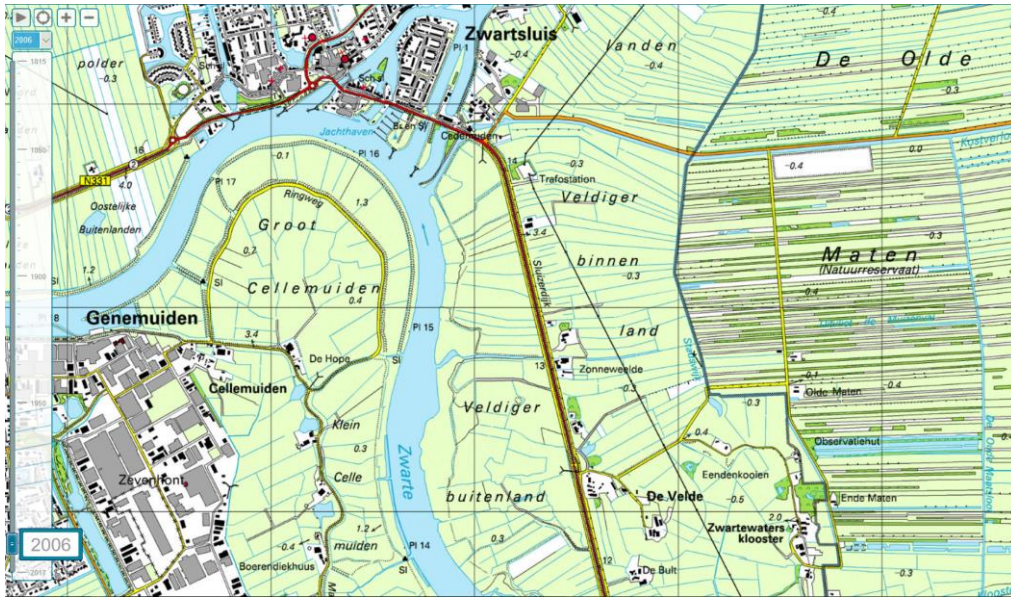
Bijlage 3 Historische kaarten De Velde - Zwartsluis



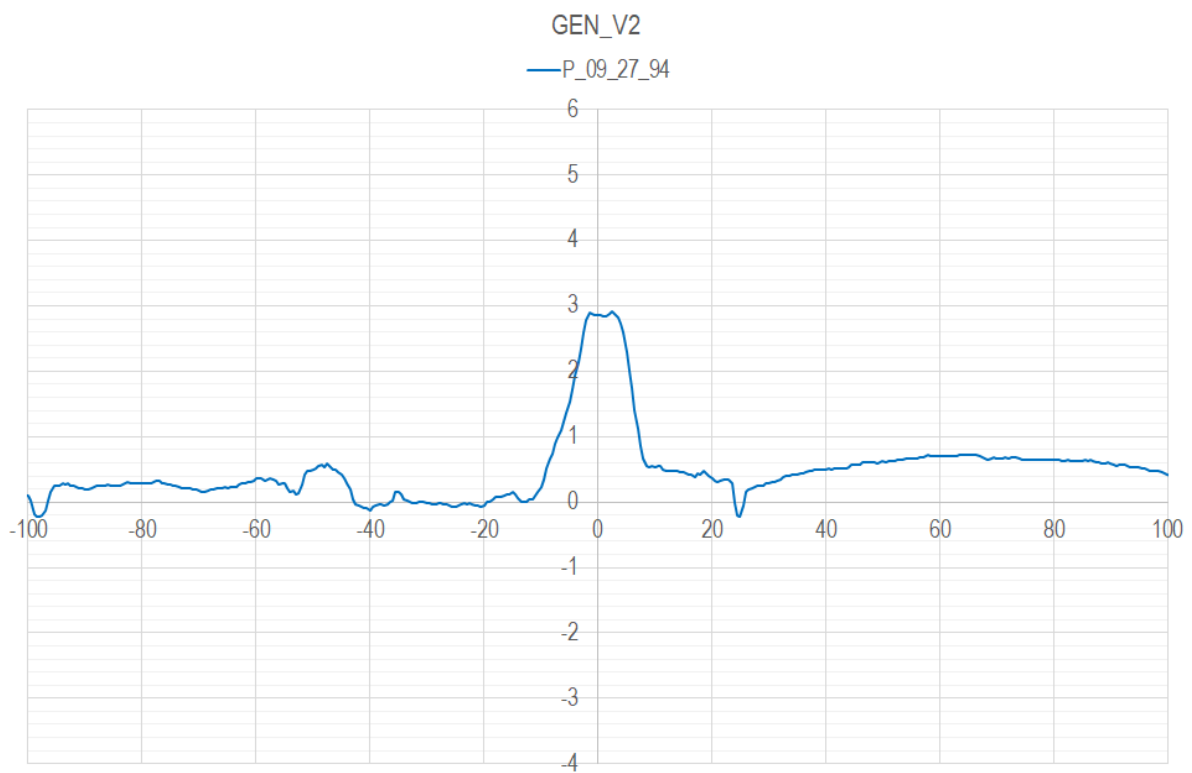
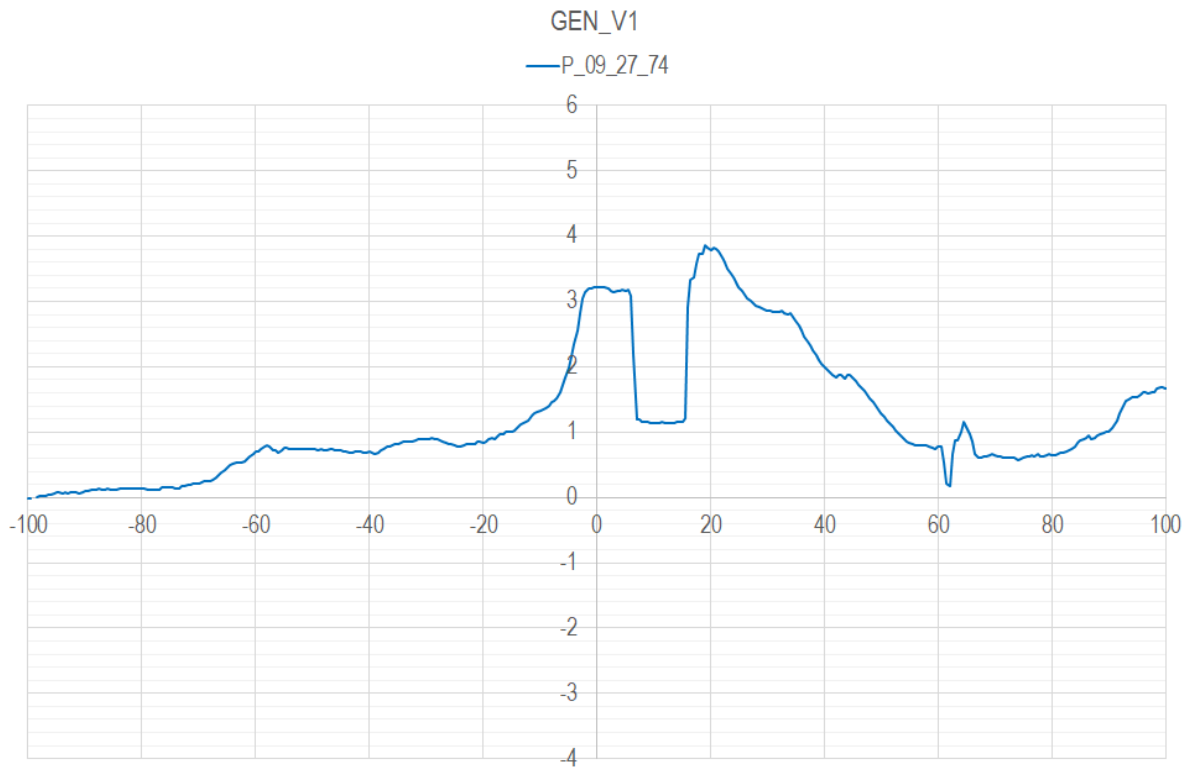


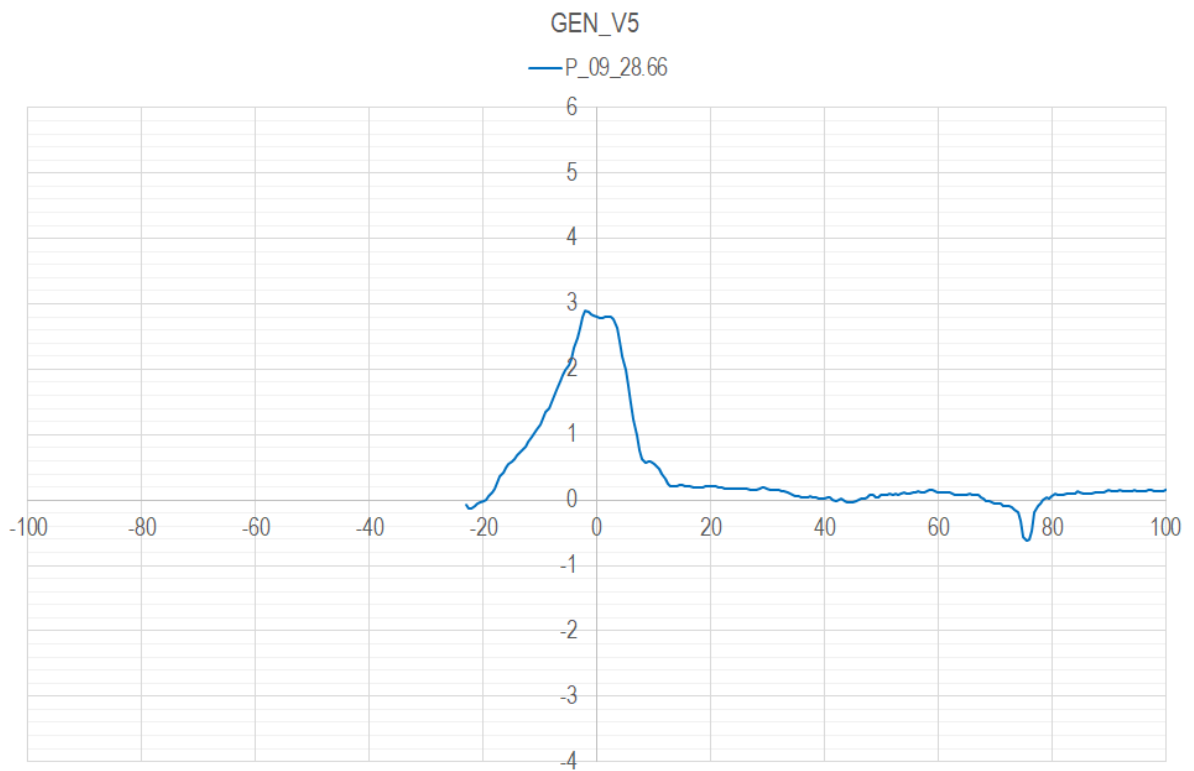
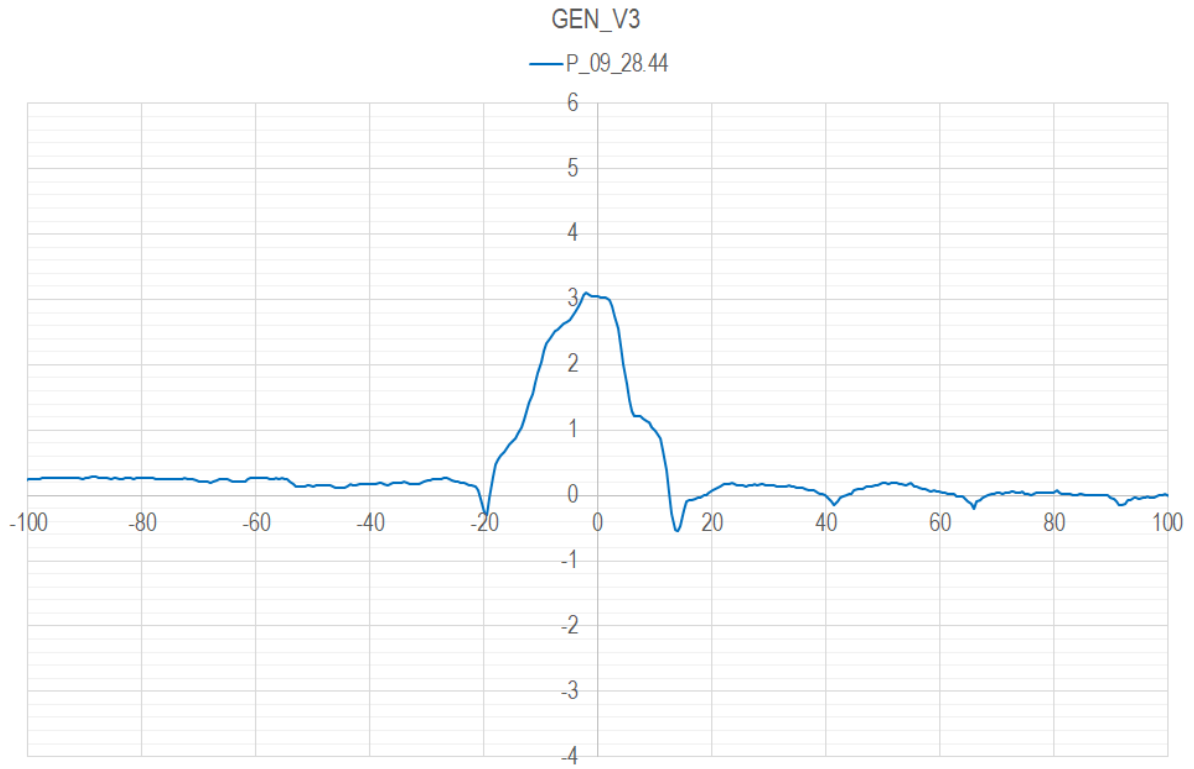


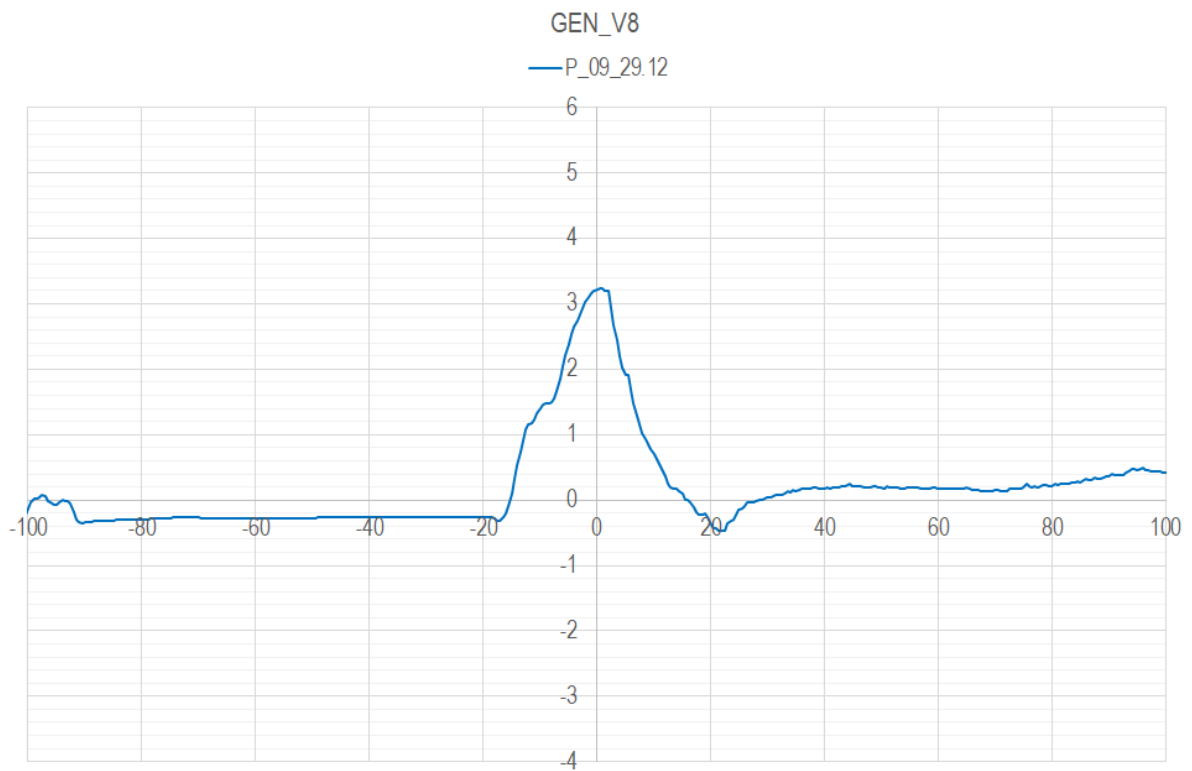
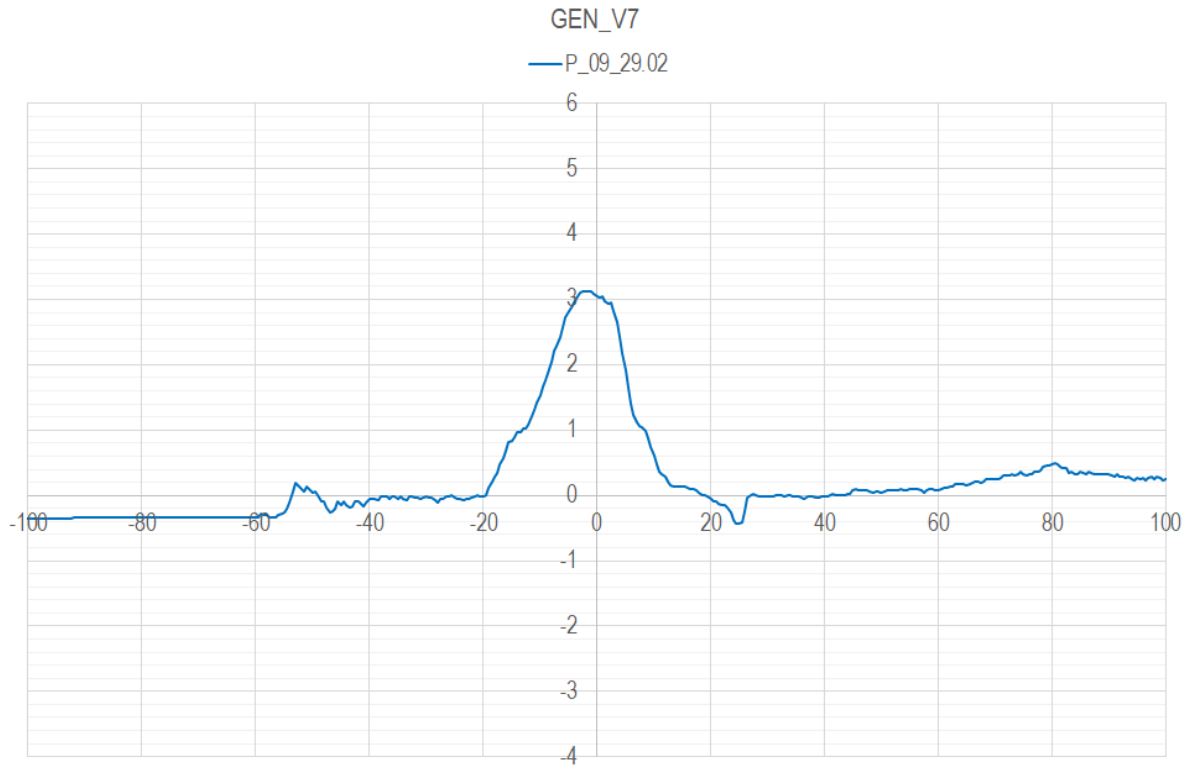


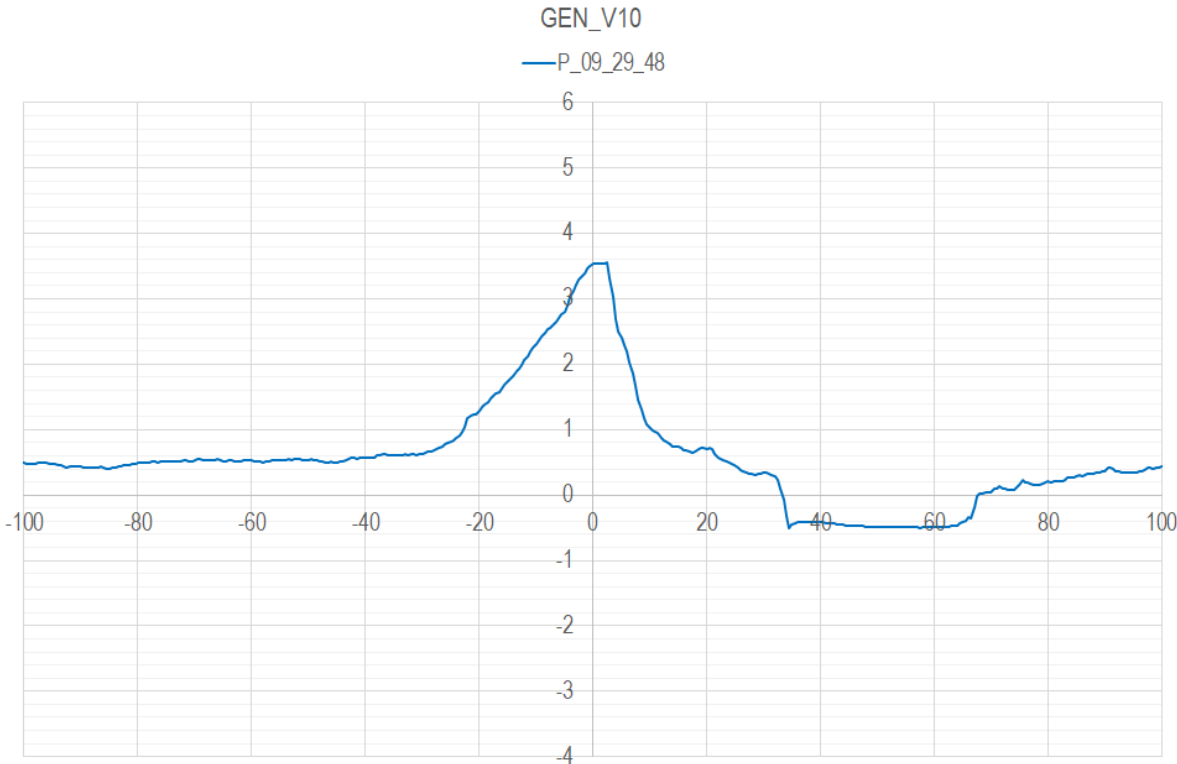
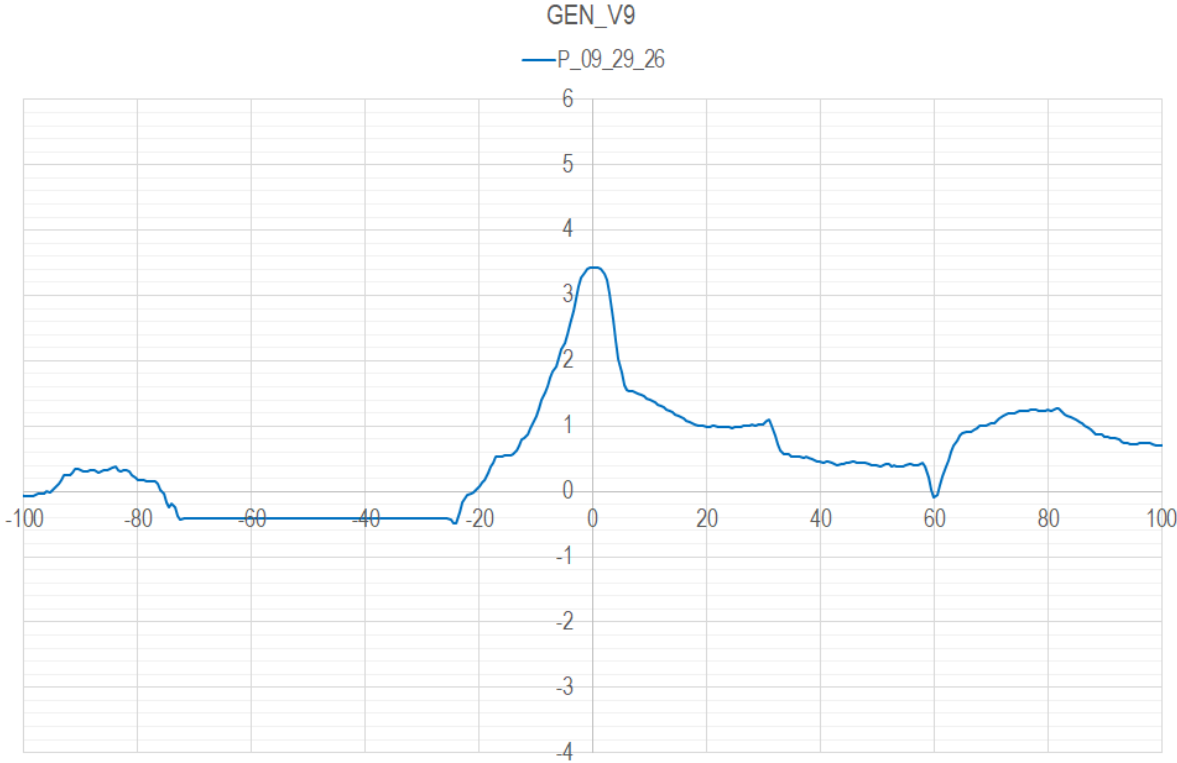


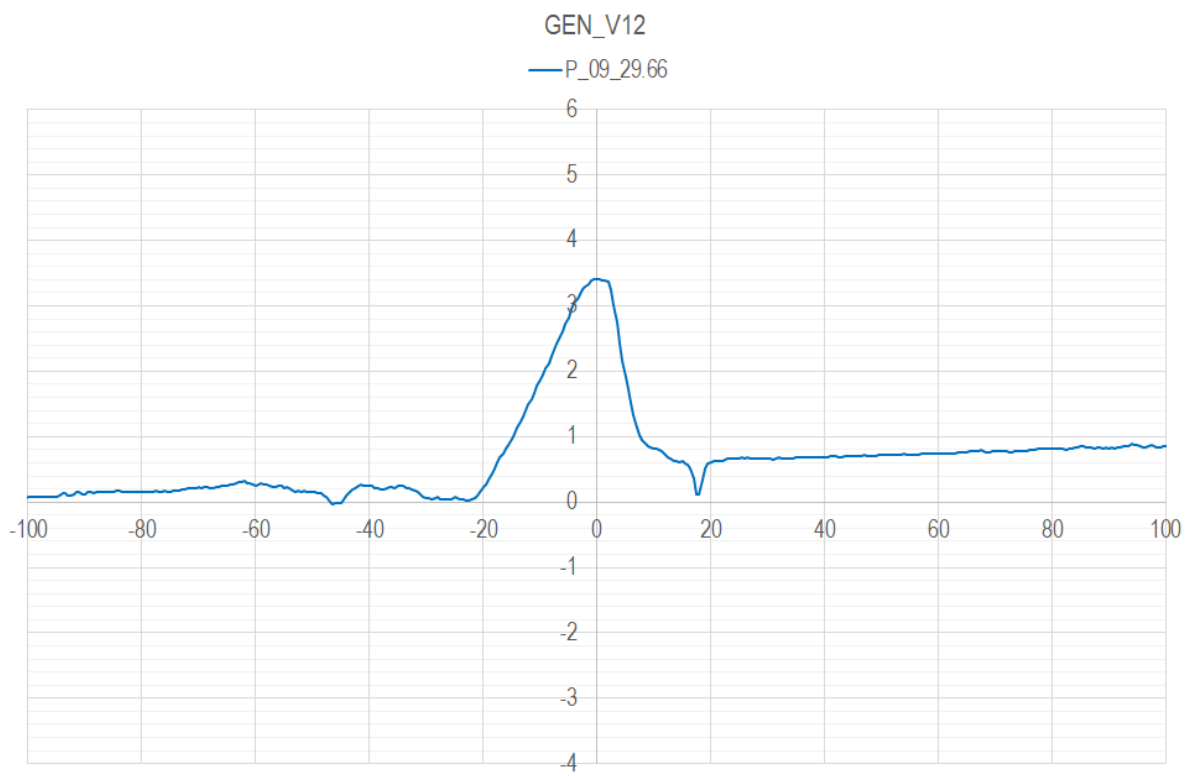
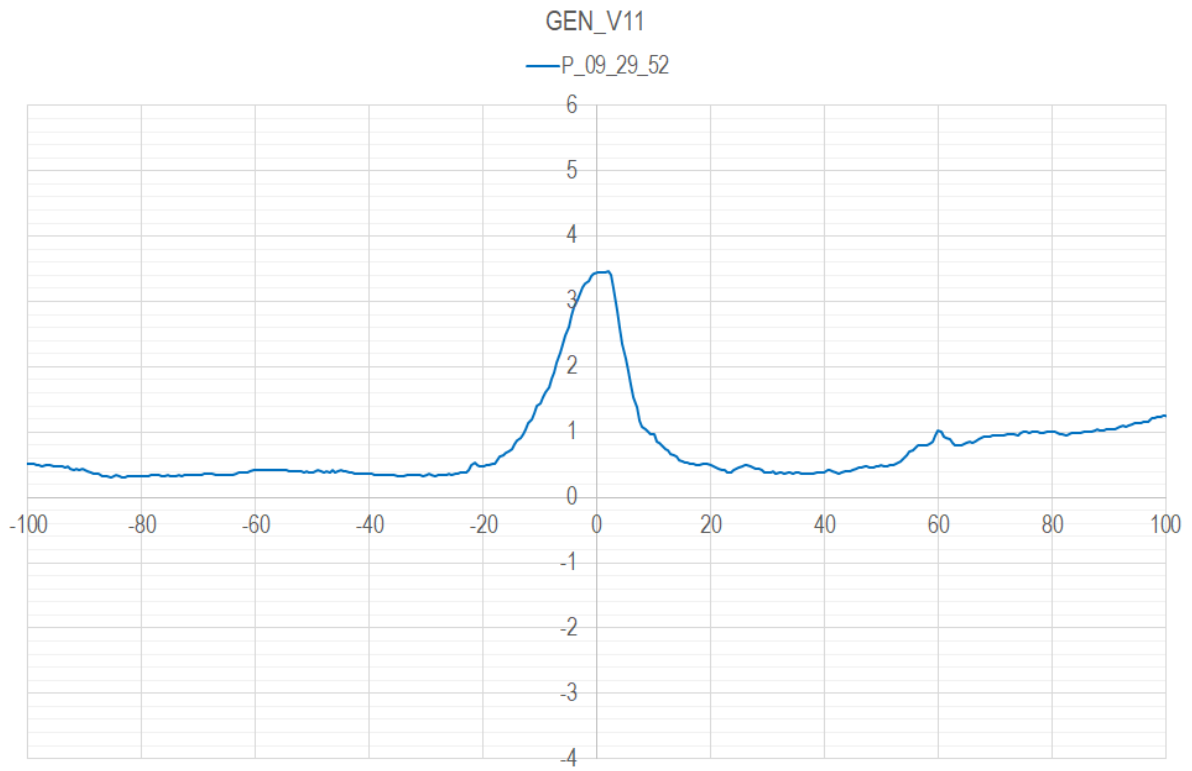
Bijlage 4 **Maatgevende profielen Genne-Streukel**

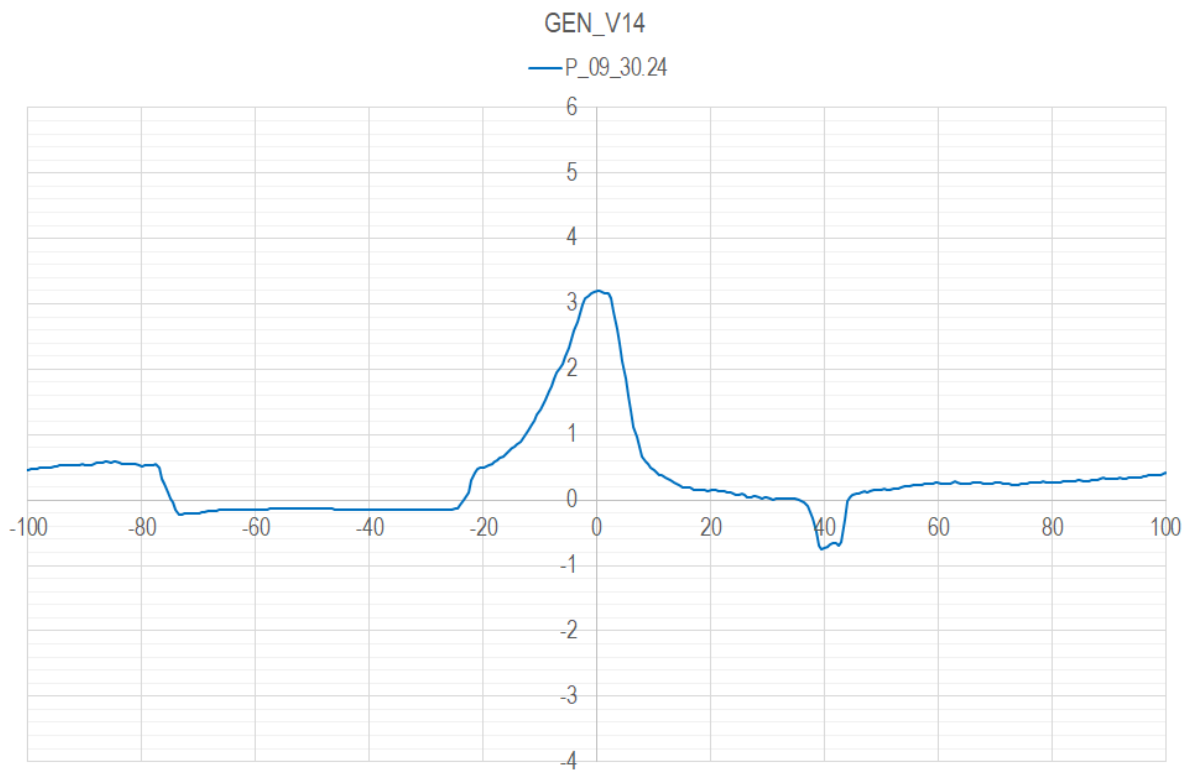
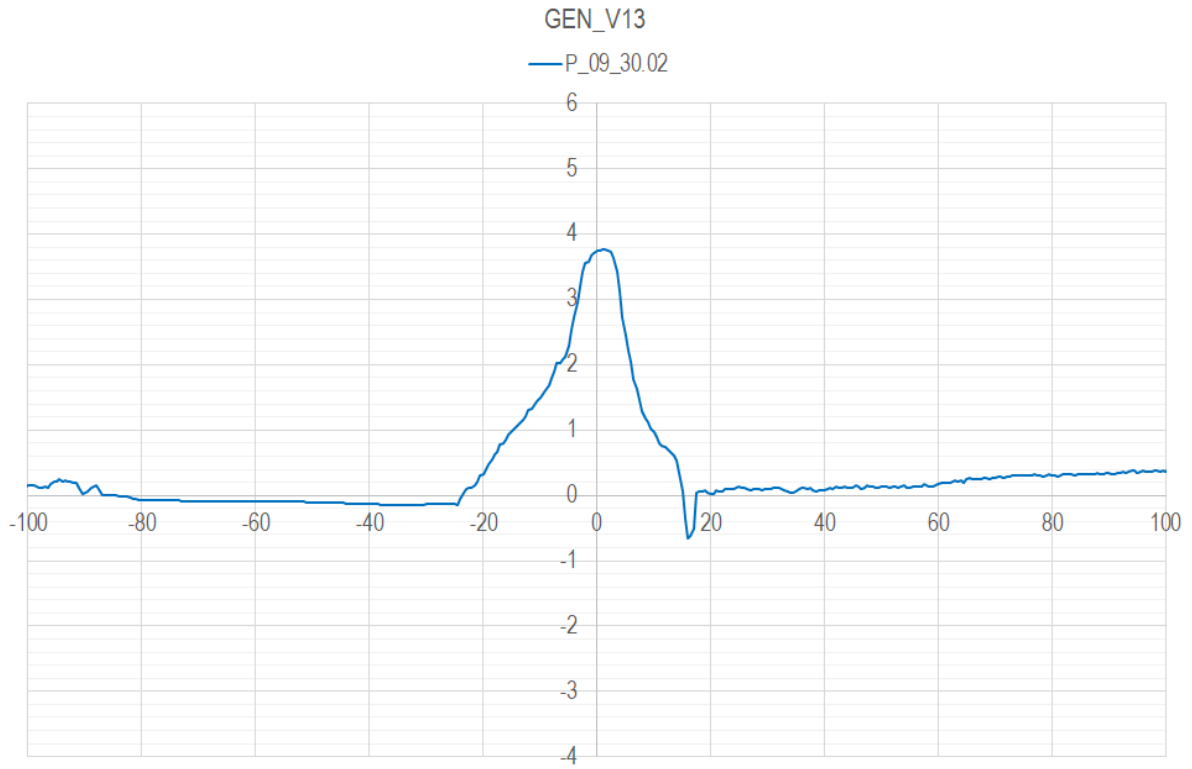




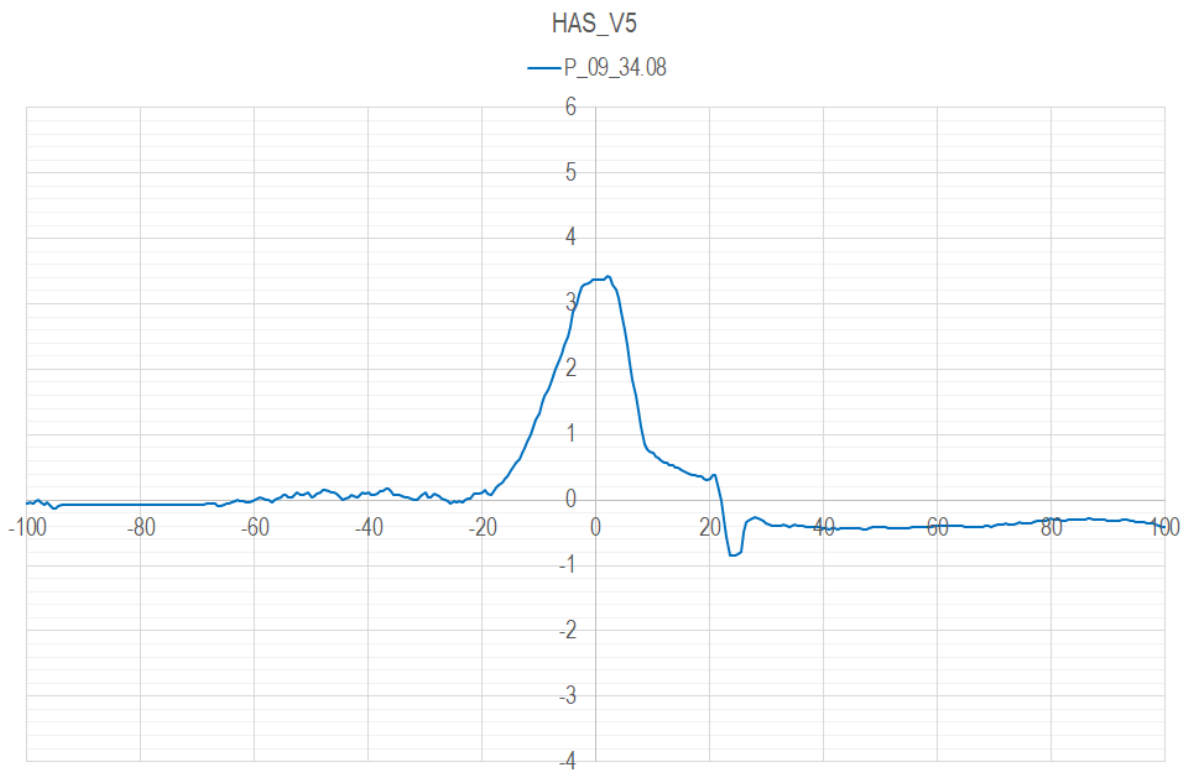
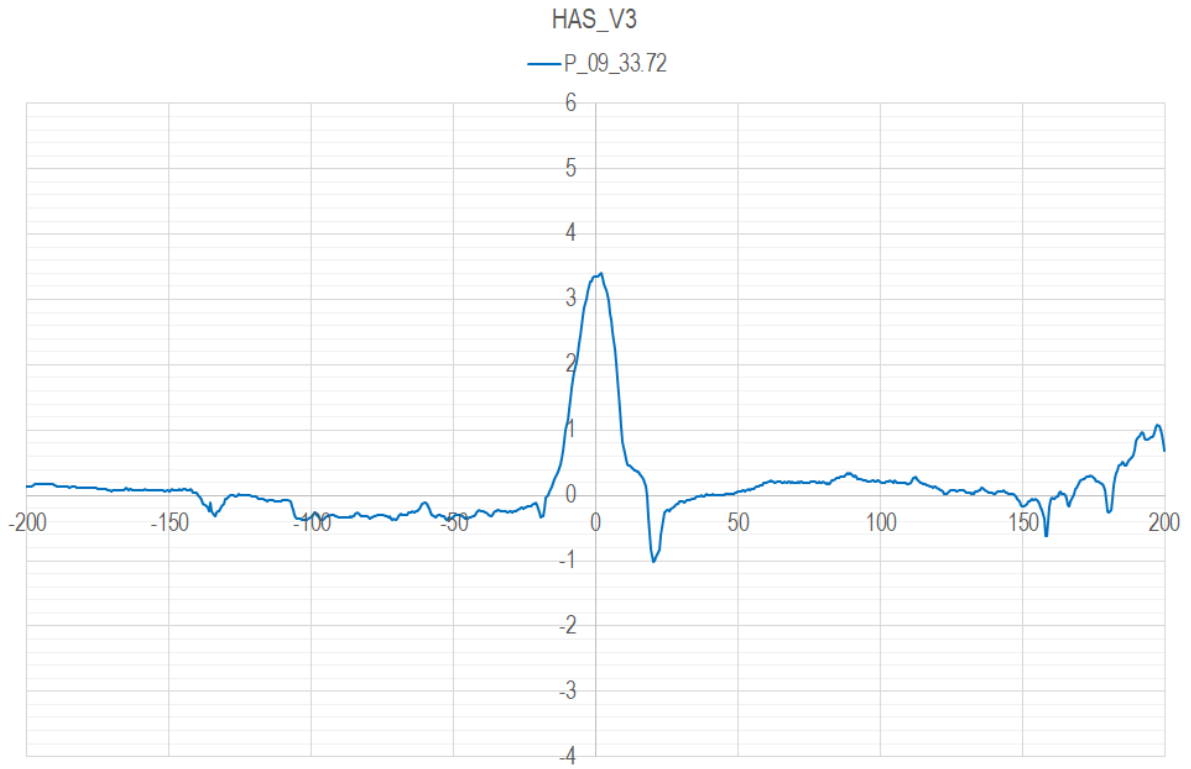


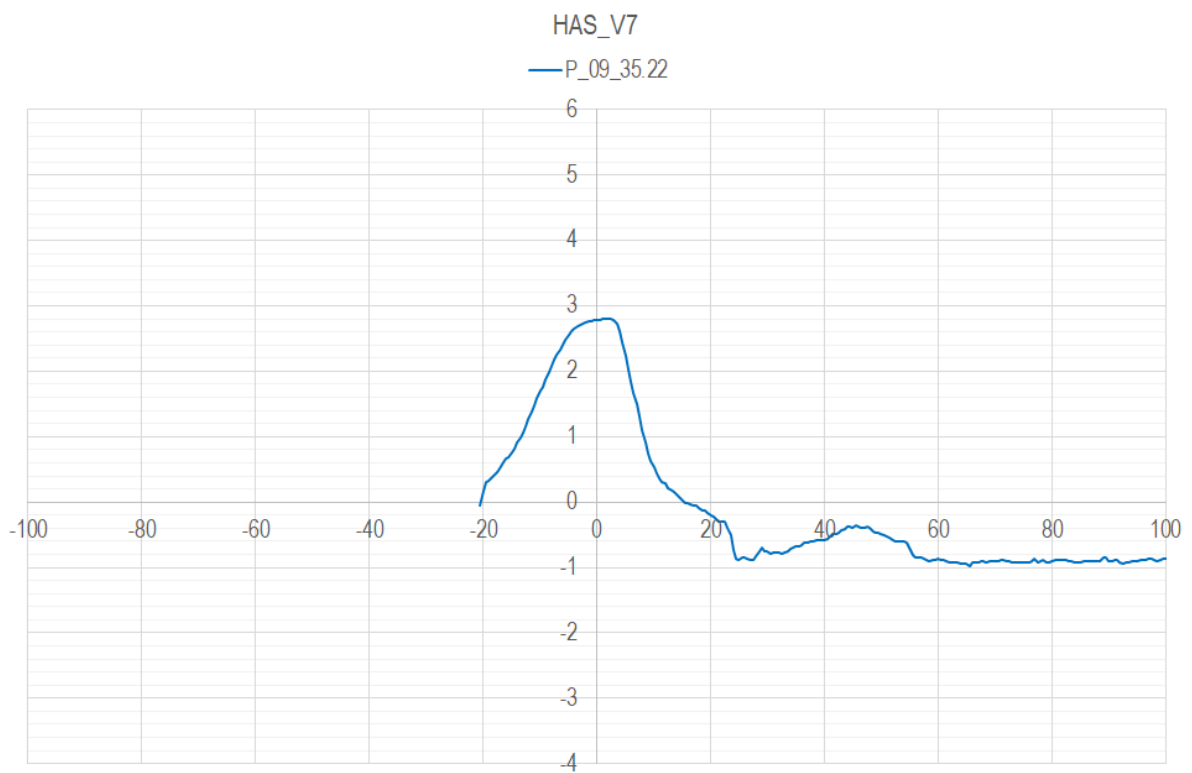
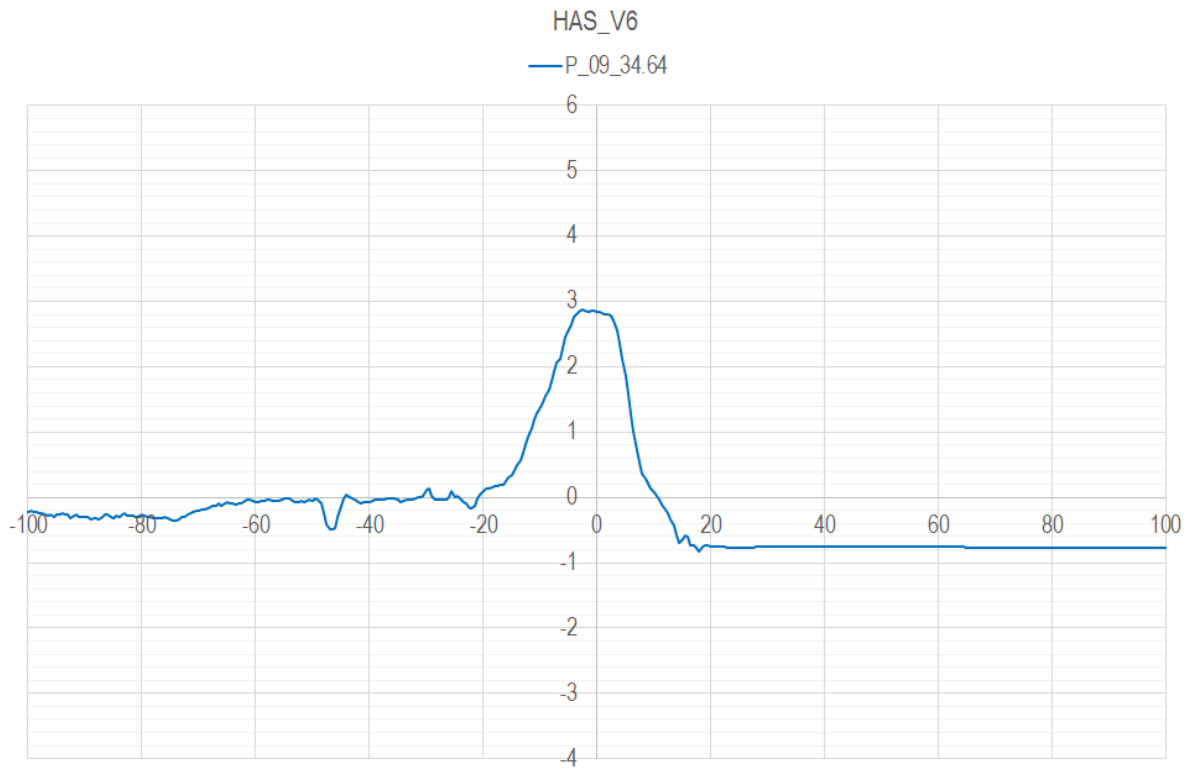


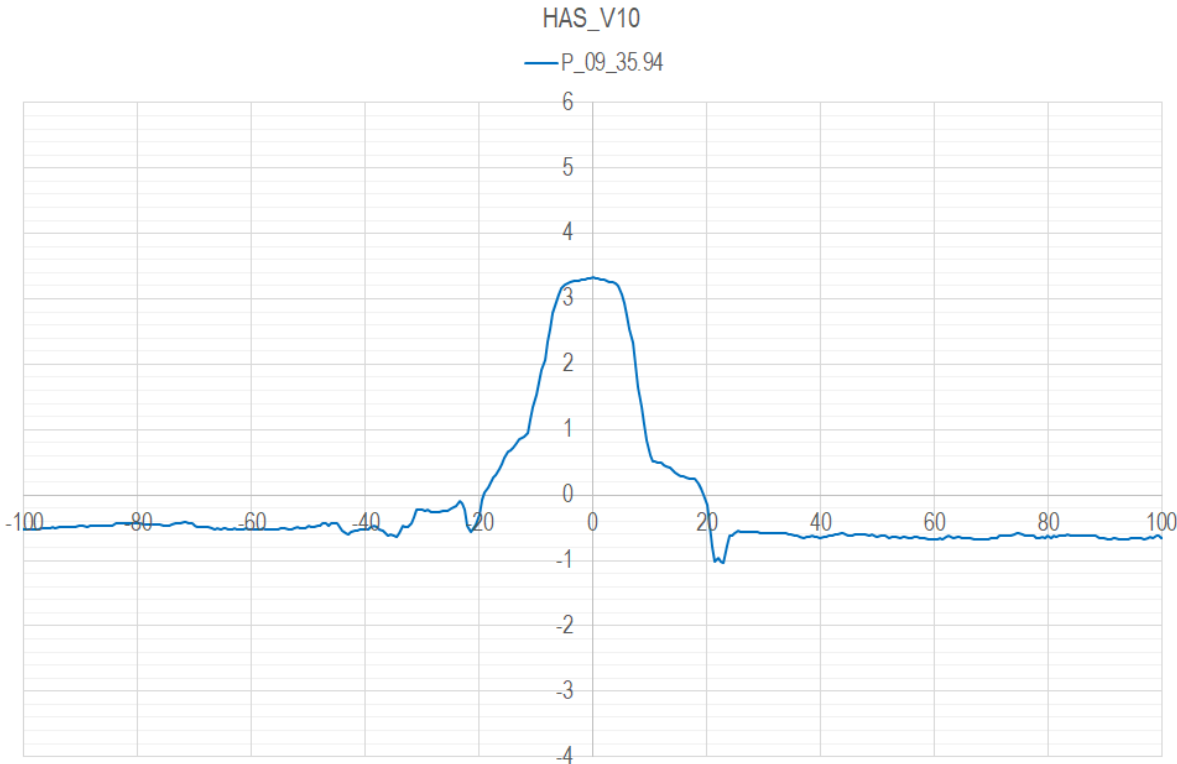
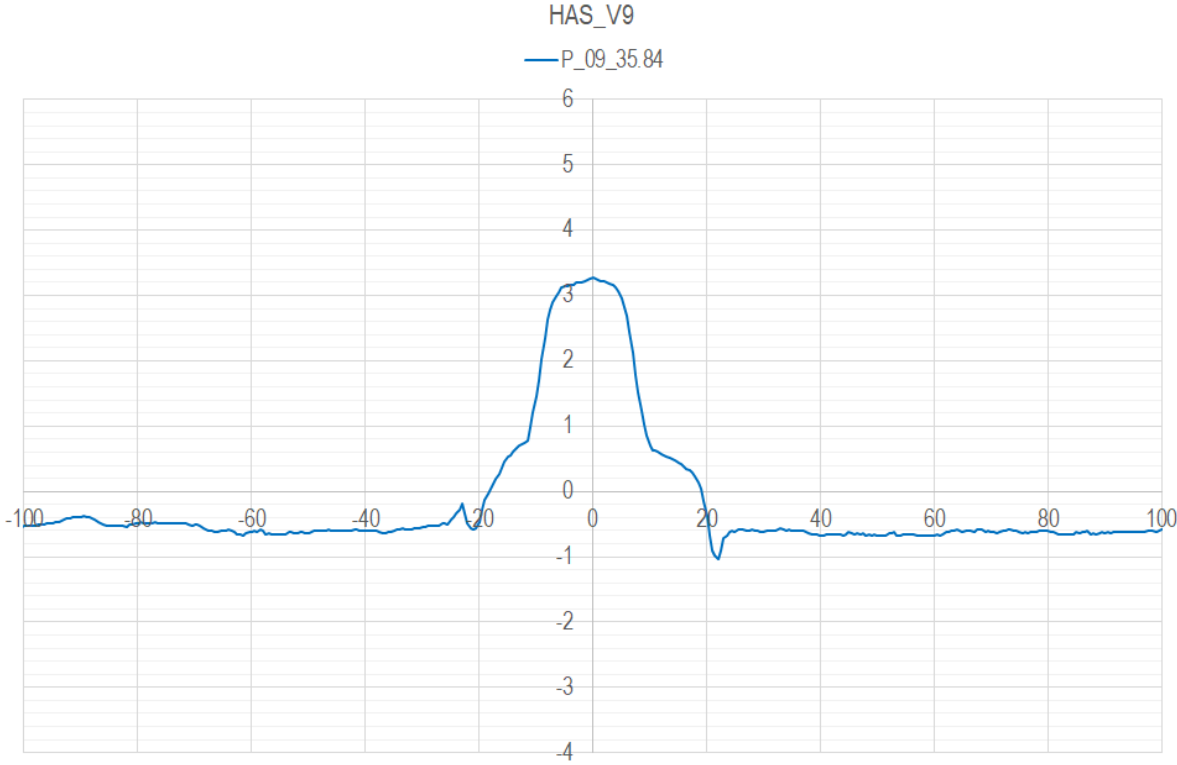


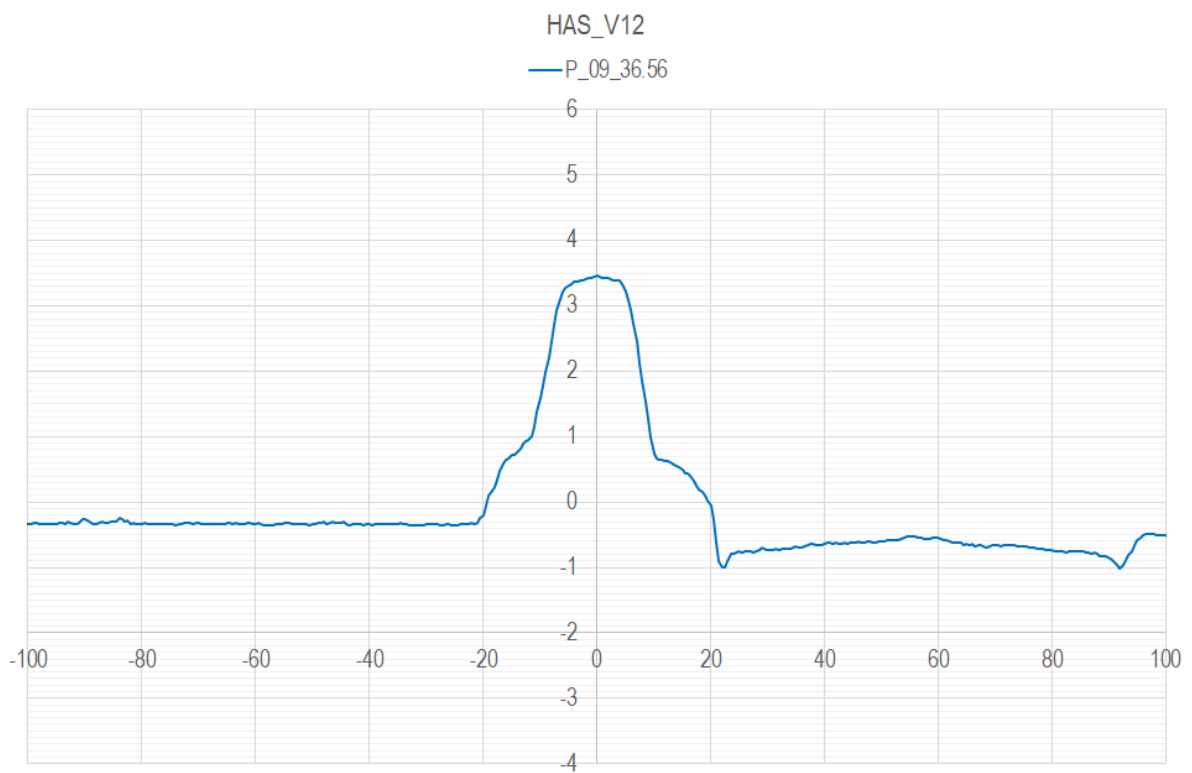
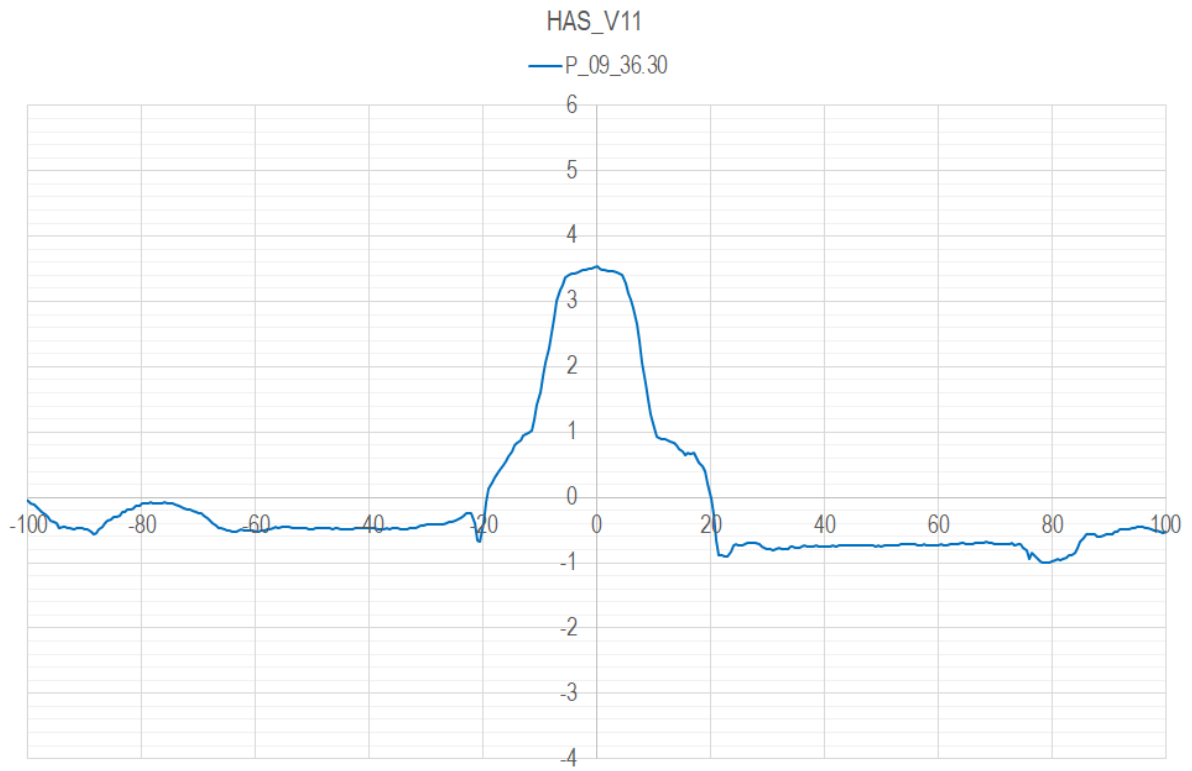


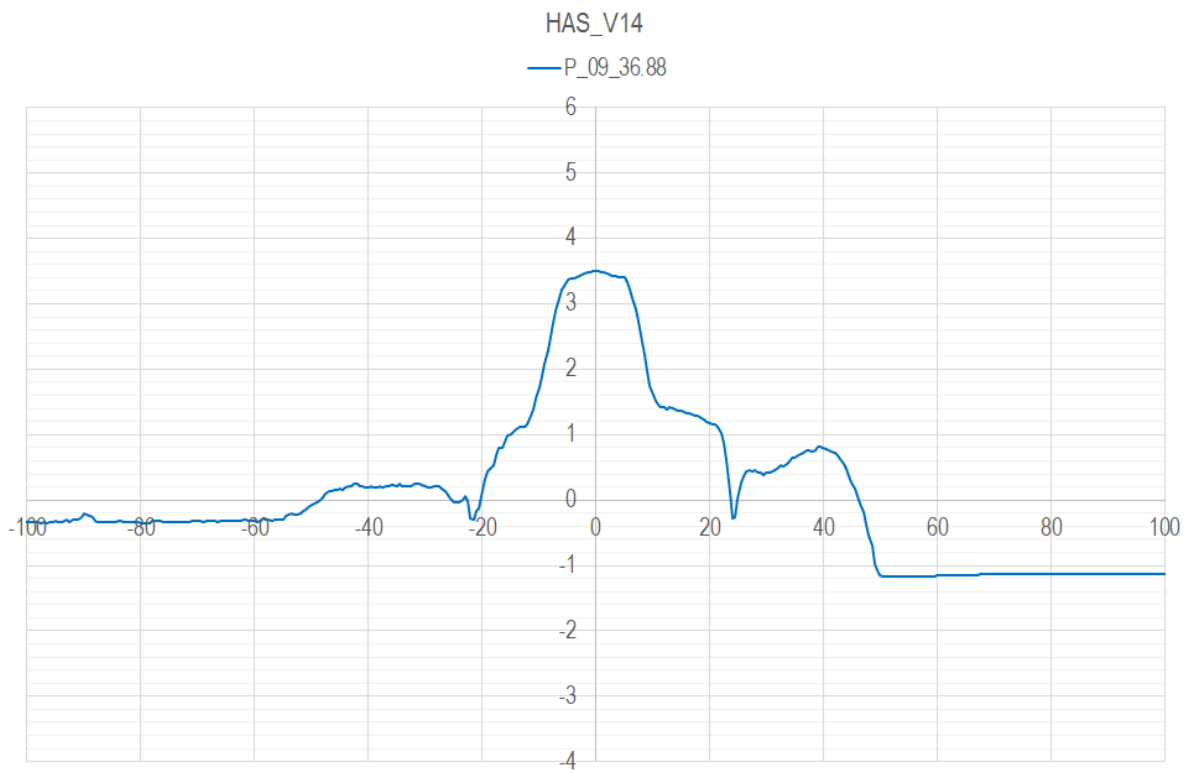
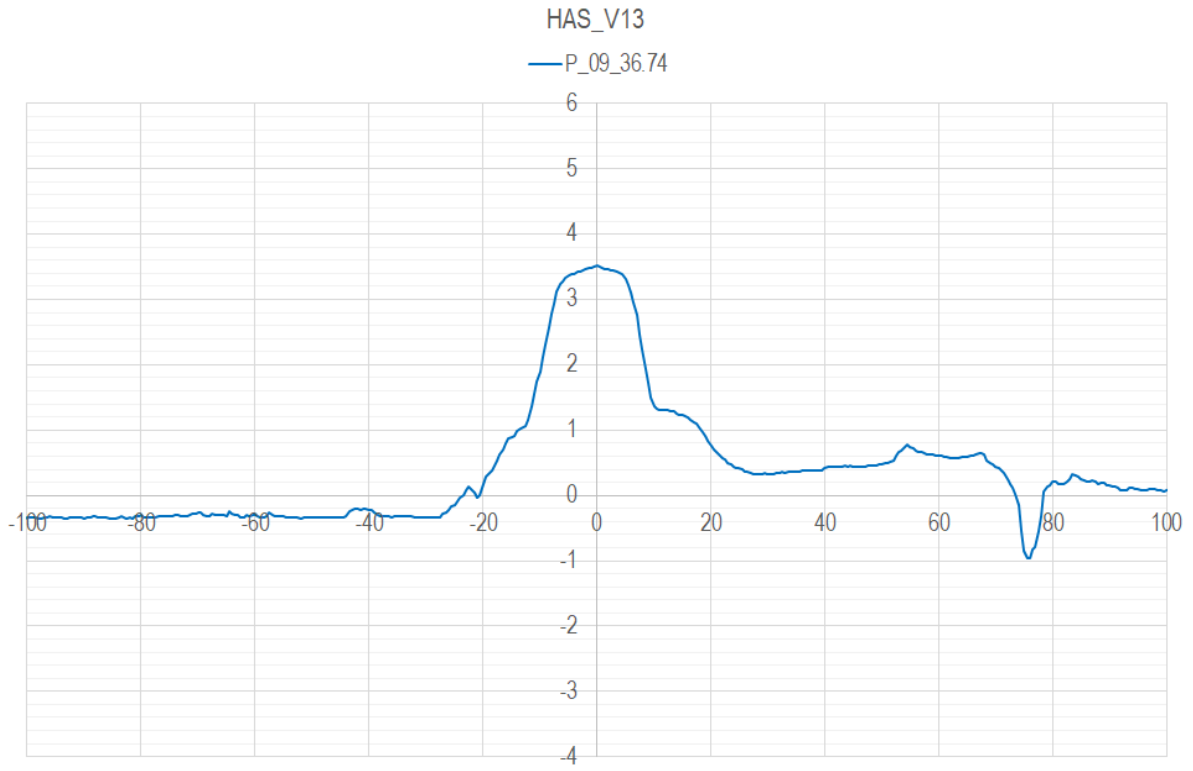
Bijlage 5 **Maatgevende profielen Hasselt-Zwartsluis**

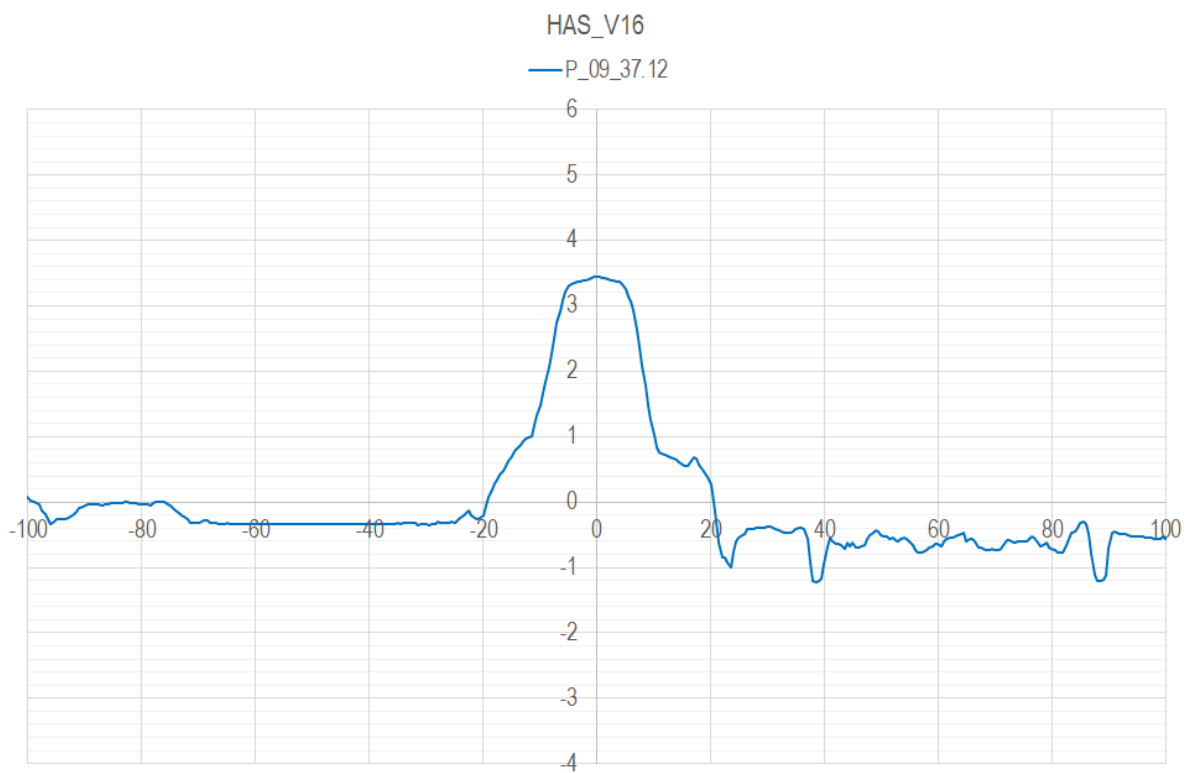
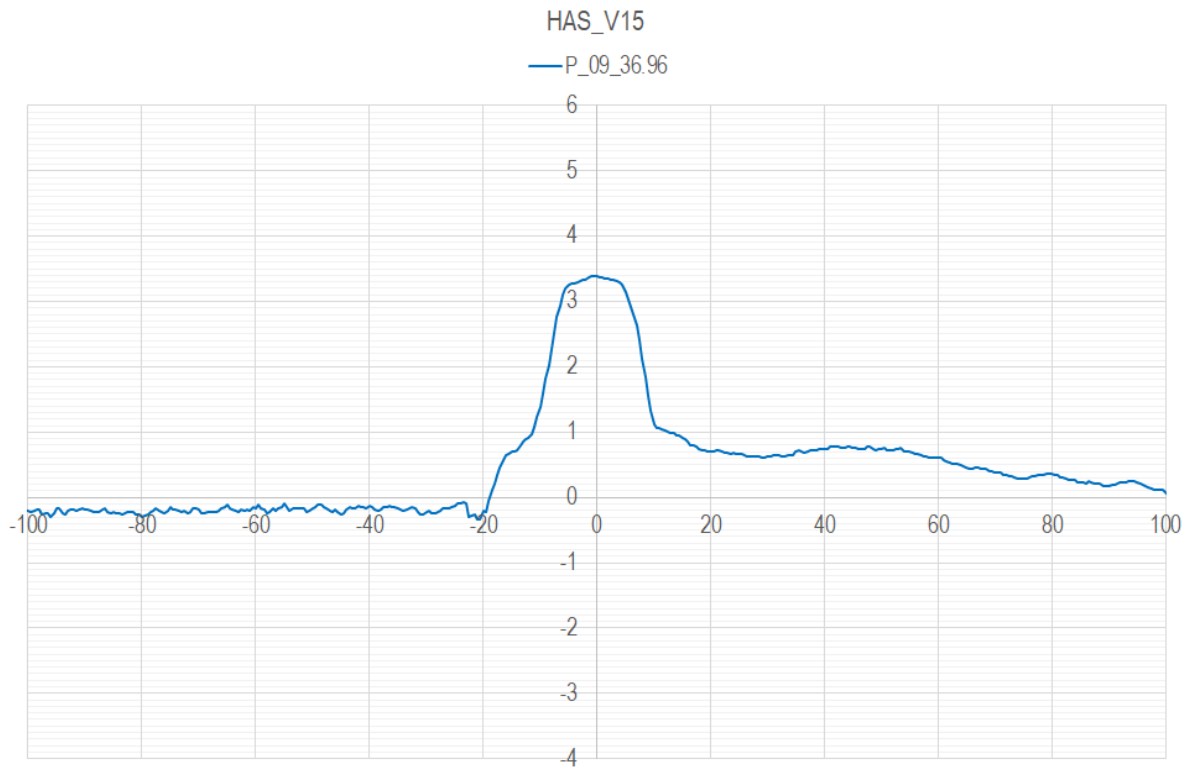


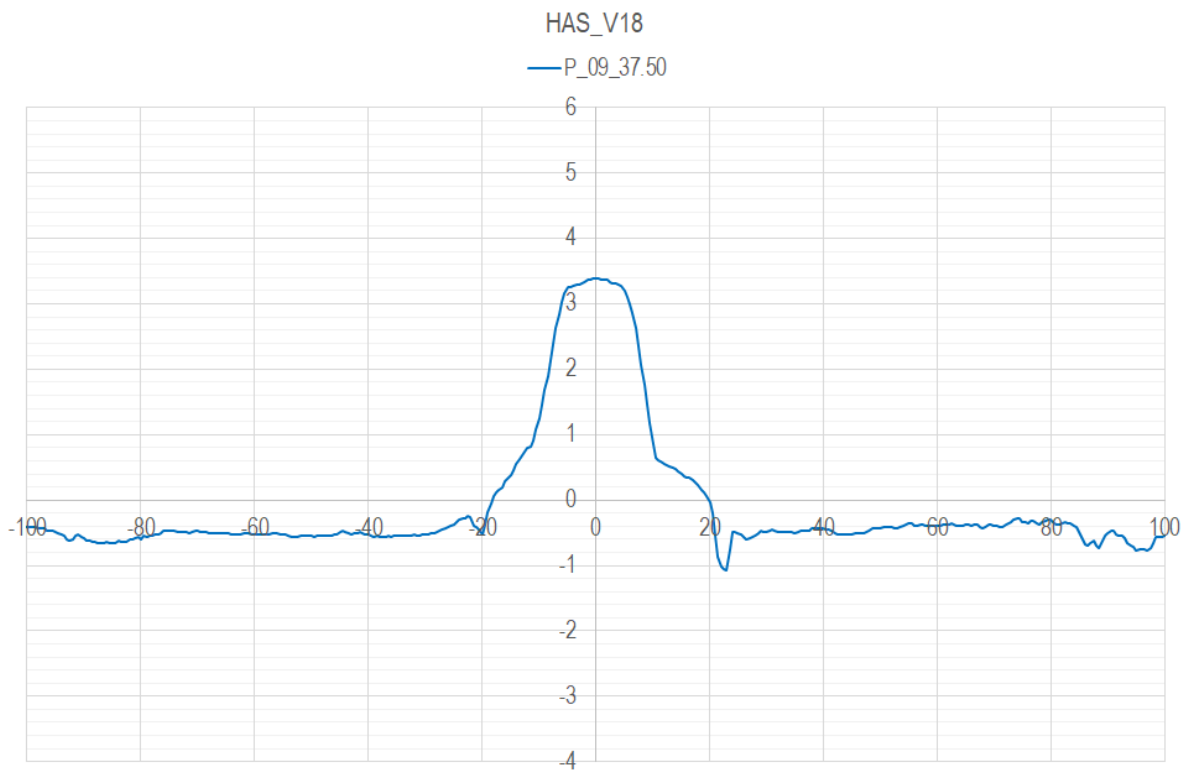
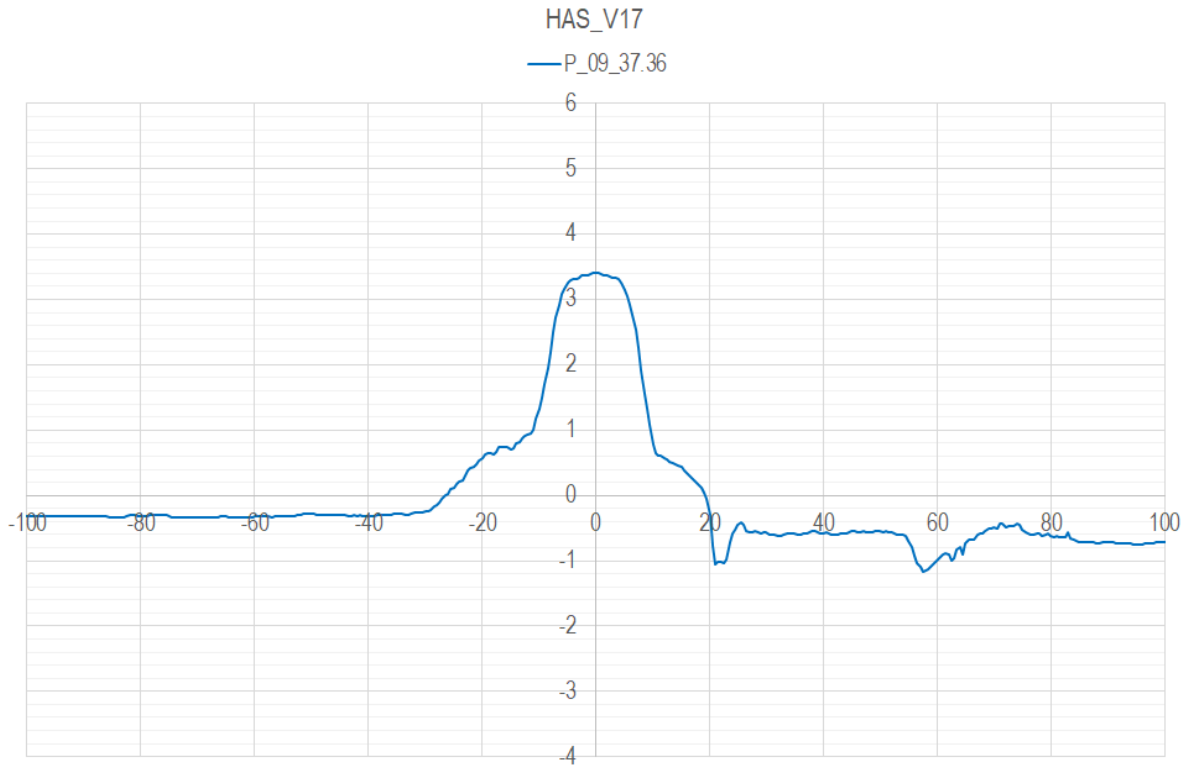


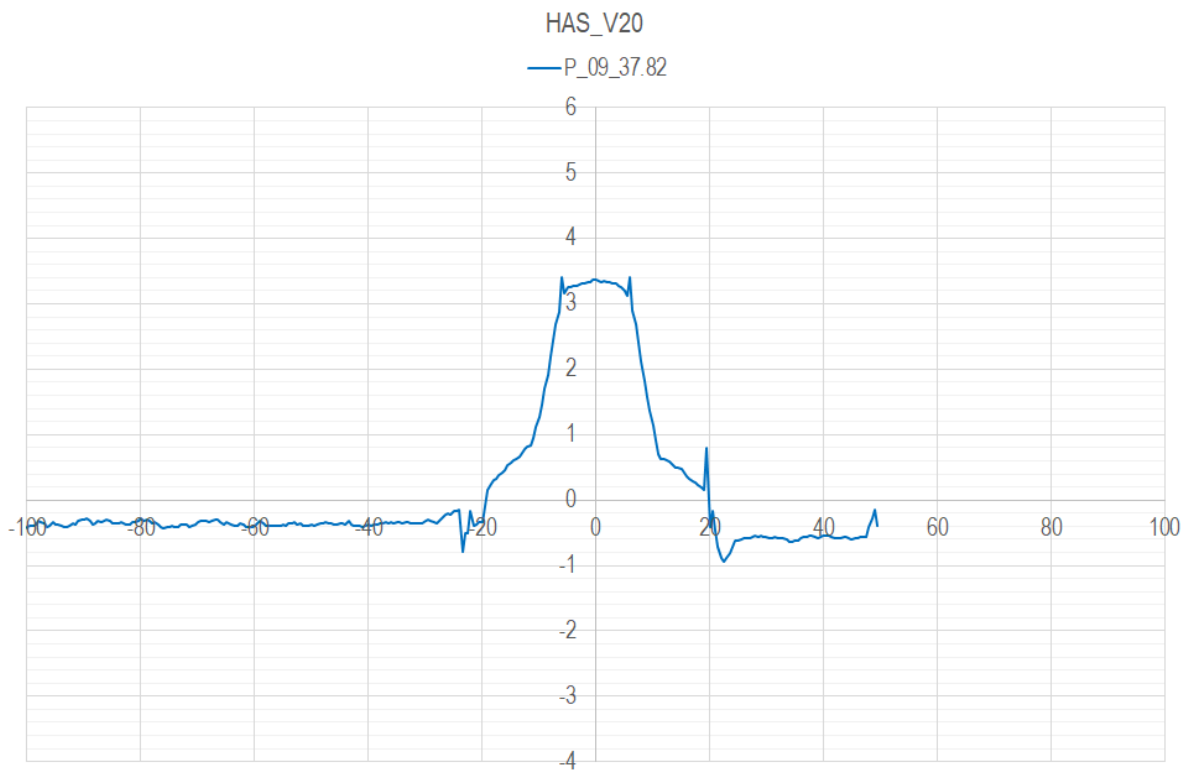
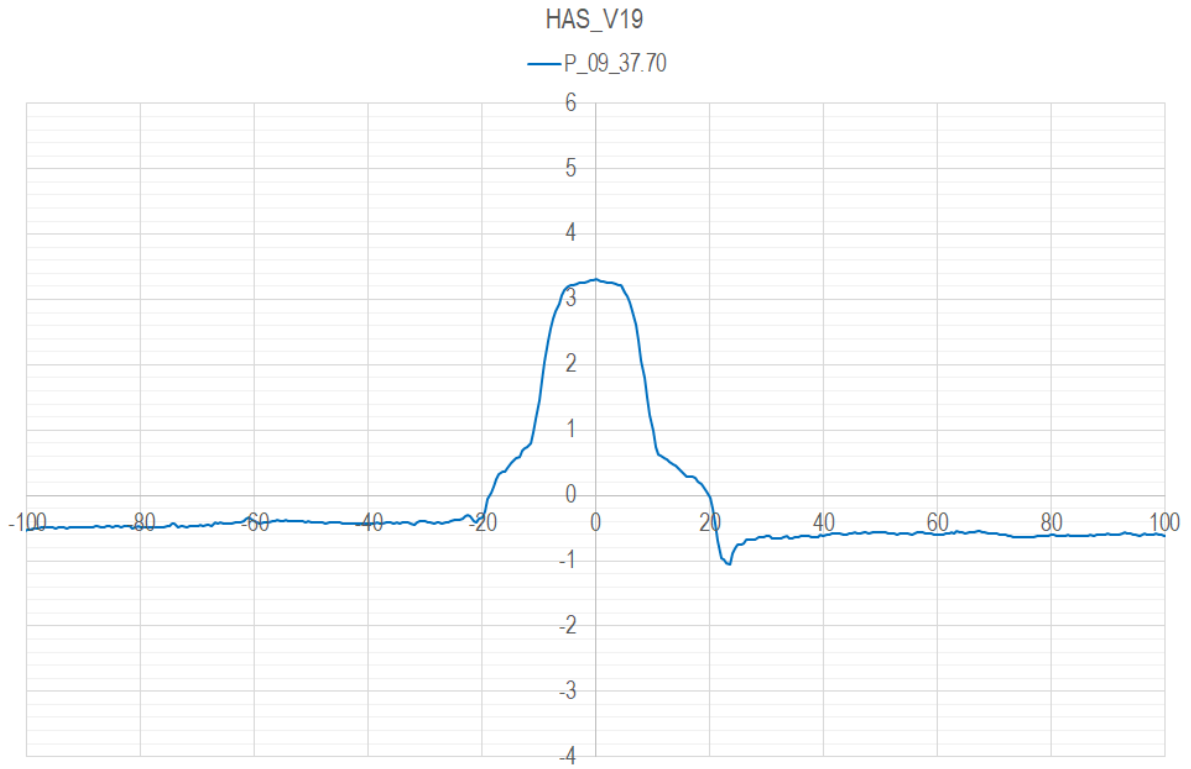


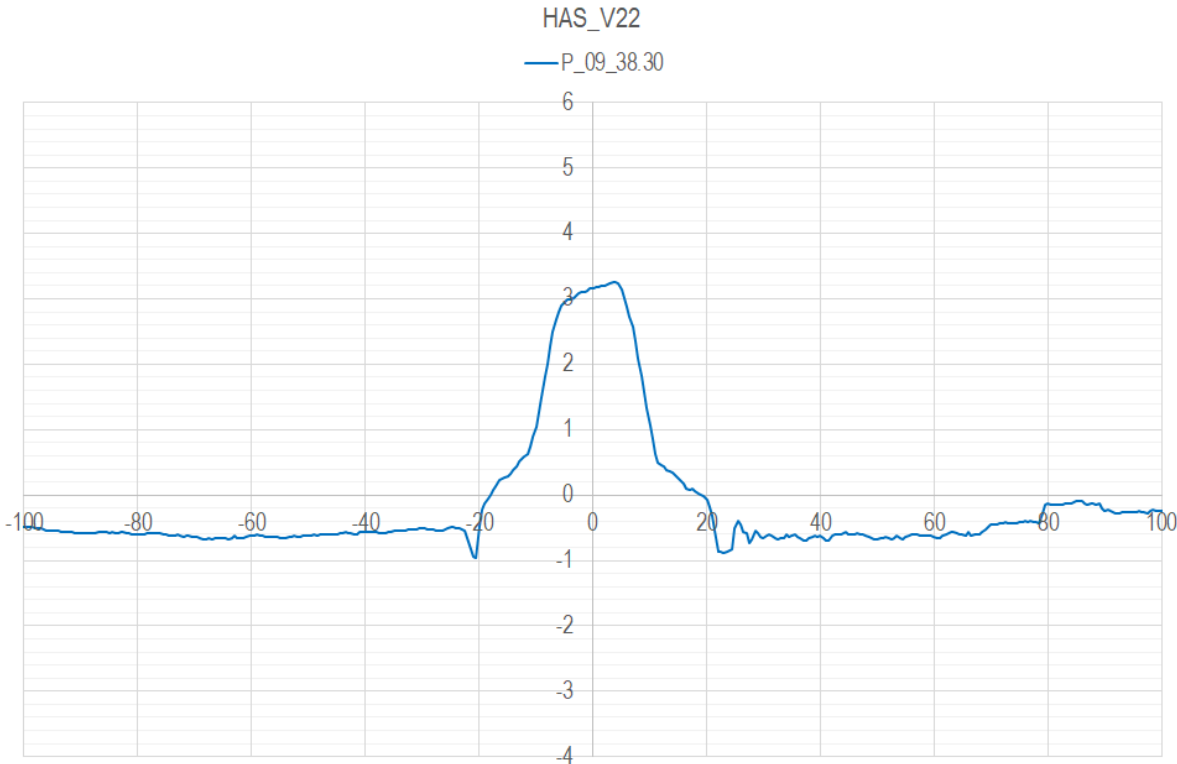
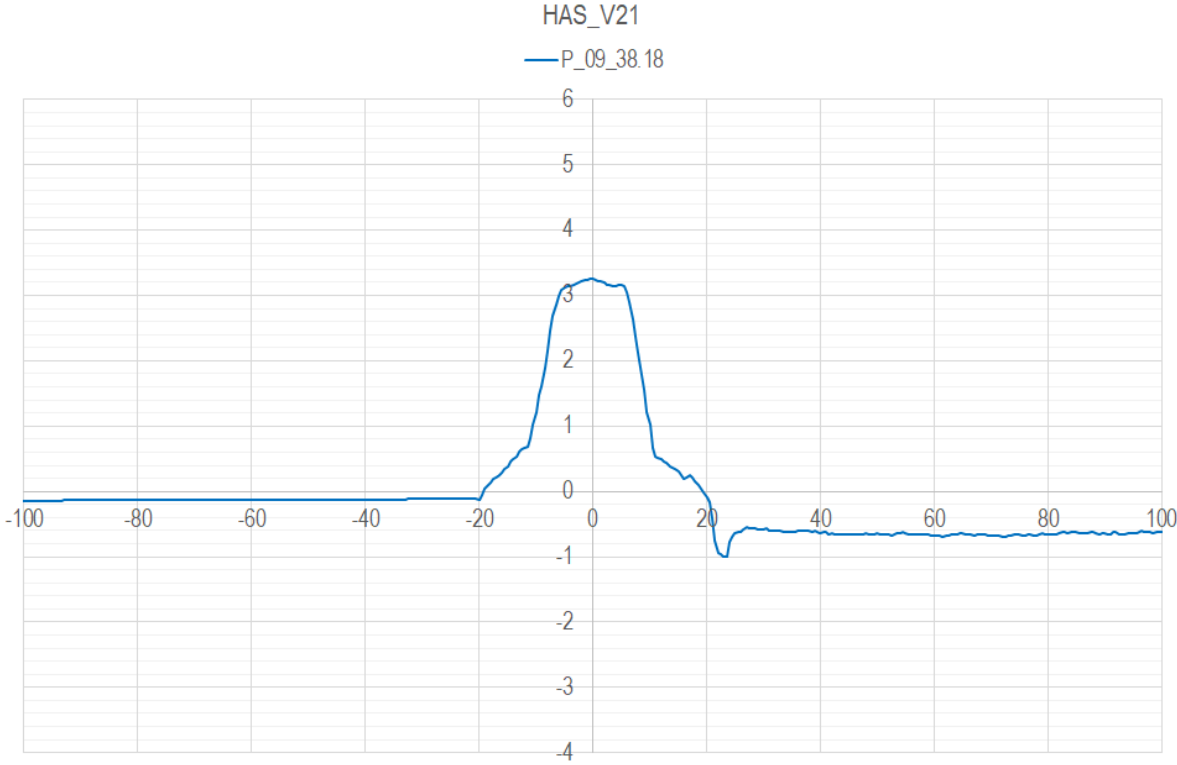












Bijlage 6 Bepaling effectieve doorlatendheid

Bijlage 7 Bepaling fictieve lengte voorland

Bijlage 8 Resultaten analytische berekeningen

VERGELIJKING MET D-GEO FLOW BEREKENINGEN; PROFIEL P_09_28.44

ID	Profiel	Slootpeil [m+NAP]	Hoogte slootbodem h_{sloot} [m+NAP]	Niveau buiten- waterstand h [m+NAP]	Freatisch niveau bij uitredepunt h_{exit} [m+NAP]	Hoogte onderkant deklaag [m+NAP]	Hoogte onderkant zandpakket [m+NAP]	Karakteristieke korrel diameter D_{70} [m]	Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag k [m/s]	Veiligheids- factor piping Y_{pip} [-]	Schem.factor piping $Y_{b,\text{pip}}$ [-]	Lengte kwelweg L [m]	Lengte opbarstkanaal d [m]	Dikte zandpakket D [m]	Intrinsieke doorlatendheid zandlaag κ [m ²]	Aanwezig verval ΔH [m]	Aanwezig verval minus bijdrage weerstand opbarstkanaal $\Delta H - 0.3d$ [m]	Kritiek verval ΔH_c [m]
B_09_28.44_1	P_09_28.44	0.10	-0.90	2.49	0.10	-0.70	-24.00	1.87E-04	9.82E-04	1.00	1.00	67.0	0.00	23.3	1.33E-10	2.39	2.39	2.39
B_09_28.44_2	P_09_28.44	0.10	-0.90	2.49	0.10	-0.70	-24.00	1.87E-04	9.82E-04	1.00	1.00	67.0	0.00	23.3	1.33E-10	2.39	2.39	2.39
B_09_28.44_3	P_09_28.44	0.10	-0.90	2.49	0.10	-0.70	-24.00	1.87E-04	9.82E-04	1.00	1.00	67.0	0.00	23.3	1.33E-10	2.39	2.39	2.39
B_09_28.44_4	P_09_28.44	0.10	-0.90	2.49	0.10	-0.70	-24.00	1.87E-04	9.82E-04	1.00	1.00	67.0	0.00	23.3	1.33E-10	2.39	2.39	2.39
B_09_28.44_5	P_09_28.44	0.10	-0.90	3.40	0.10	-0.70	-24.00	2.42E-04	5.05E-04	1.00	1.00	67.0	0.00	23.3	6.84E-11	3.30	3.30	3.30
B_09_28.44_6	P_09_28.44	0.10	-0.90	3.40	0.10	-0.70	-24.00	2.42E-04	5.05E-04	1.00	1.00	67.0	0.00	23.3	6.84E-11	3.30	3.30	3.30
B_09_28.44_7	P_09_28.44	0.10	-0.90	1.43	0.10	-0.70	-24.00	1.87E-04	9.82E-04	1.00	1.00	33.5	0.00	23.3	1.33E-10	1.33	1.33	1.33
B_09_28.44_8	P_09_28.44	0.10	-0.90	1.43	0.10	-0.70	-24.00	1.87E-04	9.82E-04	1.00	1.00	33.5	0.00	23.3	1.33E-10	1.33	1.33	1.33
B_09_28.44_9	P_09_28.44	0.10	-0.90	5.75	0.10	-0.70	-24.00	1.87E-04	9.82E-04	1.00	1.00	176.0	0.00	23.3	1.33E-10	5.65	5.65	5.65
B_09_28.44_10	P_09_28.44	0.10	-0.90	7.91	0.10	-0.70	-24.00	2.42E-04	5.05E-04	1.00	1.00	176.0	0.00	23.3	6.84E-11	7.81	7.81	7.81

VERGELIJKING MET D-GEO FLOW BEREKENINGEN; PROFIEL P_09_28.44

ID	Profiel	Locatie intrerepunt	Locatie uitredepunt	Aanwezige kwelweglengte [m]	Samenstelling watervoerend pakket	Anisotropie zandlagen k_v/k_h [-]	Rekenwaarden doorlatendheid zandpakket	Rekenwaarden korreldiameter D70	Doorlatendheid deklaag voorland [m/d]	Doorlatendheid deklaag achterland [m/d]	Verval bij ondergrens-waarde ΔH [m]	Kritiek verval D-Geo Flow ΔH_c [m]	Kritiek verval Sellmeijer 2 ΔH_c [m]	Vershil in kritiek verval D-Geo Flow / Sellmeijer 2 [m]
B_09_28.44_1	P_09_28.44	Fictief intr.pnt	Sloot	67.0	Enkellaags	1	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.15	2.15	2.39	-0.24
B_09_28.44_2	P_09_28.44	Fictief intr.pnt	Sloot	67.0	Enkellaags	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.15	2.16	2.39	-0.23
B_09_28.44_3	P_09_28.44	Fictief intr.pnt	Sloot	67.0	Meerlaags	1	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.15	2.09	2.39	-0.30
B_09_28.44_4	P_09_28.44	Fictief intr.pnt	Sloot	67.0	Meerlaags	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.15	2.16	2.39	-0.23
B_09_28.44_5	P_09_28.44	Fictief intr.pnt	Sloot	67.0	Enkellaags	1	Gem. waarden	Gem. waarden	0.05	0.05	2.15	2.97	3.30	-0.33
B_09_28.44_6	P_09_28.44	Fictief intr.pnt	Sloot	67.0	Meerlaags	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.05	0.05	2.15	2.97	3.30	-0.33
B_09_28.44_7	P_09_28.44	Buitentn	Sloot	33.5	Enkellaags	1	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.15	1.12	1.33	-0.21
B_09_28.44_8	P_09_28.44	Buitentn	Sloot	33.5	Meerlaags	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.15	1.41	1.33	0.08
B_09_28.44_9	P_09_28.44	Intr.pnt leklengte	Sloot	176.0	Meerlaags	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.15	4.45	5.65	-1.20
B_09_28.44_10	P_09_28.44	Intr.pnt leklengte	Sloot	176.0	Meerlaags	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.05	0.05	2.15	5.95	7.81	-1.86

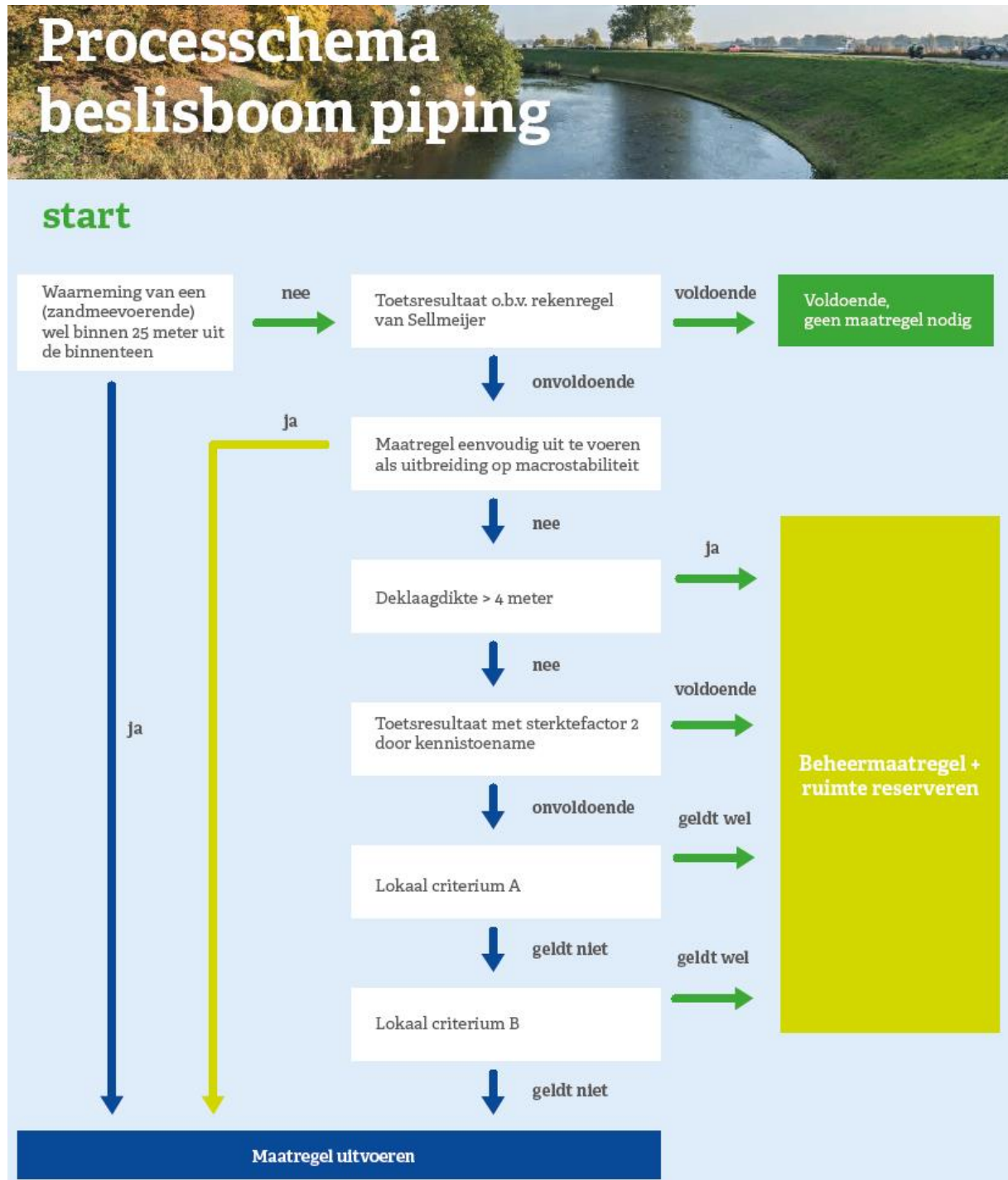
VERGELIJKING MET D-GEO FLOW BEREKENINGEN; PROFIEL P_09_37.70

ID	Profiel	Slootpeil [m+NAP]	Hoogte slootbodem h_{sloot} [m+NAP]	Niveau buiten- waterstand h [m+NAP]	Freatisch niveau bij uitredepunt h_{exit} [m+NAP]	Hoogte onderkant deklaag [m+NAP]	Hoogte onderkant zandpakket [m+NAP]	Karakteristieke korrel diameter D_{70} [m]	Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag k [m/s]	Veiligheids- factor piping Y_{pip} [-]	Schem.factor piping $Y_{b,\text{pip}}$ [-]	Lengte kwelweg L [m]	Lengte opbarstkanaal d [m]	Dikte zandpakket D [m]	Intrinsieke doorlatendheid zandlaag κ [m ²]	Aanwezig verval ΔH [m]	Aanwezig verval minus bijdrage weerstand opbarstkanaal $\Delta H - 0.3d$ [m]	Kritiek verval ΔH_c [m]
B_09_37.70_1	P_09_37.70	-0.70	-2.00	2.88	-0.70	-4.10	-34.00	1.87E-04	8.78E-04	1.00	1.00	87.0	2.10	29.9	1.19E-10	3.58	2.95	2.95
B_09_37.70_2	P_09_37.70	-0.70	-2.00	2.88	-0.70	-4.10	-34.00	1.87E-04	8.78E-04	1.00	1.00	87.0	2.10	29.9	1.19E-10	3.58	2.95	2.95
B_09_37.70_3	P_09_37.70	-0.70	-2.00	2.88	-0.70	-4.10	-34.00	1.87E-04	8.78E-04	1.00	1.00	87.0	2.10	29.9	1.19E-10	3.58	2.95	2.95
B_09_37.70_4	P_09_37.70	-0.70	-2.00	2.88	-0.70	-4.10	-34.00	1.87E-04	8.78E-04	1.00	1.00	87.0	2.10	29.9	1.19E-10	3.58	2.95	2.95
B_09_37.70_5	P_09_37.70	-0.70	-2.00	4.02	-0.70	-4.10	-34.00	2.42E-04	4.52E-04	1.00	1.00	87.0	2.10	29.9	6.12E-11	4.72	4.09	4.09
B_09_37.70_6	P_09_37.70	-0.70	-2.00	4.02	-0.70	-4.10	-34.00	2.42E-04	4.52E-04	1.00	1.00	87.0	2.10	29.9	6.12E-11	4.72	4.09	4.09
B_09_37.70_7	P_09_37.70	-0.70	-2.00	1.57	-0.70	-4.10	-34.00	1.87E-04	8.78E-04	1.00	1.00	43.5	2.10	29.9	1.19E-10	2.27	1.64	1.64
B_09_37.70_8	P_09_37.70	-0.70	-2.00	1.57	-0.70	-4.10	-34.00	1.87E-04	8.78E-04	1.00	1.00	43.5	2.10	29.9	1.19E-10	2.27	1.64	1.64
B_09_37.70_9	P_09_37.70	-0.70	-2.00	9.09	-0.70	-4.10	-34.00	1.87E-04	8.78E-04	1.00	1.00	308.0	2.10	29.9	1.19E-10	9.79	9.16	9.16
B_09_37.70_10	P_09_37.70	-0.70	-2.00	12.60	-0.70	-4.10	-34.00	2.42E-04	4.52E-04	1.00	1.00	308.0	2.10	29.9	6.12E-11	13.30	12.67	12.67

VERGELIJKING MET D-GEO FLOW BEREKENINGEN; PROFIEL P_09_37.70

ID	Profiel	Locatie intrerepunt	Locatie uitredepunt	Aanwezige kwelweglengte [m]	Samenstelling watervoerend pakket	Anisotropie zandlagen k_h/k_v [-]	Rekenwaarden doorlatendheid zandpakket	Rekenwaarden korreldiameter D70	Doorlatendheid deklaag voorland [m/d]	Doorlatendheid deklaag achterland [m/d]	Verval bij ondergrens-waarde ΔH [m]	Kritiek verval D-Geo Flow ΔH_c [m]	Kritiek verval Sellmeijer 2 ΔH_c [m]	Vershil in kritiek verval D-Geo Flow / Sellmeijer 2 [m]
B_09_37.70_1	P_09_37.70	Fictief intr.pnt	Sloot	87.0	Enkellaags	1	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.63	2.66	2.95	-0.29
B_09_37.70_2	P_09_37.70	Fictief intr.pnt	Sloot	87.0	Enkellaags	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.63	2.68	2.95	-0.27
B_09_37.70_3	P_09_37.70	Fictief intr.pnt	Sloot	87.0	Meerlaags	1	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.63	2.62	2.95	-0.33
B_09_37.70_4	P_09_37.70	Fictief intr.pnt	Sloot	87.0	Meerlaags	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.63	2.71	2.95	-0.24
B_09_37.70_5	P_09_37.70	Fictief intr.pnt	Sloot	87.0	Enkellaags	1	Gem. waarden	Gem. waarden	0.05	0.05	2.63	3.68	4.09	-0.41
B_09_37.70_6	P_09_37.70	Fictief intr.pnt	Sloot	87.0	Meerlaags	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.05	0.05	2.63	3.75	4.09	-0.34
B_09_37.70_7	P_09_37.70	Buitentn	Sloot	43.5	Enkellaags	1	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.63	1.38	1.64	-0.26
B_09_37.70_8	P_09_37.70	Buitentn	Sloot	43.5	Meerlaags	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.63	1.69	1.64	0.05
B_09_37.70_9	P_09_37.70	Intr.pnt leklengte	Sloot	308.0	Meerlaags	3	Kar. waarden	Kar. waarden	0.10	0.10	2.63	7.94	9.16	-1.22
B_09_37.70_10	P_09_37.70	Intr.pnt leklengte	Sloot	308.0	Meerlaags	3	Gem. waarden	Gem. waarden	0.05	0.05	2.63	11.08	12.67	-1.59

Bijlage 9 Processchema Beslisboom Piping



Figuur 70: Beslisboom piping

Bijlage 10 Grondwatermodellering

Uitgangspunten

Modellagen en doorlatendheden

De bovenzijde van het model is gelijk aan maaiveld. De modellagen hebben vlakdekkend een gelijk dikte. De niveaus van elke laag bewegen mee met de trend van het maaiveld. Laagdiktes, laagtypes en doorlatendheden zijn gegeven. Uitgangspunt voor de bodemopbouw betreffen de bronnen van het SOS.

Tabel 37: Uitgangspunten bodemlagen grondwatermodel

Model laag	Laagdikte (m)	Laagtype	Horizontale doorlatendheid (m/d)	Verticale doorlatendheid (m/d)
1	1	Alleen actief buitendijks voor de randvoorwaarde van hoogwater op de Vecht	100	100
2	1	Deklaag (klei)	Startwaarde: 0,5	Startwaarde: 0,5
3	3	WVP (matig fijn zand)	8	8
4	8	WVP (matig grof zand)	50	50
5	8	WVP (matig grof zand)	50	50

In het grondwatermodel is een aanname voor 1 meter deklaag gedaan. Dit is een doorlatende meter deklaag. De schematiseringshandleiding piping gaat uit van deklagen met een ondoorlatendheid plus een deel rooflaag. In de modellering wordt dus een conservatieve benadering voor de deklaag gedaan. Er is een doorlatende deklaag aangenomen, terwijl er normaal ondoorlatendheid aangenomen wordt. Dit resulteert in een hogere uitkomst voor de verticale deklaagdoorlatendheid en een lagere weerstand.

In het grondwatermodel wordt geen gebruik gemaakt van een intredeweerstand van de rivier. Mocht deze weerstand wel aanwezig zijn, dan vindt minder voeding door de rivierbodem plaats dan in het huidige model. Dit betekent dat de deklaagweerstand in het model moet afnemen om eenzelfde grondwaterstand te berekenen. Dit is een aandachtspunt wanneer deze methode in andere projecten wordt gebruikt.

Stationaire modellering

De grondwatermodellering is stationair uitgevoerd. Voor de stationaire situatie is de hoogwatergolf van 6 januari 2012 gebruikt. Deze hoogwatergolf is gegeven in Figuur 52 met de lichtblauwe lijn oppervlaktewaterstand. Er is gekozen voor een stationair grondwatermodel ten behoeve van de beschikbare tijd en ten behoeve van het aantal te beïnvloeden parameters. Wanneer een instationair model gebruikt zou worden moeten aannames gedaan worden voor bijvoorbeeld de bergingscoëfficiënt. Dit maakt de kalibratie en daarmee inschatting van de deklaagdoorlatendheid complexer. Met de stationaire benadering is gestreefd naar een zo eenvoudig mogelijk, maar daarbij goed mogelijke met de praktijk te matchen modellering.

Boundary conditions

In de modellering is gewerkt met een aantal boundary conditions:

- Een fixed head is gebruikt op modellaag 0 aan de volledige buitendijkse zijde. Deze fixed head ligt bovenop modellaag 1, welke de deklaag betreft. Hiermee wordt het overstromen van de deklaag met het hoogwater gesimuleerd.
- In modellaag 1, 2 en 3, ten hoogte van het zomerbed van de Vecht, is de rivierwaterstand toegekend met een fixed head. Dit simuleert de voeding van het zomerbed van de rivier in het model.
- Aan de binnendijkse zijde, het achterland, is gebruik gemaakt van een general head boundry om het slotensysteem mee te modelleren.

- Met behulp van een recharge boundary op de top van het model is de gemiddelde neerslag van 1 millimeter per dag toegepast.

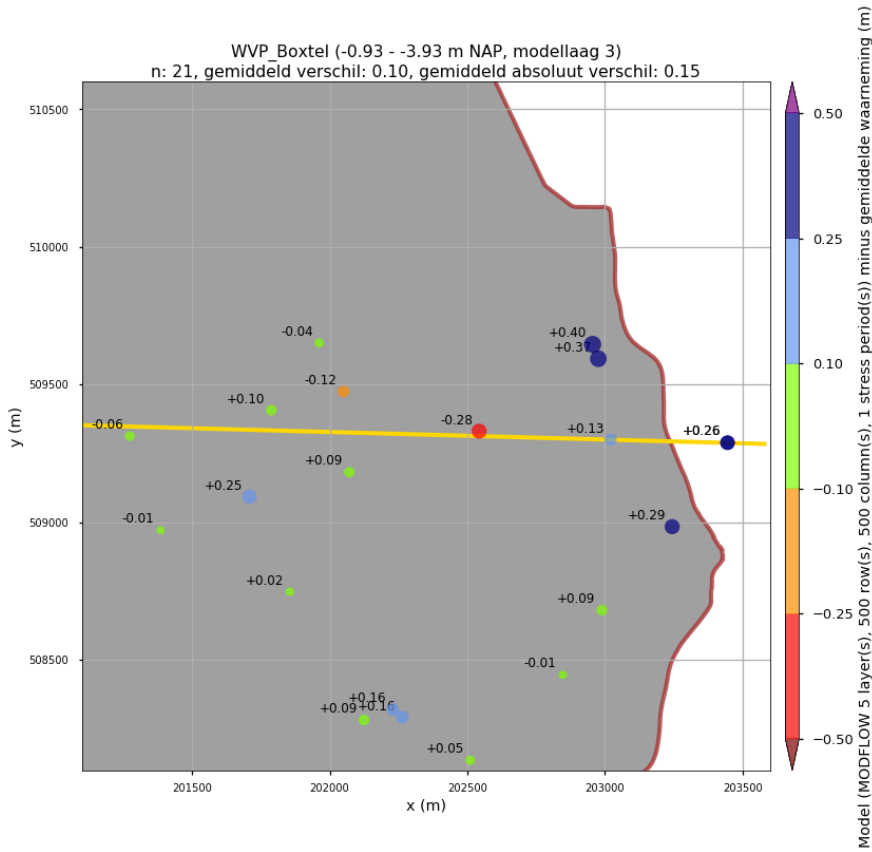
Model extent en Grid

Het grondwatermodel heeft een grootte van 2,5 bij 2 kilometer. De gridsize bevat cellen van 5 bij 5 meter. Dit bevat voldoende detail voor een goede numerieke werking in het model. Aanwezige peilbuizen langs de modelranden zijn meegenomen in de kalibratie. De kalibratie toont een goede match ten opzichte van de modeluitkomsten. De modelrand ligt op voldoende afstand, waar het hoogwater geen invloed meer uitoefent.

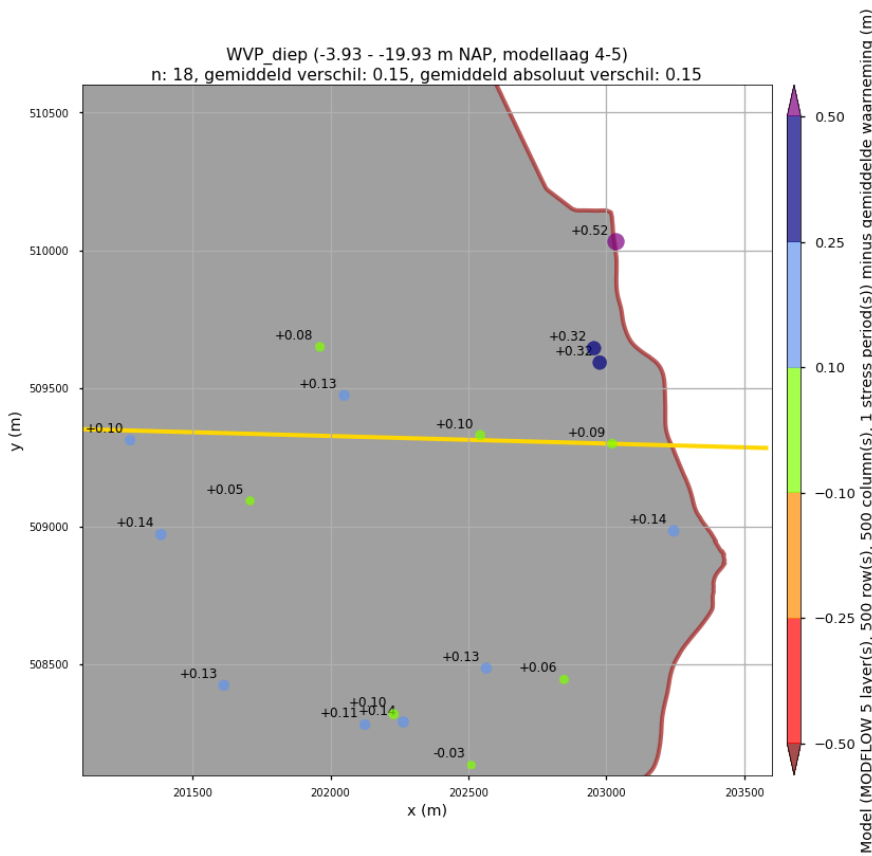
Inventarisatie boven- en ondergrens modelkalibratie

Bij een doorlatendheid van 0,1 meter per dag van de deklaag is het verschil tussen berekende en gemodelleerde waterstanden in het voorland en rond de dijk onacceptabel geworden. Dit is weergegeven in Figuur 71 en Figuur 72. Het achterland heeft een minimale reactie. Deze situatie wordt als onacceptabel beschouwd, omdat het voorland en de situatie rond de dijk de belangrijkste factor betreffen voor de bepaling van de weerstand van de deklaag. Een deklaagdoorlatendheid van 0,05 meter per dag geeft de bovengrens aan van acceptabele ranges tussen berekend en gemeten waterstanden. Deze waarde wordt gekozen als bovengrens voor de deklaagdoorlatendheid.

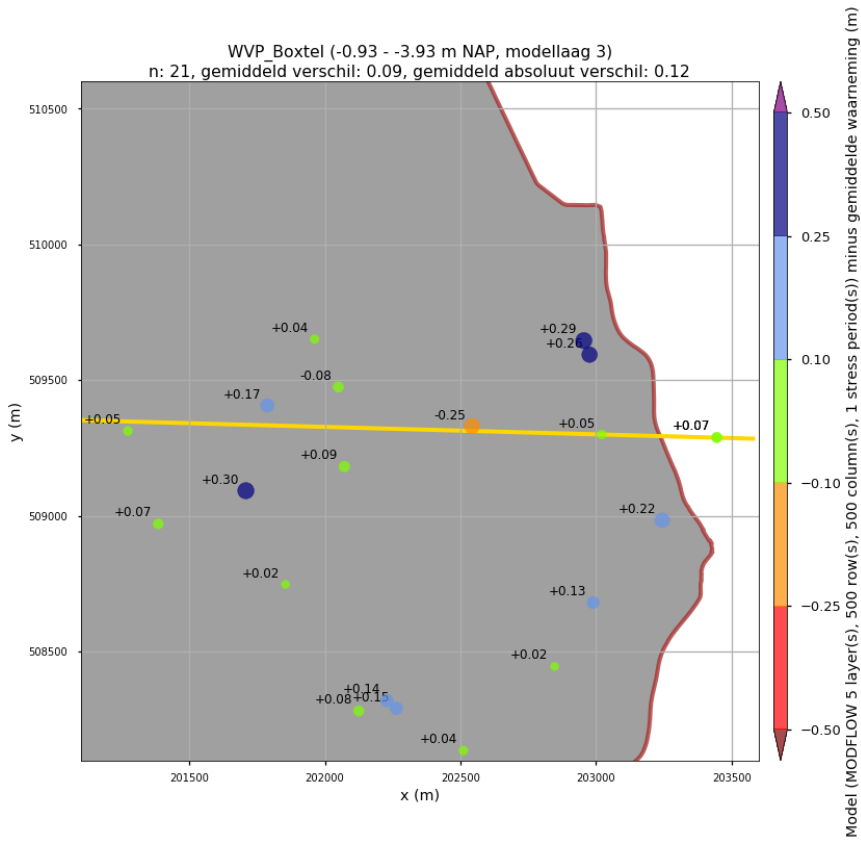
De resultaten voor de ondergrens van de kalibratie zijn gegeven in Figuur 73 en Figuur 74. In eerste instantie lijken de resultaten van een kalibratie met een deklaagdoorlatendheid van 0,001 meter per dag een verbeterd resultaat te geven ten opzichte van 0,01 meter per dag. Bij het analyseren van de resultaten wordt opgemerkt dat de absolute en gemiddelde verschillen over het totaal achteruitgaan. Voornamelijk de diepere laag in het watervoerend pakket krijgt een consequent extra vernatting. Daardoor wordt een succesvollere kalibratie gevonden bij 0,01 meter per dag. Een ondergrenswaarde die acceptabele resultaten geeft wordt gevonden bij een deklaagdoorlatendheid van 0,005 meter per dag.



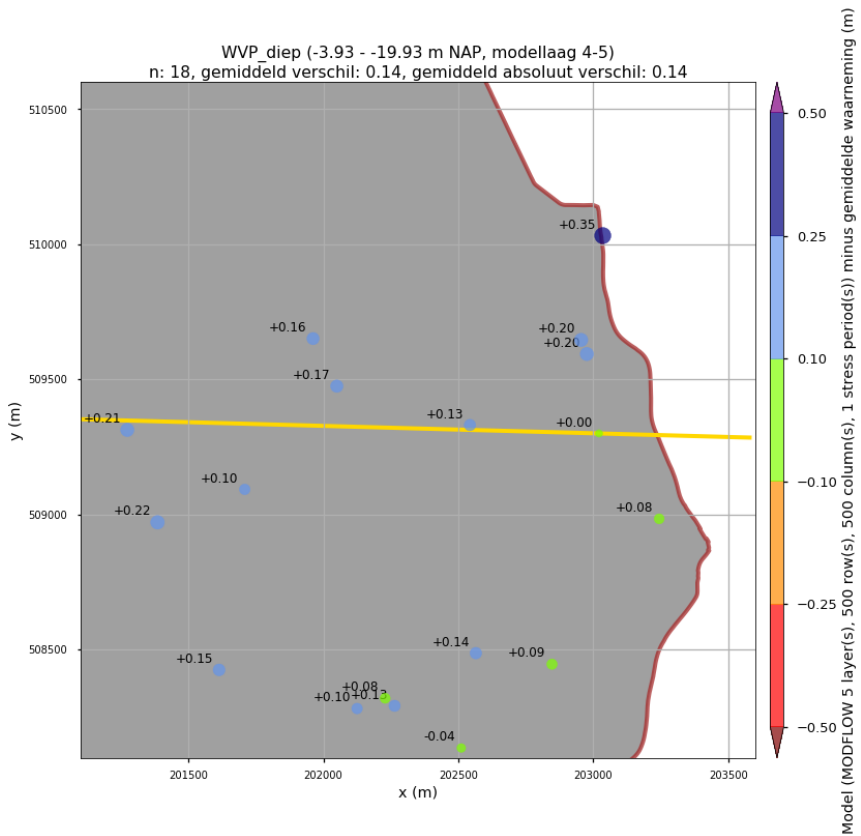
Figuur 71: Overzicht bollenkaart eerste laag watervoerend pakket bovengrens gekalibreerd model



Figuur 72: Overzicht bollenkaart tweede en derde laag watervoerend pakket bovengrens gekalibreerd model



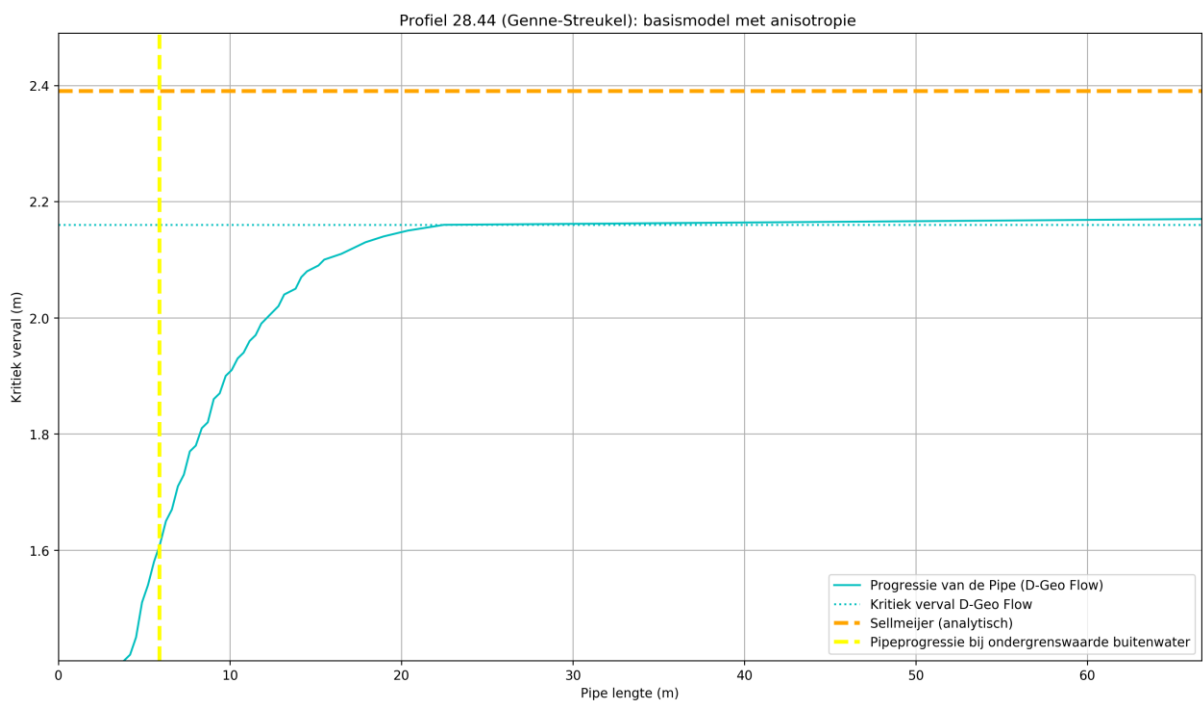
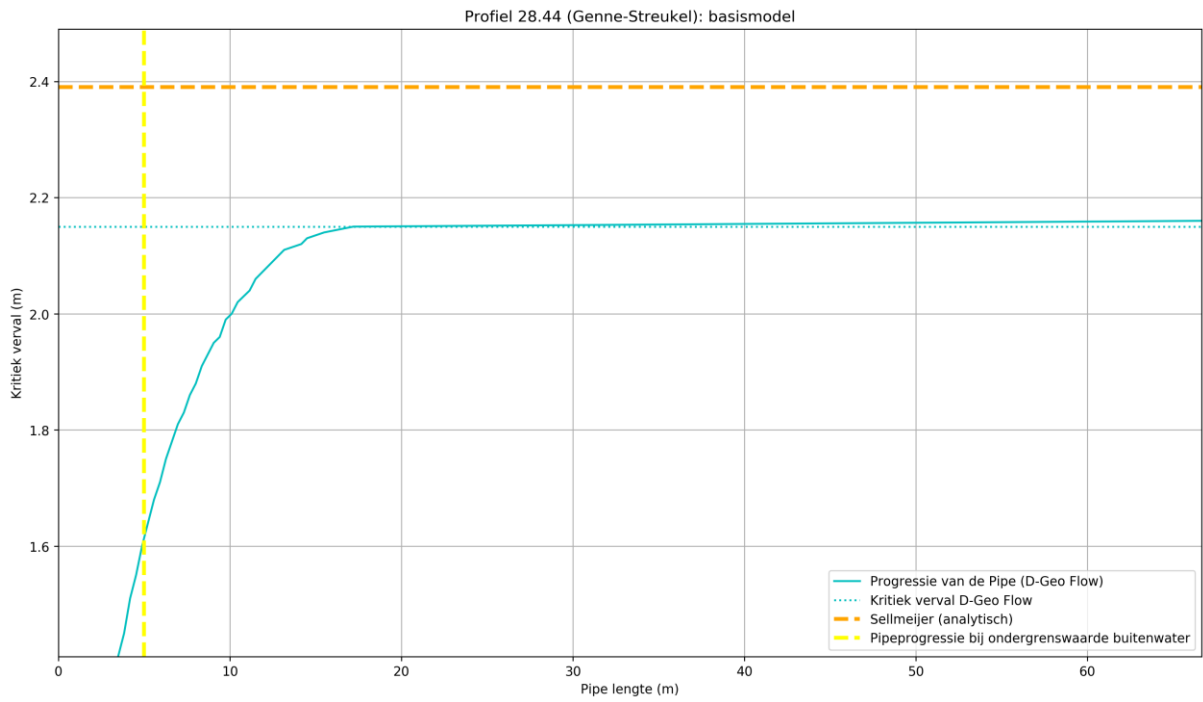
Figuur 73: Overzicht bollenkaart eerste laag watervoerend pakket ondergrens gekalibreerd model

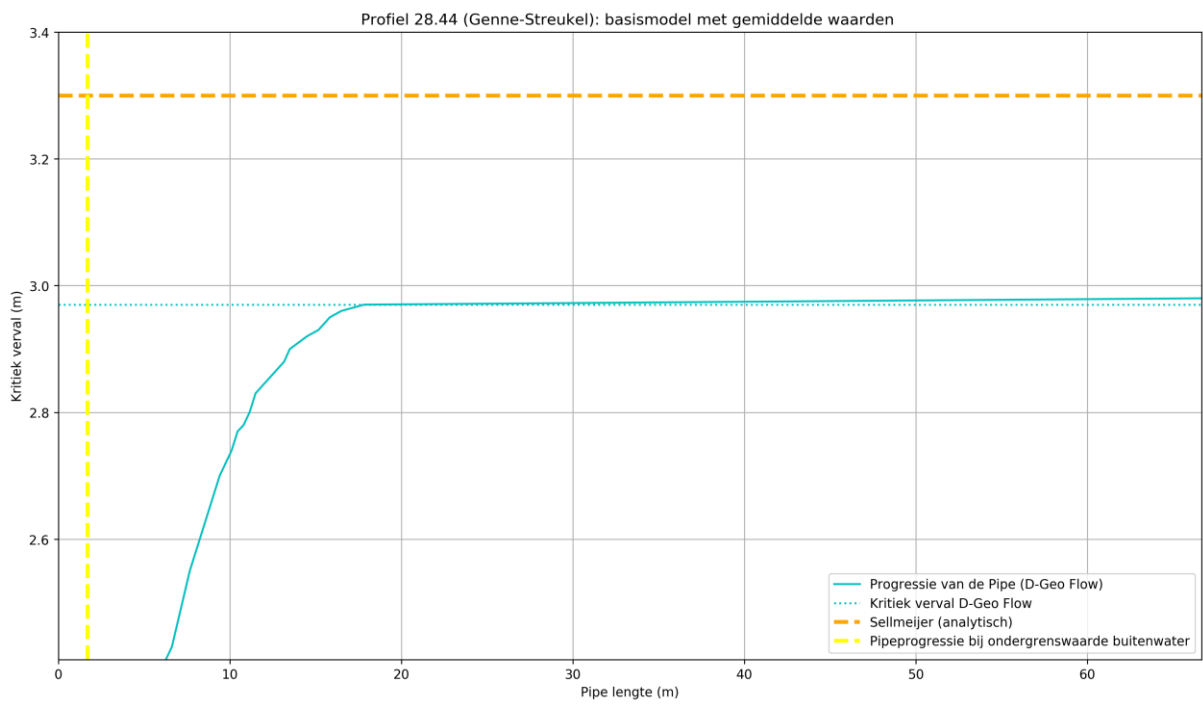
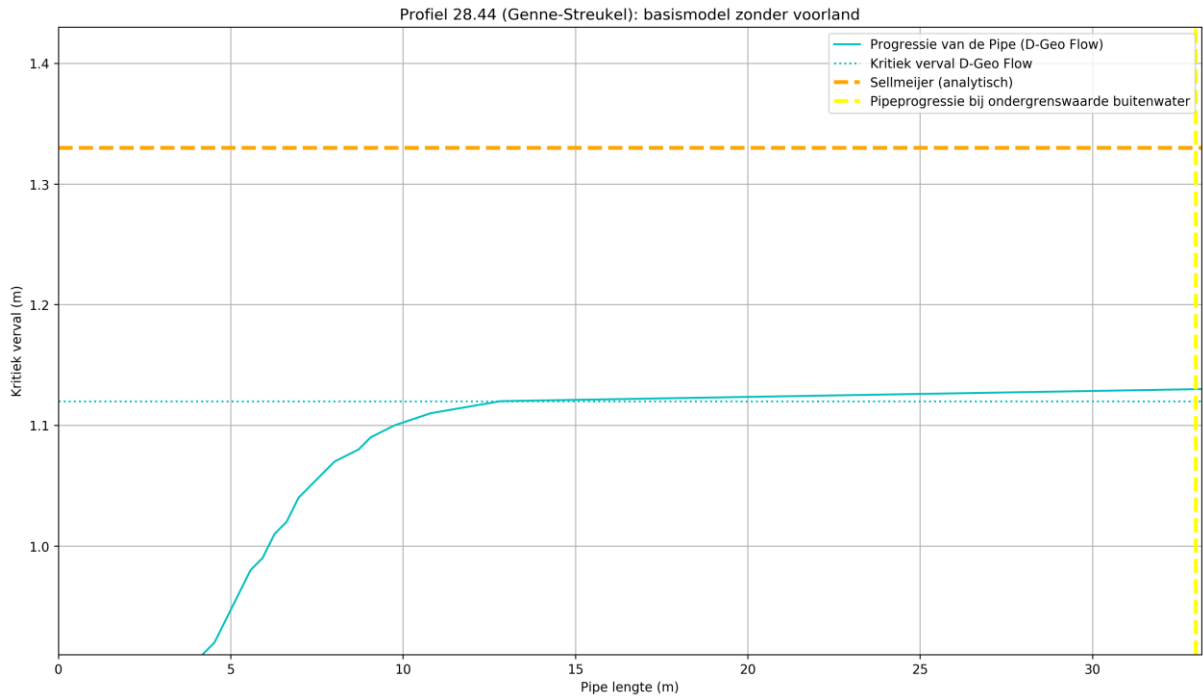


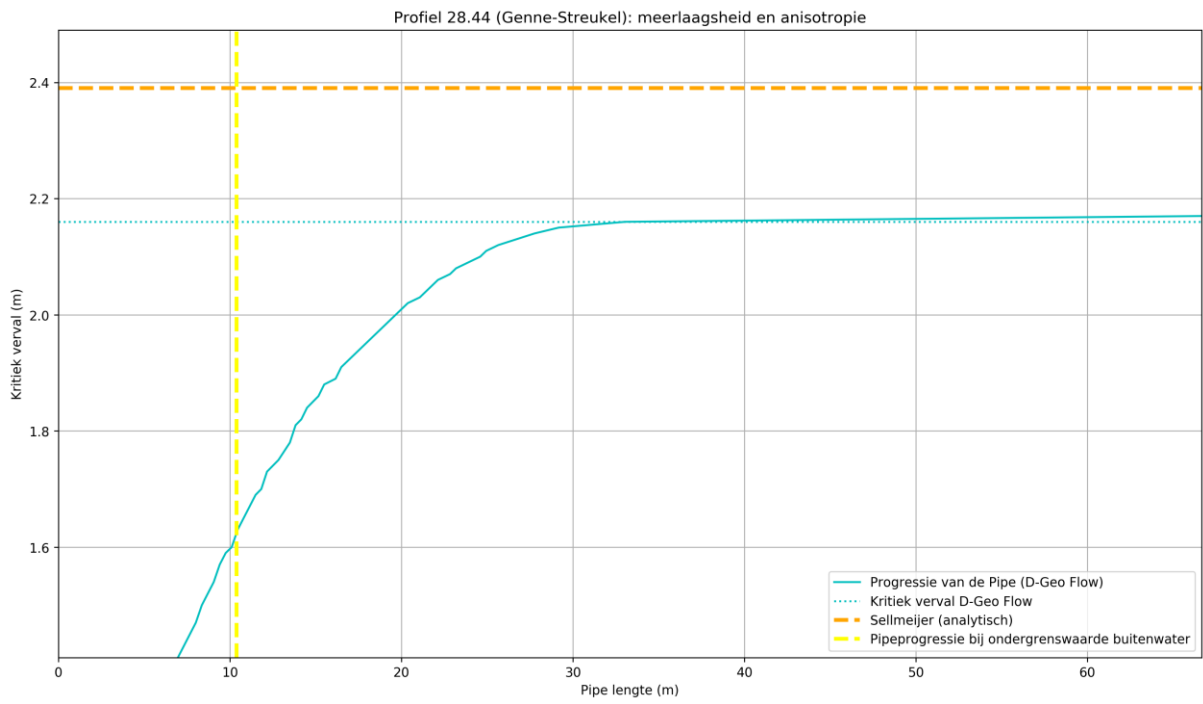
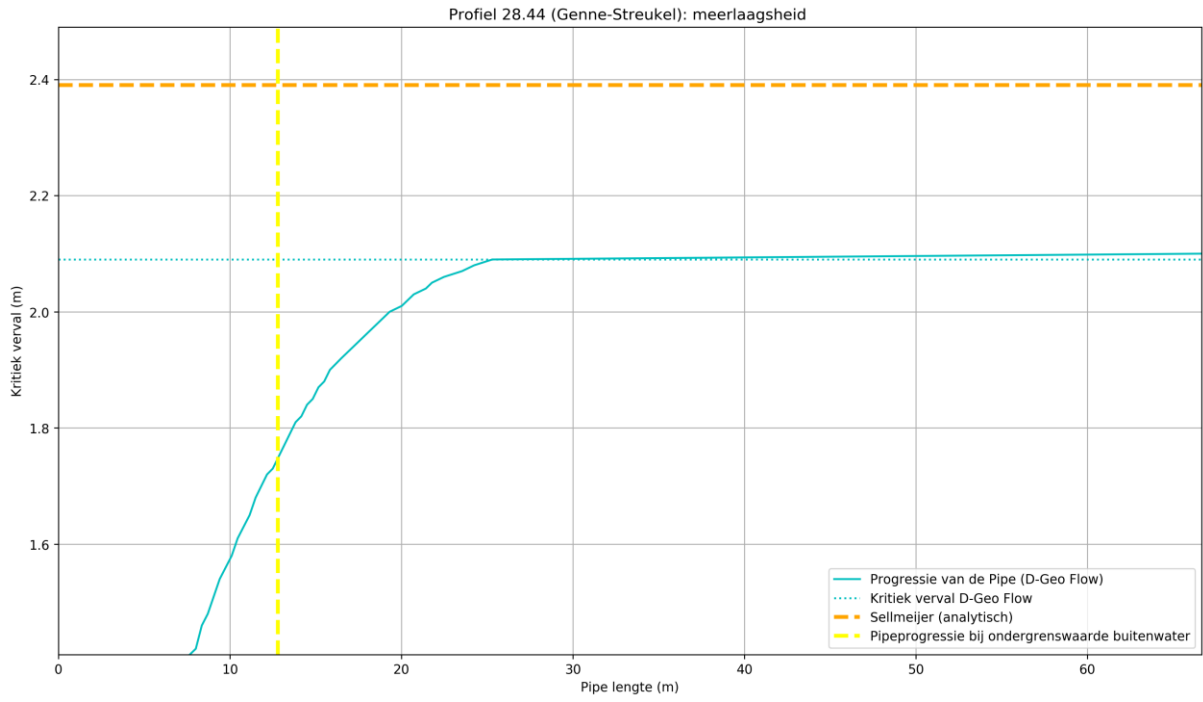
Figuur 74: Overzicht bollenkaart tweede en derde laag watervoerend pakket ondergrens gekalibreerd model

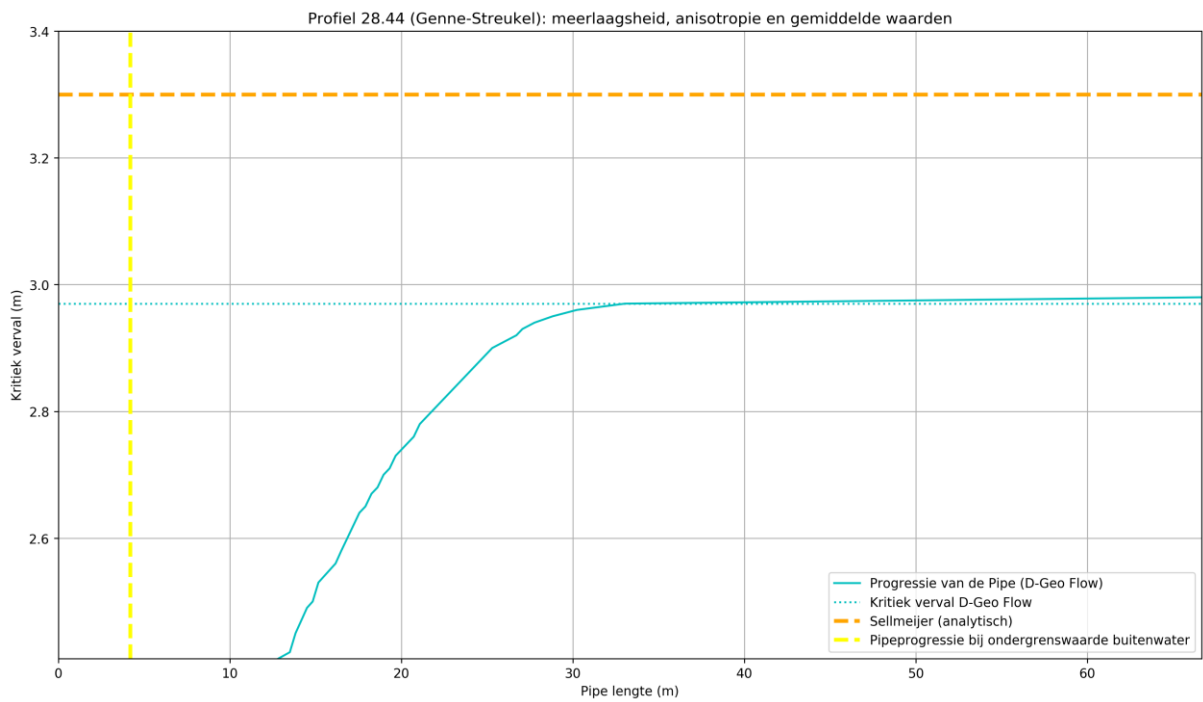
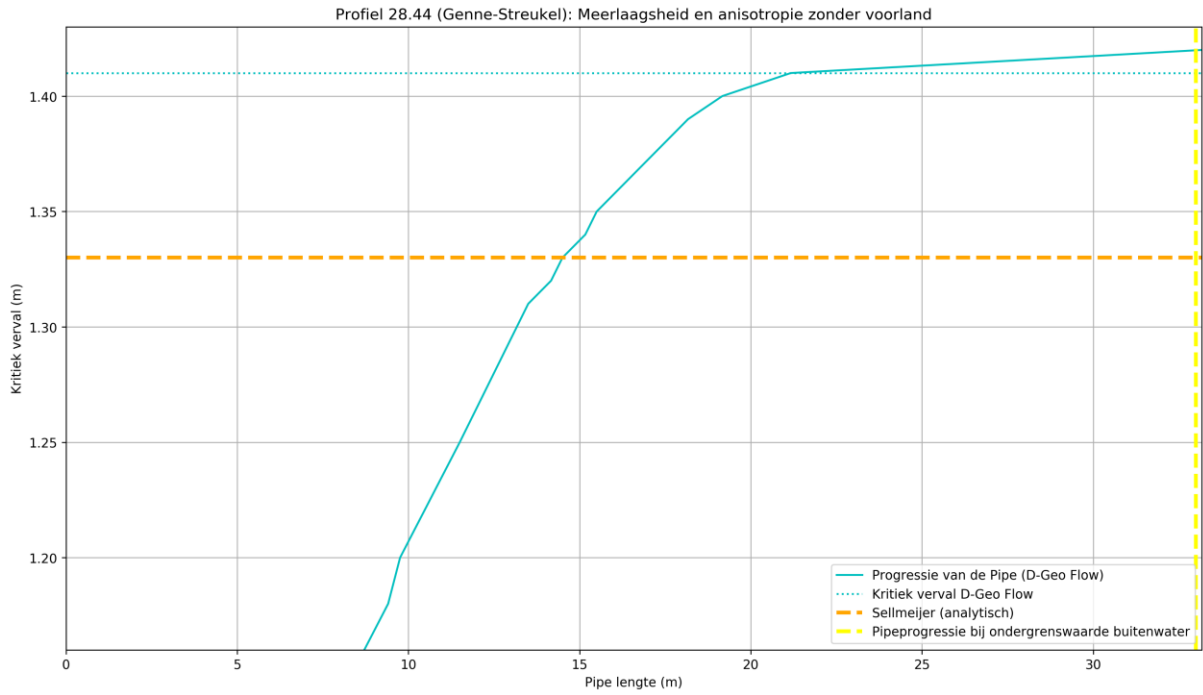
Bijlage 11 Resultaten D-Geo Flow berekeningen

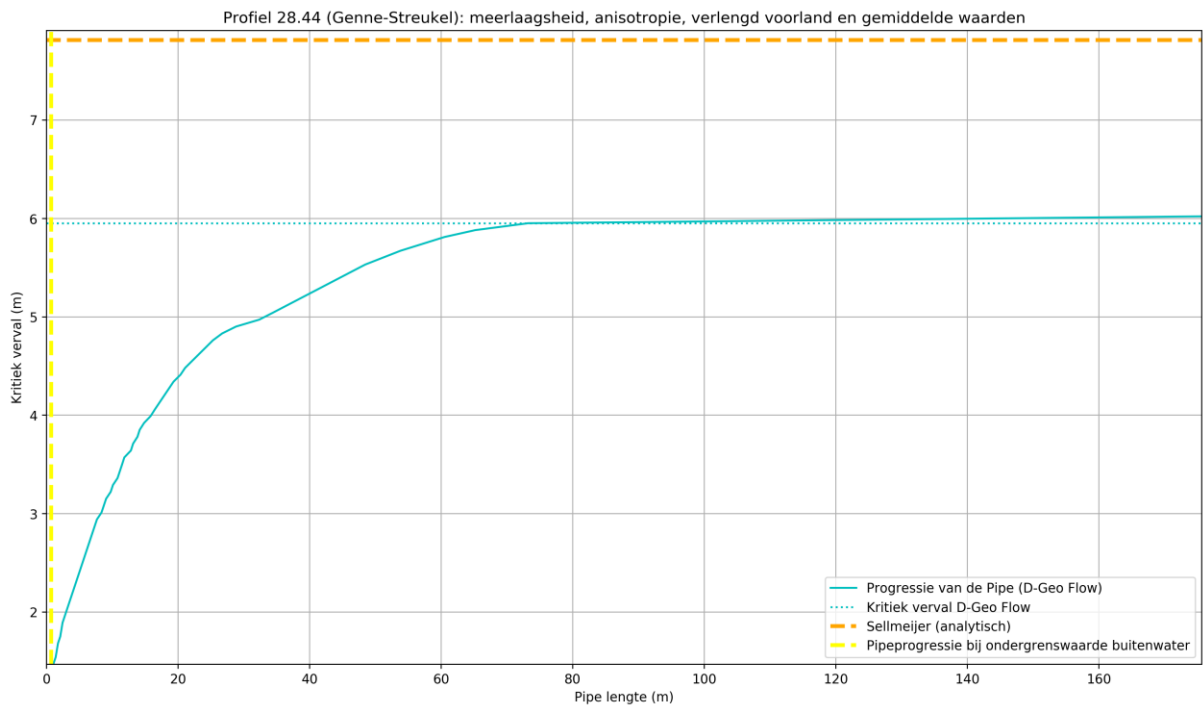
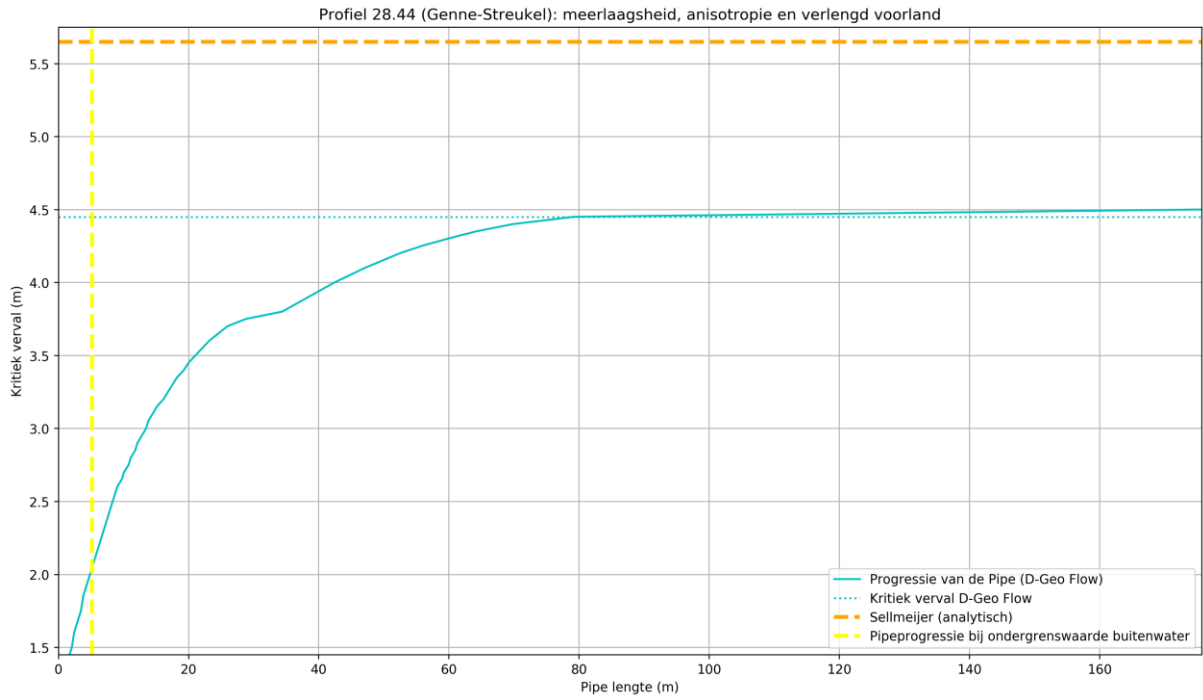
Profiel 28.44 (Genne-Streukel)



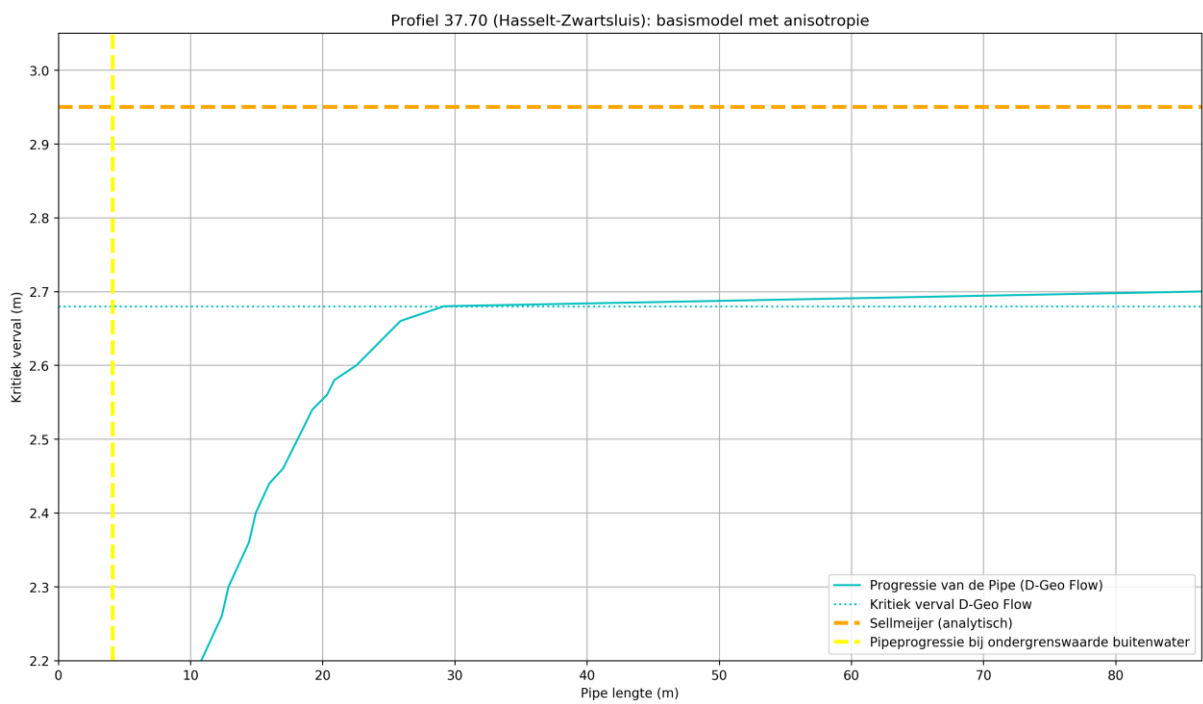
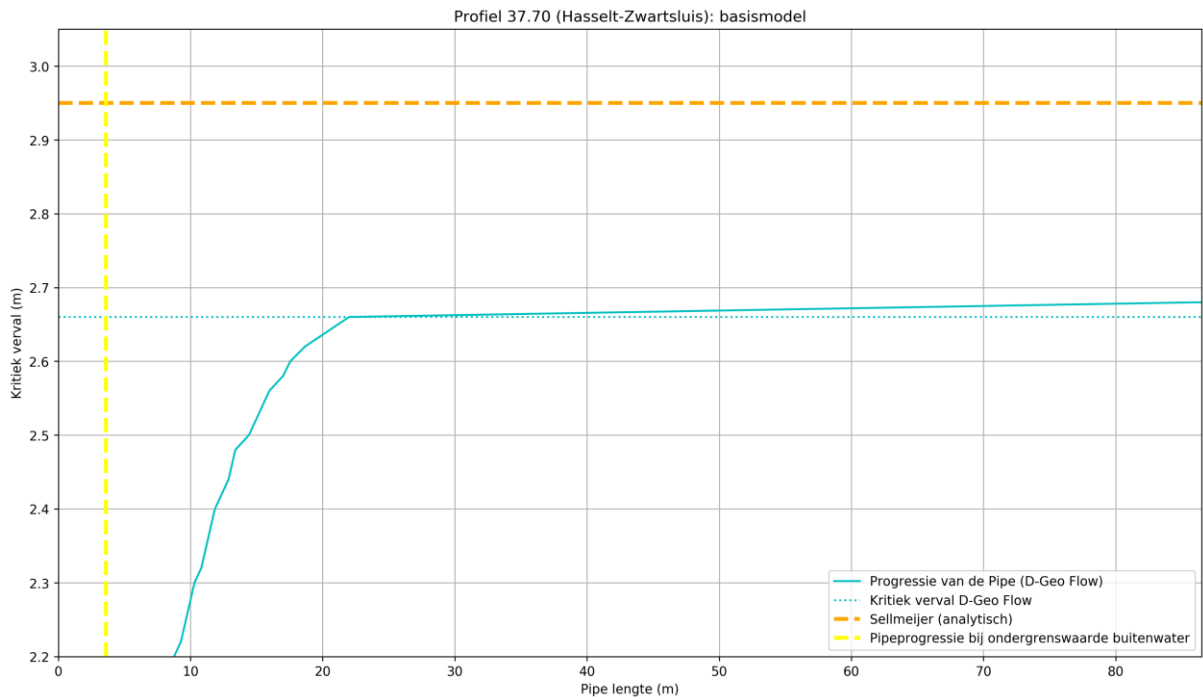


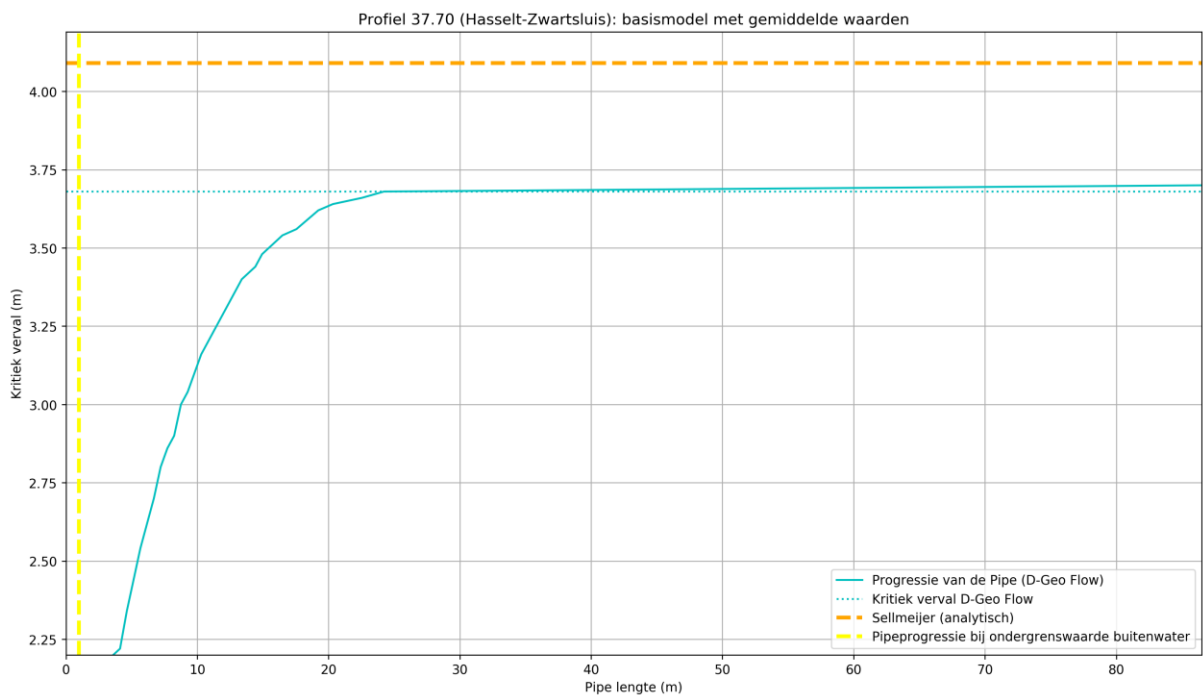
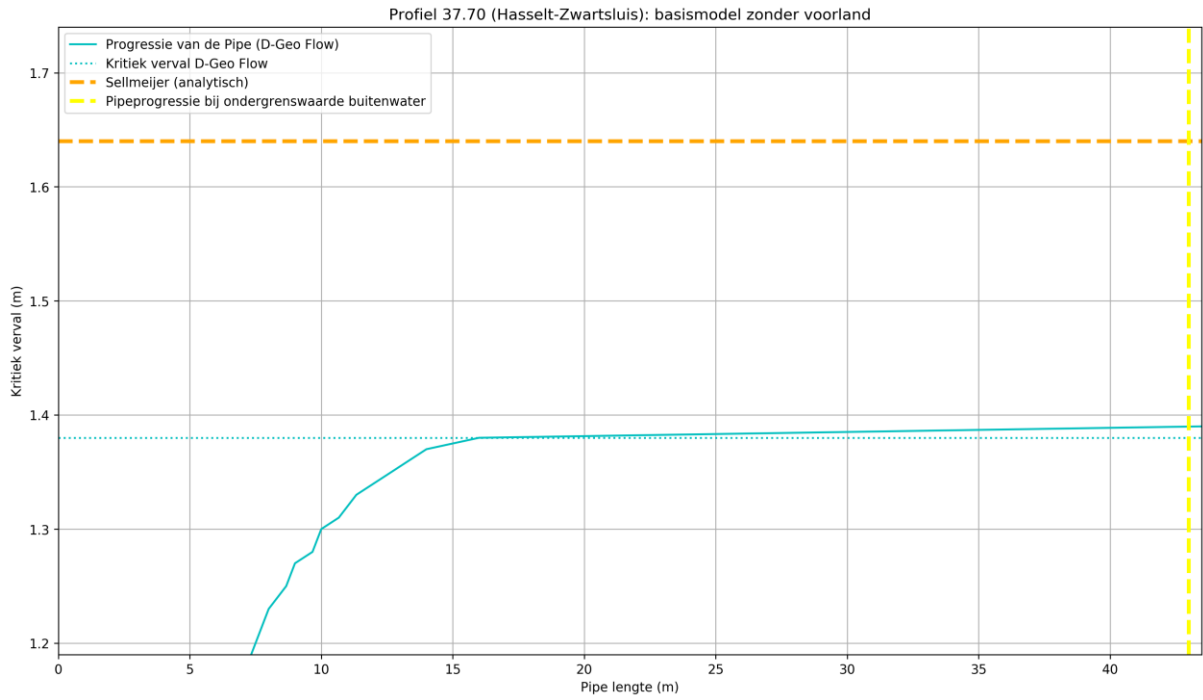


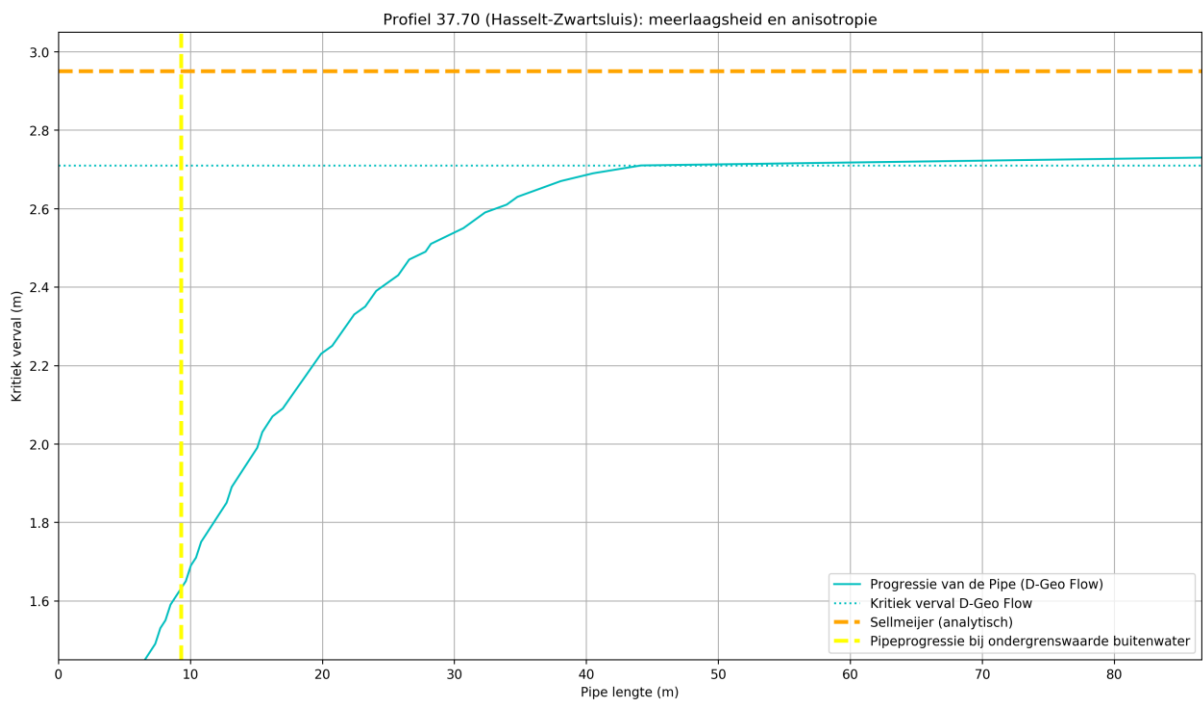
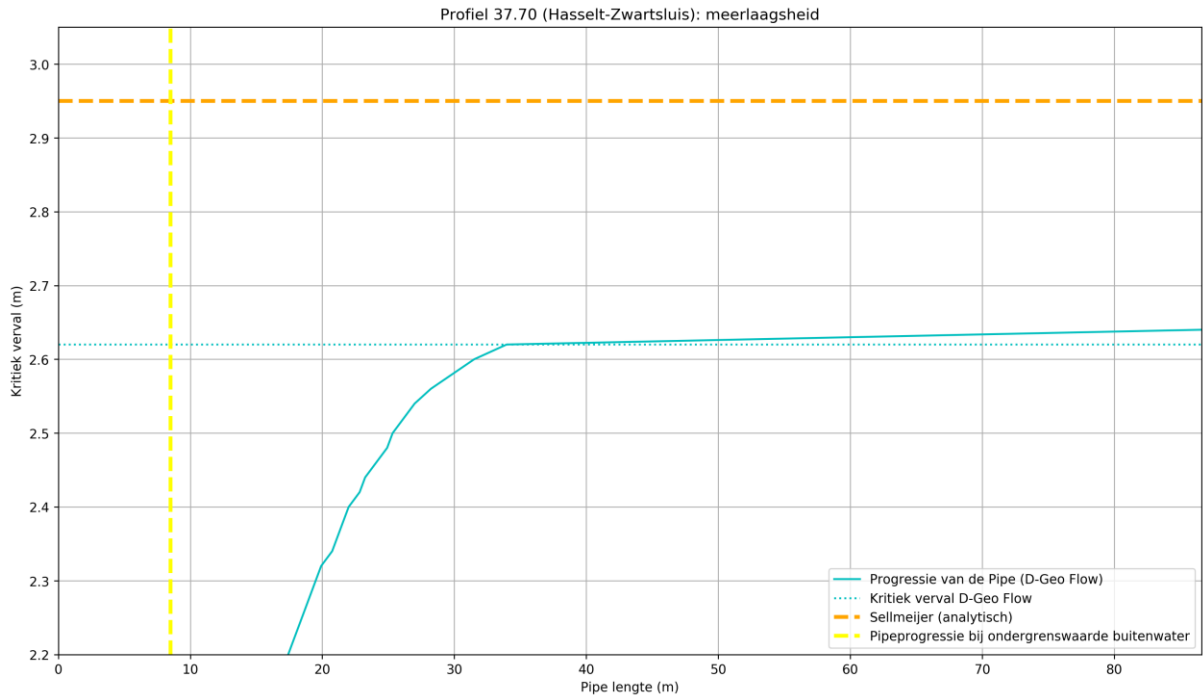


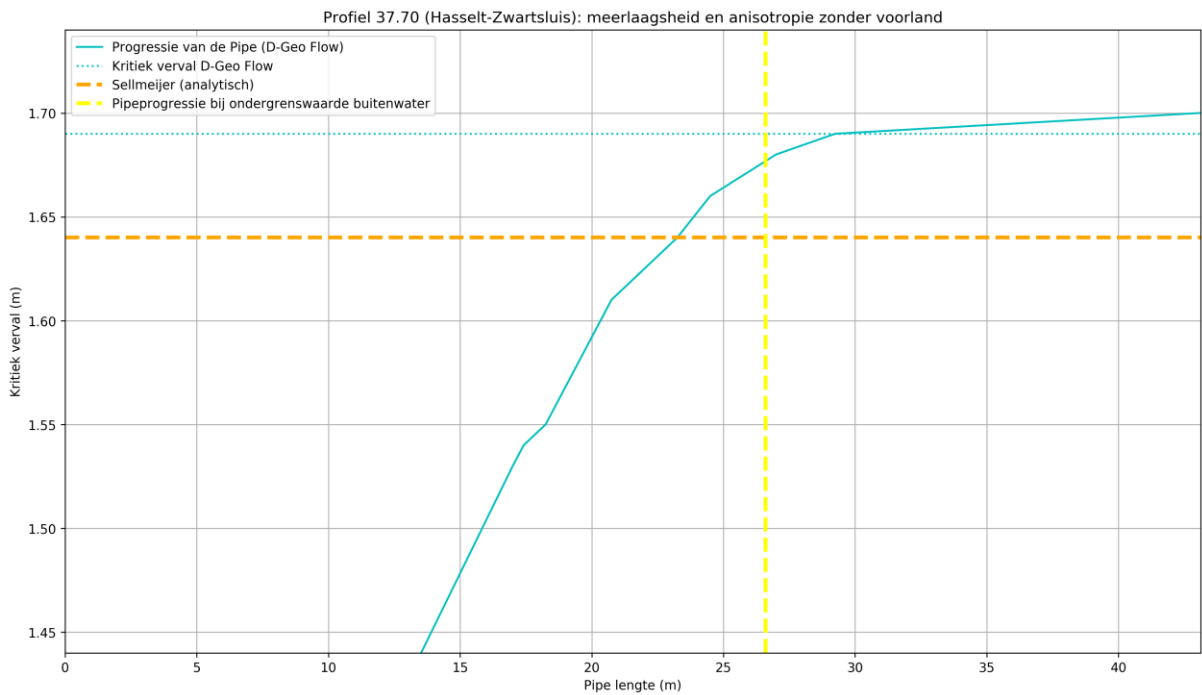
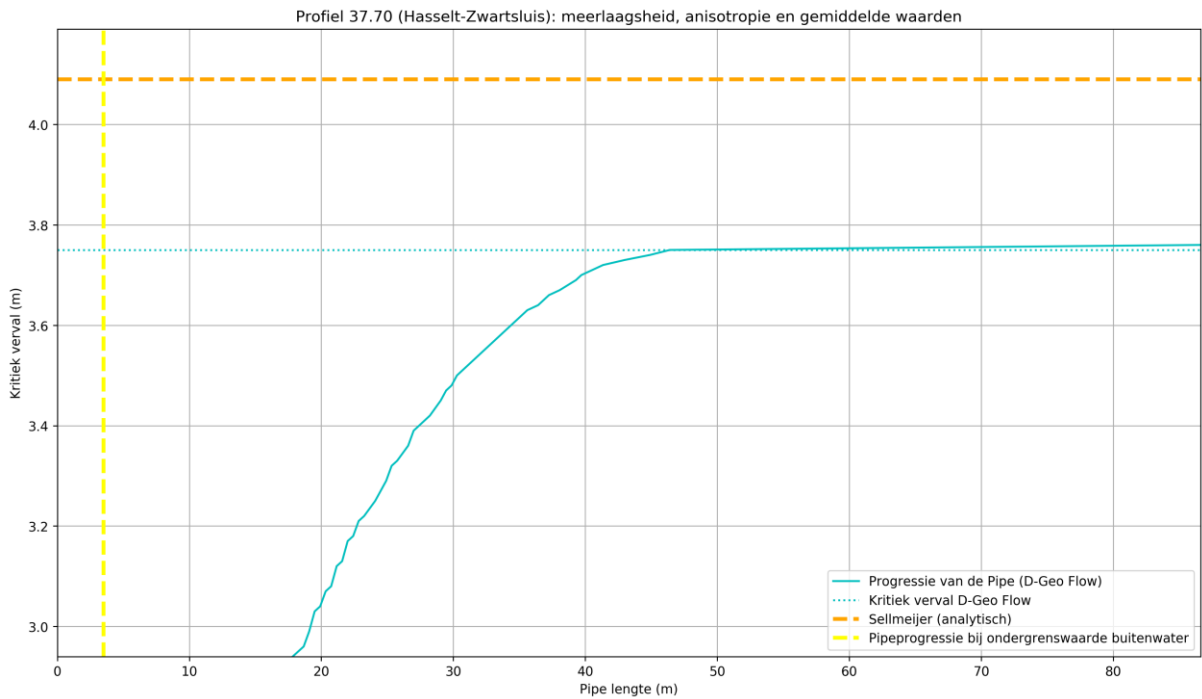


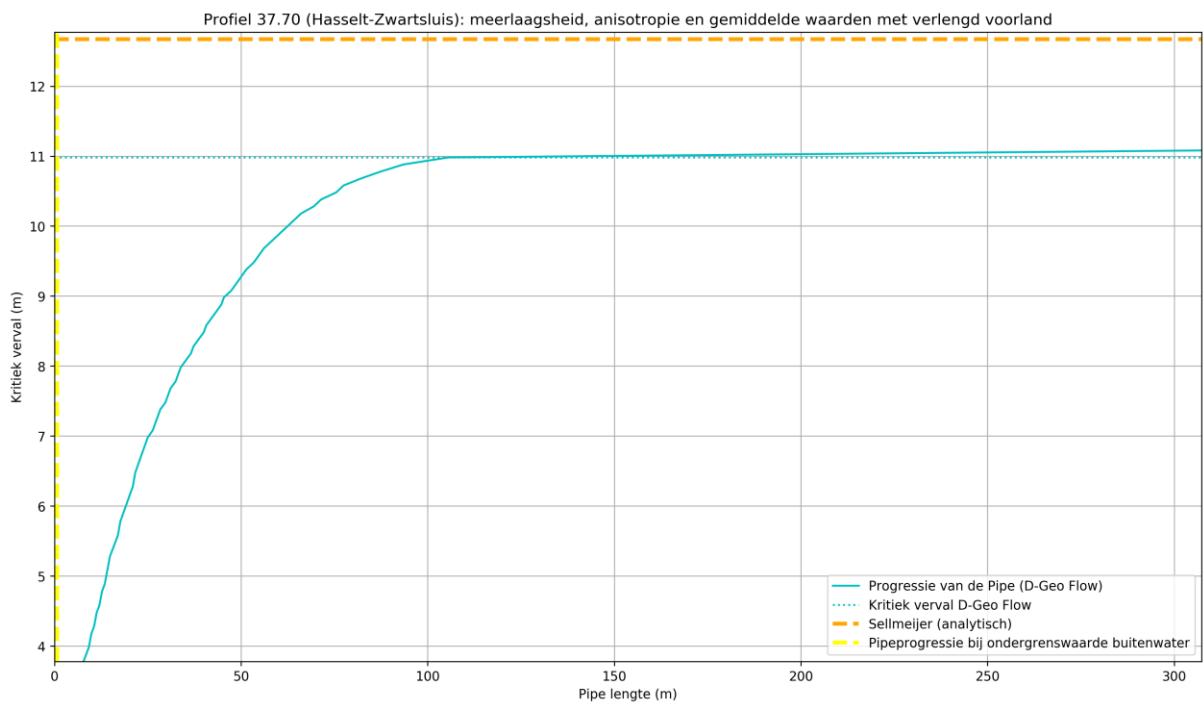
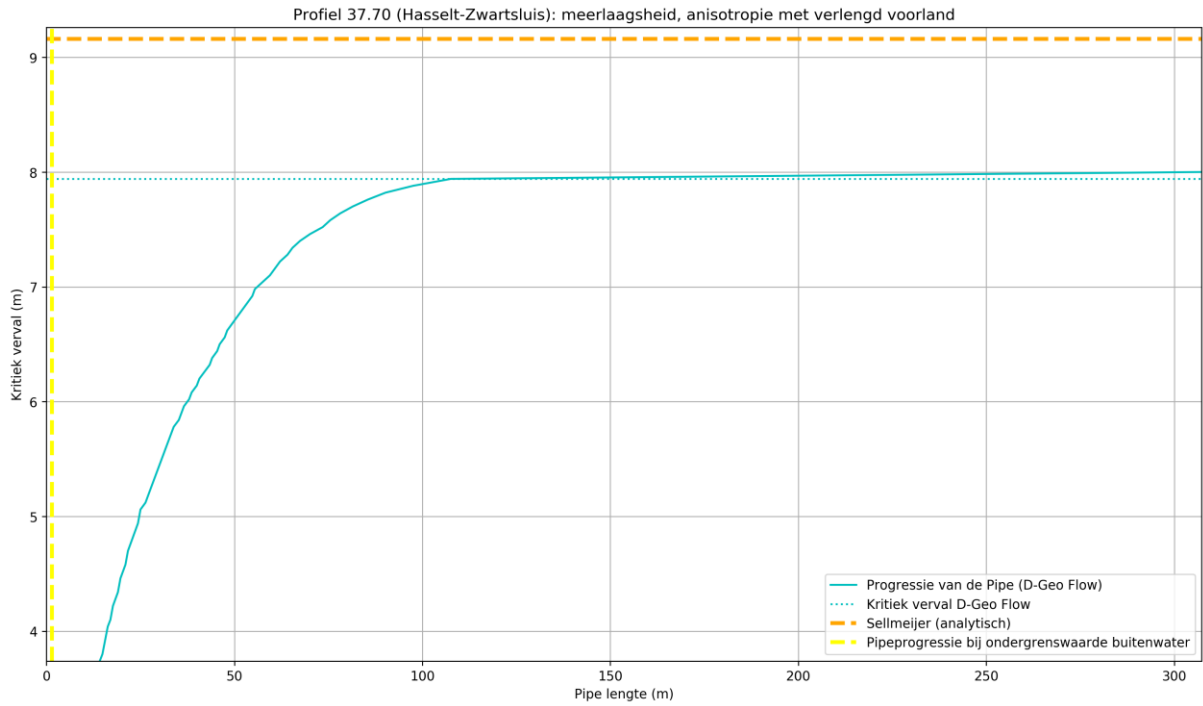
Profiel 37.70 (Hasselt-Zwartsluis)











Bijlage 12 Toelichting D-Geo Flow randvoorwaarde

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 38.

Tabel 38: Resultaten analyse rechter randvoorwaarde D-Geo Flow

Type boundary rechterzijde	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 38 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 (rechterrاند 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 aanzien van piping.

Er kan geconcludeerd worden dat een no flow boundary met een beperkte 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 aanzien van piping.

Bijlage 13 D-Geo Flow randvoorwaarde buitenwater

NOTITIE

Onderwerp D-Geo Flow randvoorwaarde buitenwaterstand
Project Gevoeligheidsanalyse inzichten uit de POV Piping
Opdrachtgever POV Piping
Projectcode 107997
Status Concept 01
Datum 28 februari 2019
Referentie 107997/19-003.338
Auteur(s) M.C. Asschert MSc

Gecontroleerd door ir. H.D.C. Meuwese
Goedgekeurd door ir. H.D.C. Meuwese
Paraaf 

Bijlage(n) I Resultaten berekeningen

Aan POV Piping A. Wiggers, H. Weijers
Kopie Lieveense B. van Zwol, B. de Groot

1 INLEIDING

In het project 'Gevoeligheidsanalyse inzichten uit de POV Piping' wordt voor het traject Genne-Streukel een lager kritiek verval van D-Geo Flow gevonden ten opzichte van de analytische Sellmeijer som. Dit heeft vragen opgeroepen over de schematisering van de randvoorwaarde voor de buitenwaterstand (submerging boundary) in D-Geo Flow.

Deze aanvullende notitie geeft een eerste verkenning naar het effect van de randvoorwaarde voor de buitenwaterstand op het berekende kritiek verval in D-Geo Flow. In deze notitie worden de effecten en keuzes van deze randvoorwaarde in een aantal D-Geo Flow sommen behandeld. Er wordt gebruik gemaakt van profiel P_09_28.44 in Genne-Streukel vanuit het project 'Gevoeligheidsanalyse inzichten uit de POV Piping' om de verschillende situaties door te rekenen.

Versie 28 februari 2019

Deze versie geeft een tussenstand van de uitgevoerde analyse rondom de randvoorwaarde van de buitenwaterstand. Er is nog een slag nodig om de gekozen scenario's geohydrologisch te duiden en de analyse in meer detail te kunnen weergeven. Deze aanvullende slag valt buiten de scope van het huidige onderzoek. Bij Witteveen+Bos wordt naar aanleiding van deze notitie verder onderzoek uitgevoerd.

2 ACHTERGROND

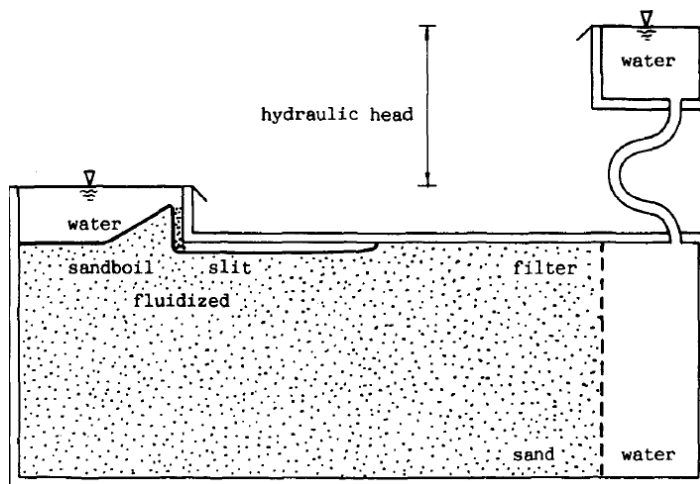
2.1 Handleiding D-Geo Flow

In de handleiding van Deltares wordt veelal getoond dat de randvoorwaarde van het buitenwater over de gehele diepte van het watervoerend pakket is opgelegd. Wanneer dit geohydrologisch benaderd wordt, kan gesteld worden dat dit een conservatieve benadering is wanneer de randvoorwaarde wordt opgelegd ter plaatse (lees: diepte) van de rivier zelf. In de praktijk rijkt de rivierbodem slechts tot een bepaalde diepte in het watervoerend pakket. Wanneer de randvoorwaarde wordt opgelegd bij de buitenteen of ter hoogte van het intredepunt in het voorland, dan is dit mogelijk een te conservatieve benadering. Dit is afhankelijk van de geometrie tussen dit punt en de rivier zelf.

2.2 Benadering randvoorwaarde Model Sellmeijer

Naast de effecten van de randvoorwaarde is het belangrijk om eerst een beeld te krijgen van de aanpak van Sellmeijer. In afbeelding 2.1 is de proefopstelling van Sellmeijer gegeven (Sellmeijer J. , 1988). De proefopstelling maakt gebruik van een ondoorlatende bak. Het doorlatende materiaal, welke het watervoerend pakket schematiseert, wordt dus afgesloten door een volledig ondoorlatende rand. Aan de linkerkant wordt een waterstand bovenop het doorlatende materiaal gezet. Dit schematiseert de head die in de praktijk in het achterland aanwezig is in de vorm van bijvoorbeeld een polder- of slootpeil. De rechterzijde bevat een head over de gehele diepte, omdat hier een waterkolom aanwezig is. Deze rechterzijde van de proefopstelling krijgt een grotere head als de linkerzijde van het model, waardoor een verval gecreëerd wordt. De rechterzijde schematiseert de buitenwaterstand in een praktijksituatie rondom de dijk. De eerste proefopstelling van Sellmeijer schematiseert deze buitenwaterstand dus over de gehele diepte van zijn pakket met doorlatend materiaal.

Afbeelding 2.1 Proefopstelling Sellmeijer (Sellmeijer, 1988)

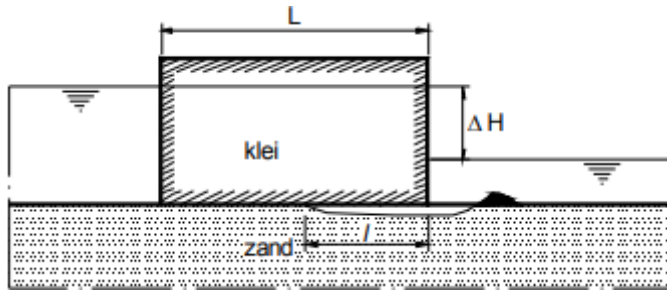


In veel recentere afbeeldingen is de schematisatie van de buitenrandvoorwaarde verkort tot de bovenzijde van het watervoerende pakket, zie bijvoorbeeld afbeelding 2.2. Mogelijk geeft deze dezelfde forcering van het watervoerende pakket als Sellmeijer (1988), omdat de randvoorwaarde over enige breedte wordt opgelegd in verhouding tot de diepte van de opstelling.

Een gebruik van deze randvoorwaarde is in de recentere proefopstellingen gebruikt voor het vernieuwen van de formule ten behoeve van het onderzoeksprogramma SBW Sterkte en Belastingen Waterkeringen (van

Beek, 2015). De nieuwe regel is geïntroduceerd door Sellmeijer in 2011 (Sellmeijer, de la Cruz, van Beek, & Knoeff, 2011). Deze herziene regel is de huidige standaard voor het ontwerpen van dijken op piping in Nederland.

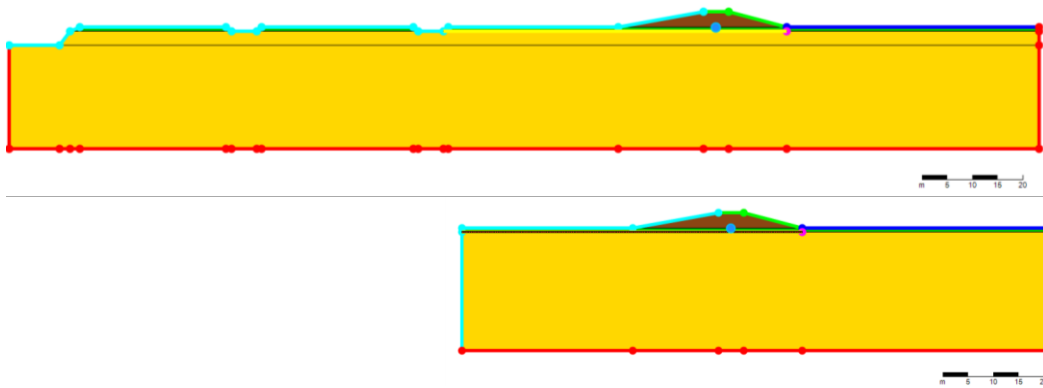
Afbeelding 2.2 Basisconfiguratie rekenmodel van Sellmeijer (Figuur 5.3 in Rijkswaterstaat 2012)



3 D-GEO FLOW SOMMEN

In D-Geo Flow wordt de grondwaterstroming onder de dijk geschematiseerd. Veelal ligt daarbij de linker modelgrens op het intredepunt. Links van dit punt wordt niks geschematiseerd. De randvoorwaarde wordt veelal geschematiseerd via een randvoorwaarde over de gehele diepte van het model, met een niveau gelijk aan de buitenwaterstand. Vergelijk in afbeelding 3.1 hiervoor de varianten 0 (onder) en 7 (boven). Is het correct om in variant 0 de buitenwaterstand op deze manier te schematiseren, als hij in werkelijkheid door een situatie zoals in variant 7 tot stand komt?

Afbeelding 3.1 Doorsnede varianten 7 (boven) en 0 (onder)



In tabel 3.1 is een beknopte toelichting van de aanpassingen in de sommen ten opzichte van de uitgangssituatie gegeven.

Tabel 3.1 Toelichting variaties D-Geo Flow sommen

Variant	Toelichting
0 uitgangssituatie	het standaard profiel P_09_28.44 uit de proefvoetsing van Genne-Streukel. Submerging boundary over de gehele linkerzijde. Deklaag bevat een doorlatendheid van 0,1 m per dag
1 randvoorwaarde tot bodemhoogte rivier	ten opzichte van de uitgangssituatie wordt de submerging boundary op de bodemdiepte van de rivier gezet (NAP -3,5 m)

Variant	Toelichting
2 randvoorwaarde tot halve verticale lengte WVP	ten opzichte van de uitgangssituatie wordt de submerging boundary tot de helft van het watervoerend pakket gezet van de rivier gezet (NAP -12 m)
3 volledige deklaag ondoorlatend	ten opzichte van de uitgangssituatie wordt de doorlatendheid van de deklaag van 0,01 m/d naar 0,0001 m/d gezet
4 deklaag in het voorland ondoorlatend	ten opzichte van de uitgangssituatie wordt de doorlatendheid van de deklaag in het voorland van 0,01 m/d naar 0,0001 m/d gezet
5 deklaag in het voorland ondoorlatend & Randvoorwaarde tot de bodemhoogte van de rivier	combinatie van variant 1 en 4
6 deklaag in het voorland ondoorlatend & Randvoorwaarde tot de halve verticale lengte van het WVP	combinatie van variant 2 en 4
7 randvoorwaarde tot bodemhoogte van de rivier & Verlengd voorland met 2 insnijdingen van de deklaag	het voorland wordt verlengd met circa 70 m, waarbij 2 aparte insnijdingen van 5 m breedte tot in het watervoerend pakket zijn gemaakt
8 randvoorwaarde tot bodemhoogte van de rivier & Verlengd voorland. Deklaag voorland voor kwelweglengte vervangen door karakteristieke zand WVP	betreft variant 7, waarbij boven de kwelweglengte de kleiige deklaag behouden wordt. In het voorland is deze kleiige deklaag naast de insnijdingen vervangen door zand met karakteristieke van het watervoerend pakket
9 doorlatendheid WVP van 84,8 (uitgangssituatie) naar 200 m per dag	het effect van een grote doorlatendheid van het WVP is getest ten opzicht van de uitgangssituatie

In tabel 3.2 is een overzicht weergegeven van de resultaten van alle varianten, namelijk:

- het berekende kritieke verval;
- het verschil ten opzichte van variant 0;
- het verschil ten opzichte de analytische som van Sellmeijer. Deze geeft een kritiek verval van 2,39 m. Hierbij is in de analytische som een voorlandlengte aangehouden die gelijk staat aan de kwelweglengte van de pipe onder het voorland in D-Geo Flow. Voor dit profiel is dat 19,5 m aan voorlandlengte.

Tabel 3.2 Overzicht resultaten

Variant	Kritiek verval	Verskil ten opzichte van uitgangssituatie	T.o.v. analytische Sellmeijer som
0 uitgangssituatie	2,15 m	n.v.t.	-0,24 m
1 rivier randvoorwaarde tot -3,5m NAP	2,83 m	+0,68 m	+0,44 m
2 rivier randvoorwaarde tot halverwege linker zijde (NAP -12 m)	2,31 m	+0,16 m	-0,08 m
3 complete deklaag K-waarde circa ondoorlatend	2,18 m	+0,03 m	-0,21 m
4 voorland deklaag K-waarde circa ondoorlatend	2,21 m	+0,06 m	-0,18 m
5 deklaag voorland ondoorlatend & rivier randvoorwaarde tot - NAP +3,5 m	3,01 m	+0,86 m	+0,62 m
6 deklaag voorland ondoorlatend & rivier randvoorwaarde tot halverwege (NAP -12 m)	2,39 m	+0,24 m	+0,00 m
7 randvoorwaarde tot rivierdiepte + verlengd voorland met twee gaten (breedte 5 m)	2,53 m	+0,38 m	+0,14 m
8 randvoorwaarde tot rivierdiepte + verlengd voorland met twee gaten (breedte 5 m). Verlengd voorland deklaag zand WVP.	2,48 m	+0,33 m	+0,09 m
9 doorlatendheid WVP van 84,8 m/d naar 200 m/d	1,64 m	-0,51 m	-0,75 m

4 CONCLUSIE

In veel recentere afbeeldingen van de rekenregel van Sellmeijer is de schematisatie van de buitenrandvoorwaarde verkort tot de bovenzijde van het watervoerende pakket in vergelijking tot de oude rekenregel van Sellmeijer (1988). Mogelijk geeft deze dezelfde forcering van het watervoerende pakket als Sellmeijer (1988), omdat de randvoorwaarde over enige breedte wordt opgelegd in verhouding tot de diepte van de opstelling.

Uit het onderzoek naar de randvoorwaarde voor de buitenwaterstand kan geconcludeerd worden, dat deze schematisatie een belangrijke keuze is bij het berekenen van het kritieke verval. Een bepaalde keuze voor de locatie van de submerging boundary om de buitenwaterstand mee te modelleren kan enkele tientallen centimeters in het kritieke verval schelen. Vergelijk variant 7 en 8 met 0. Door een - op het oog - realistischere schematisatie ontstaat in variant 7 en 8 een extra kritiek verval van respectievelijk 0,38 en 0,33 m.

Naast de randvoorwaarde is geprobeerd de proefopstelling van Sellmeijer (1988) beter te benaderen door middel van het ondoorlatender maken van de deklaag in het model. Een zo laag mogelijke inputwaarde is ingevuld in D-Geo Flow en geeft een verhoging van circa 5 cm in het kritiek verval. Het overgebleven verschil is zodanig klein, dat deze deels toegewezen kunnen worden aan de numerieke werking in het model.

Ten behoeve van de vergelijking tussen D-Geo Flow en Sellmeijer (1988) komt qua uitgangspunten variant 3 van D-Geo Flow het beste overeen om een correcte vergelijking in het kritieke verval te doen. Er is een randvoorwaarde over de gehele diepte van het watervoerend pakket aanwezig, zoals in de proefopstelling. Daarnaast is de deklaag zo ondoorlatend mogelijk, wat vergelijkt aan de ondoorlatende rand van de bak. Sellmeijer berekent toch een circa 20 cm hoger kritiek verval. Er is nog geen officiële verklaring voor dit verschijnsel. Gedurende het onderzoek en opstellen van de notitie is een issue rond de Heave Boundary Condition naar voren gekomen. Omtrent dit issue is nog geen uitsluitel. De mogelijkheid bestaat dat het verschijnsel te verklaren is aan de hand van dit issue.

Binnen Witteveen+Bos wordt naar aanleiding van de conclusies uit deze notitie verder onderzoek uitgevoerd.

5 BIBLIOGRAFIE

Rijkswaterstaat, 2012, Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen.

Sellmeijer, H., de la Cruz, J., van Beek, V., & Knoeff, H. (2011). Fine-tuning of the backward erosion pipingmodel through small-scale, medium-scale and dike experiments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(8), 1139-1154.

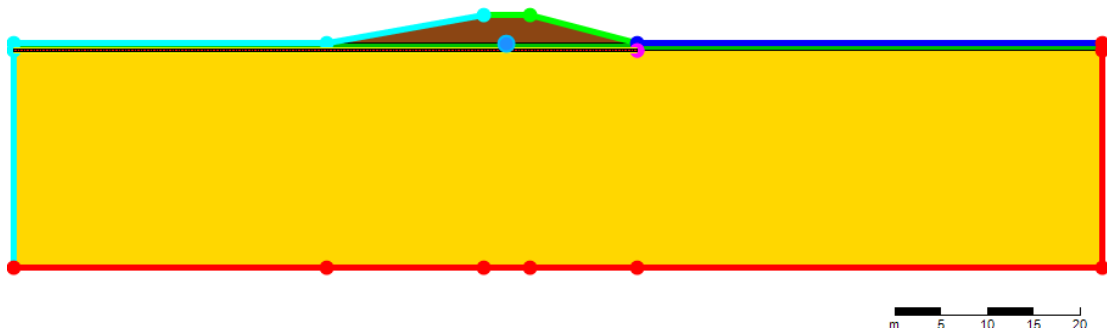
Sellmeijer, J. (1988). *On the mechanism of piping under impervious structures*. Delft: TU Delft.

van Beek, V. (2015). *Backward erosion piping: initiation and progression*. 2015: Deltares.

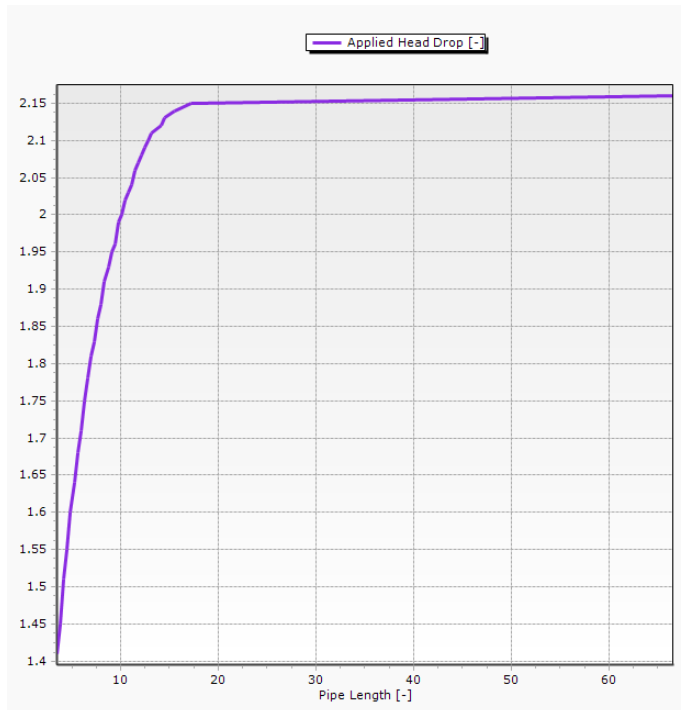
BIJLAGE: RESULTATEN BEREKENINGEN

Uitgangssituatie

Afbeelding I.1 Doorsnede D-Geo Flow model voor de uitgangssituatie



Afbeelding I.2 Vervalcurve variant 0

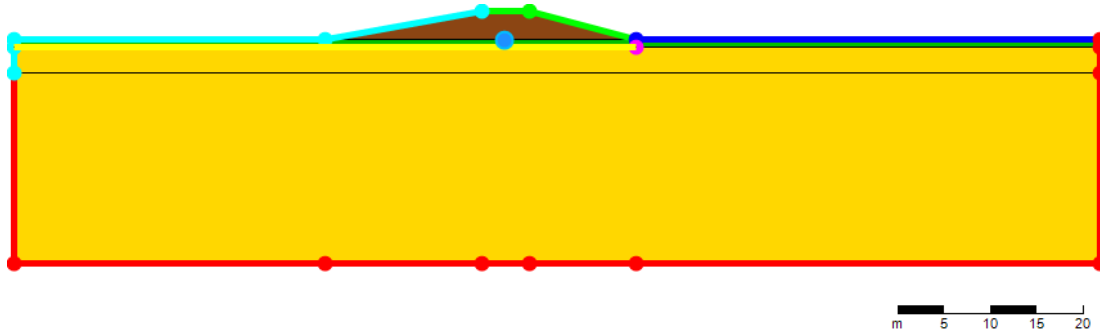


Een kritiek verval 2,15 m wordt gevonden.

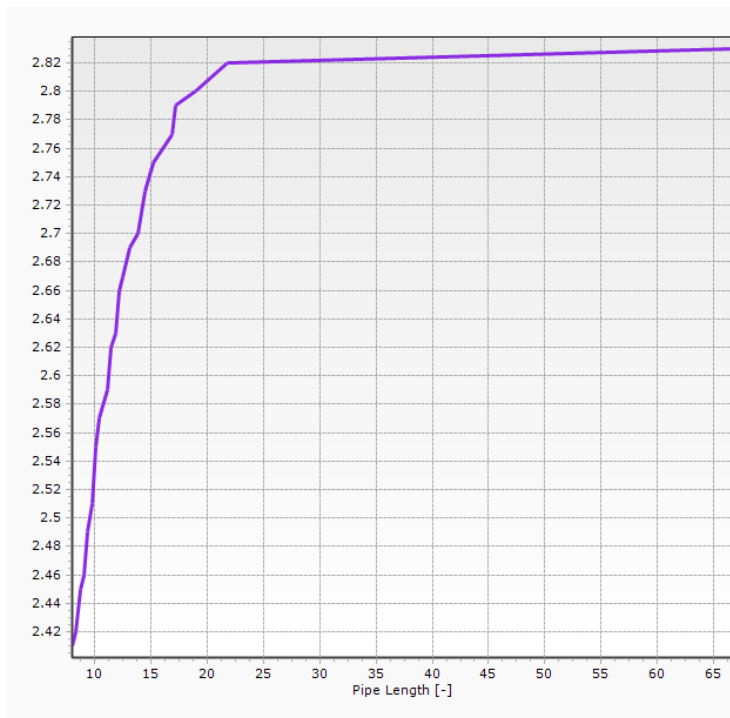
Randvoorwaarde tot bodemhoogte rivier

Deze variant betreft een extreme situatie aangezien in de praktijk een groter stuk voorland tot de rivierbodem aanwezig is. Met de lichtblauwe lijnen aan de linkerkzijde van de modeldoorsnede in afbeelding I.3 kan de aanpassing ten opzichte van de uitgangssituatie van afbeelding I.1 waargenomen worden.

Afbeelding I.3 Doorsnede D-Geo Flow model voor variant 1



Afbeelding I.4 Vervalcurve variant 1

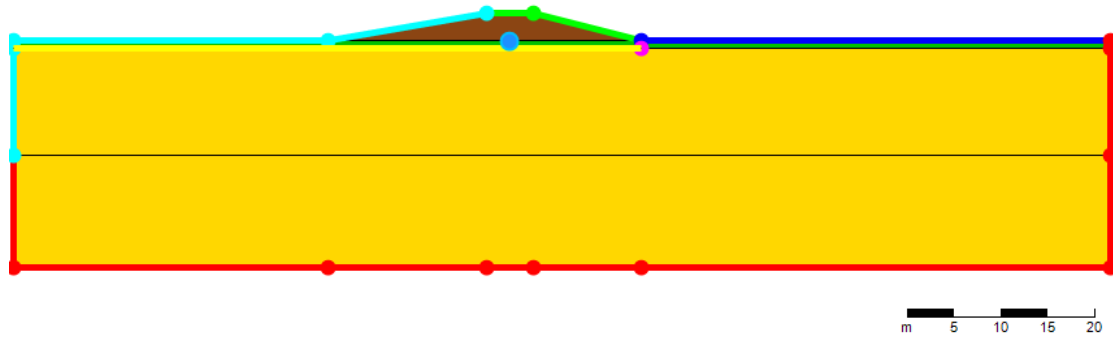


Een kritiek verval 2,82 m wordt gevonden.

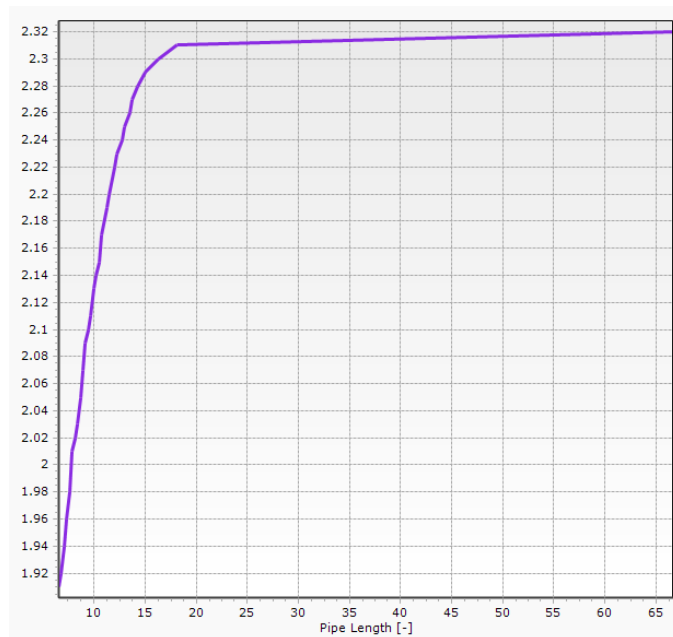
Randvoorwaarde tot halve verticale lengte WVP

Met de lichtblauwe lijnen aan de linkerkzijde van de modeldoorsnede in afbeelding I.5 kan de aanpassing ten opzichte van de uitgangssituatie van afbeelding I.1 waargenomen worden.

Afbeelding I.5 Doorsnede D-Geo Flow model voor variant 2



Afbeelding I.6 Vervalcurve variant 2

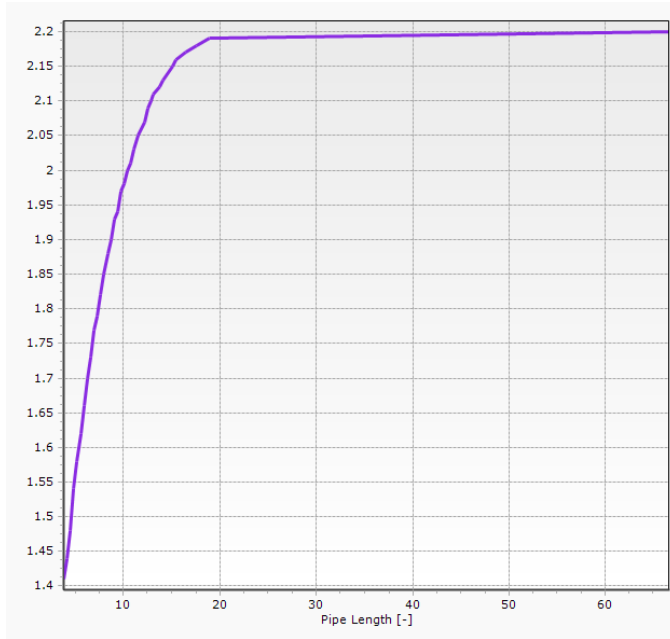


Een kritiek verval 2,31 m wordt gevonden.

Volledige deklaag ondoorlatend

Zowel voor- als achterland hebben een deklaag met een extreem lage doorlatendheid gekregen om het principe van Sellmeijer te benaderen. De complete linkerrand heeft als randvoorwaarde de rivier toegekend gekregen. De doorsnede is vergelijkbaar met afbeelding I.1.

Afbeelding I.7 Vervalcurve variant 3

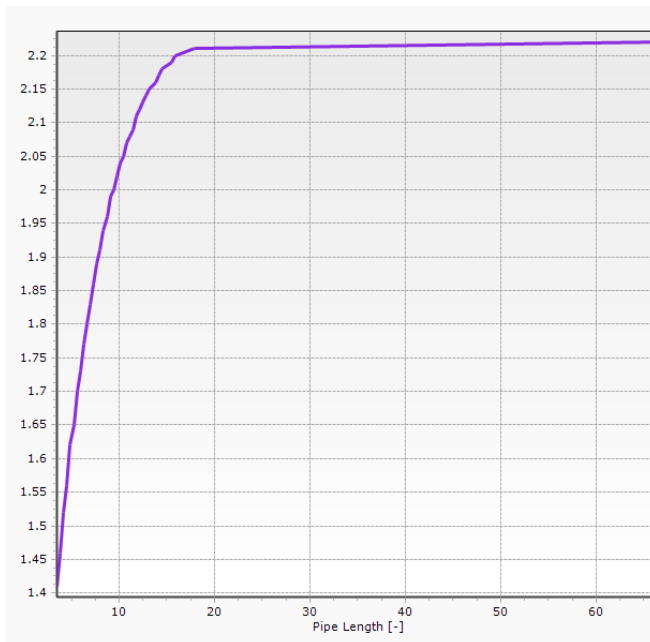


Een kritiek verval 2,18 m wordt gevonden.

Deklaag voorland ondoorlatend

Enkel het voorland heeft een deklaag met een extreem lage doorlatendheid gekregen om het principe van Sellmeijer te benaderen. De complete linker rand heeft als randvoorwaarde de rivier toegekend gekregen. De doorsnede is vergelijkbaar met afbeelding I.1.

Afbeelding I.8 Vervalcurve variant 4

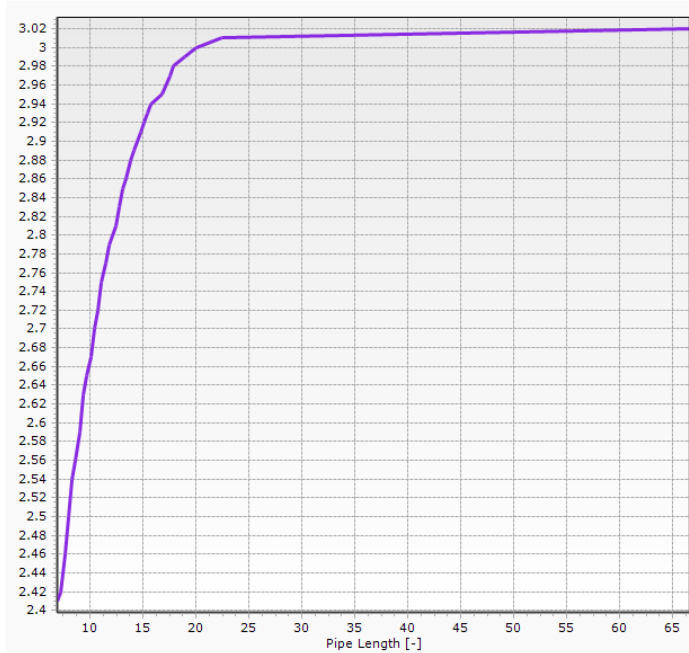


Een kritiek verval 2,21 m wordt gevonden.

Deklaag voorland ondoorlatend & Randvoorwaarde tot bodemhoogte rivier

De doorsnede is vergelijkbaar met afbeelding I.3.

Afbeelding I.9 Vervalcurve variant 5

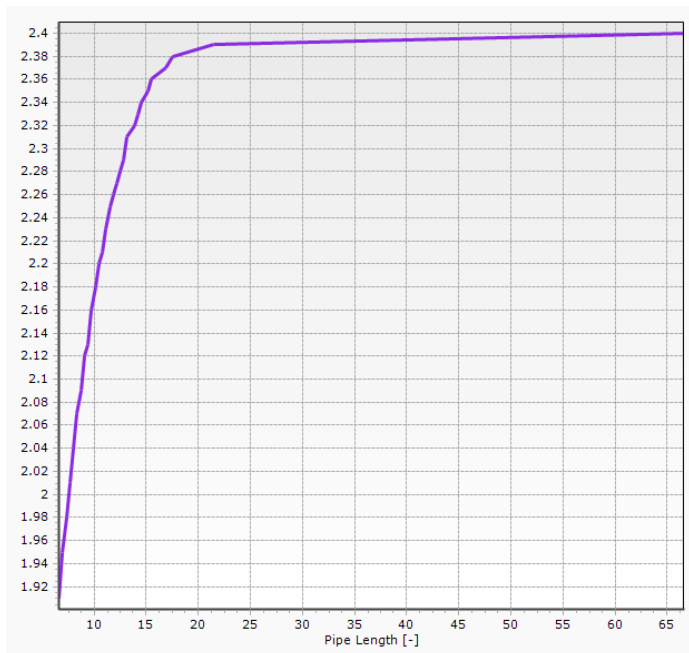


Een kritiek verval 3,01 m wordt gevonden.

Deklaag voorland ondoorlatend & Randvoorwaarde halve verticale lengte WVP

De doorsnede is vergelijkbaar met afbeelding I.5.

Afbeelding I.10 Vervalcurve variant 5



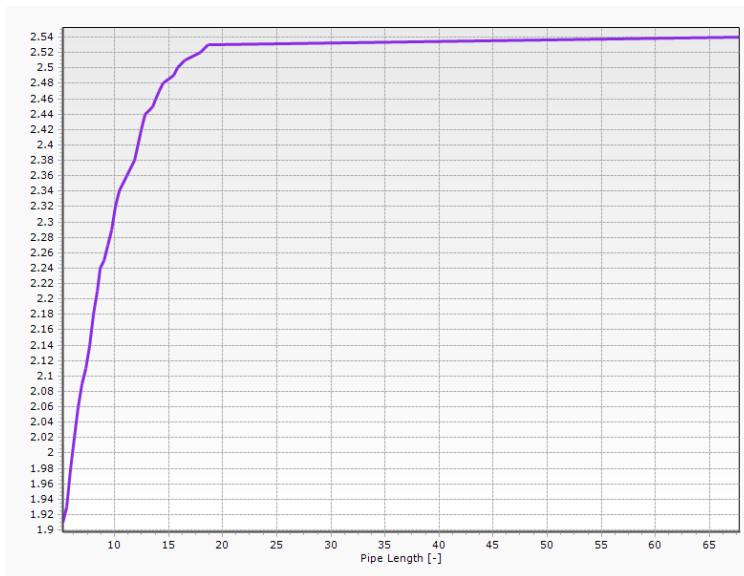
Een kritiek verval 2,39 m wordt gevonden.

Randvoorwaarde tot bodemhoogte rivier & verlengd voorland met twee insijdingen

Afbeelding I.11 Doorsnede D-Geo Flow model voor variant 7



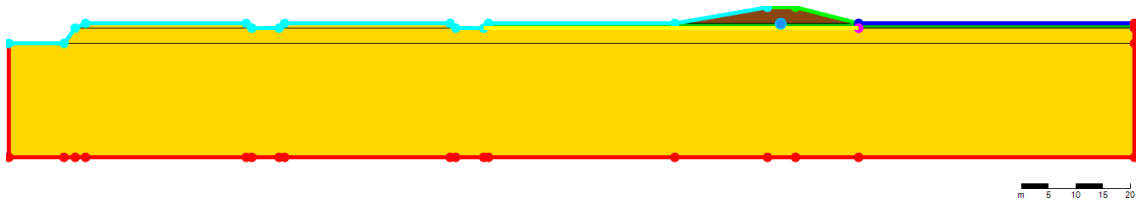
Afbeelding I.12 Vervalcurve variant 7



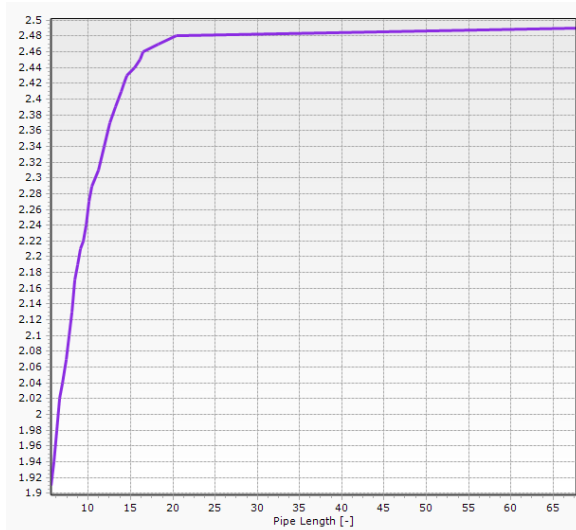
Een kritiek verval 2,53 m wordt gevonden.

Randvoorwaarde tot bodemhoogte rivier & verlengd voorland met 2 insijdingen. Verlengd voorland deklaag zand WVP.

Afbeelding I.13 Doorsnede D-Geo Flow model voor variant 8



Afbeelding I.14 Vervalcurve variant 8

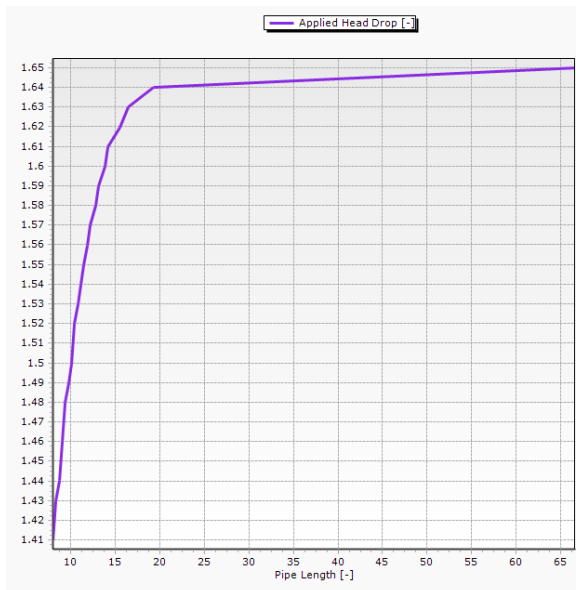


Een kritiek verval 2,48 m wordt gevonden.

Doorlatendheid WVP van 84,8 naar 200 m per dag

De doorsnede is vergelijkbaar met afbeelding I.1.

Afbeelding I.15 Vervalcurve variant 9



Een kritiek verval 1,64 m wordt gevonden.



Waterschap
Rivierenland

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