

Opdrachtgever

Waterschap Vallei en Veluwe

Karakterisering Grebbedijk



Docnr: 17M3041-R-006-V03
Revisie: 03
Datum: 24 augustus 2018

LievenceCSO Infra B.V.

CORRESPONDENTIEADRES
Postbus 2
3980 CA Bunnik

BEZOEKADRES
Regulierenring 6
3980 LB Bunnik

TELEFOON
+31 (0)88 91 020 00

E-MAIL
info@LievenceCSO.com

INTERNET
LievenceCSO.com



Autorisatie

Docnr: 17M3041-R-006-V03	Datum: 24-08-2018
Opgesteld: ir. M. Hop	Paraaf
Gecontroleerd: ir. B. Rijneveld	Paraaf
Vrijgegeven: ir. B. Rijneveld	Paraaf

Documenthistorie

Rev.	Datum	Opmerking/reden wijziging
1	11-04-2018	
2	22-06-2018	Opmerkingen WSVV verwerkt en resultaten diverse onderzoeken toegevoegd.
3	24-08-2018	Opmerkingen WSVV verwerkt



Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	1
1.1	Projectbeschrijving	1
1.2	Aanleiding en doelstelling	2
1.3	Totstandkoming.....	2
1.4	Gebruikte informatie	2
2	Historische informatie dijkopbouw	5
2.1	Historische ligging, verleggingen en doorbraken	5
2.2	Dijkversterking jaren '90.....	6
2.3	Constructieve elementen	8
3	Geologie en laagindeling.....	11
3.1	Geologie.....	11
3.2	Geotechnisch lengteprofiel	12
4	Geometrie.....	14
4.1	Inmetingen	14
4.2	AHN2.....	14
4.3	Autonome bodemdaling.....	15
4.4	Waterpartijen	15
5	Geohydrologie.....	17
5.1	Geohydrologische beschrijving.....	17
5.2	Beheerpeilen en open waterpeilen	18
5.3	Grondwaterstands- en stijghoogtemetingen	20
5.4	Freatische lijn in de dijk.....	21
5.5	Stijghoogte binnenteen	22
6	Geotechnische sterkteparameters	23
7	Geohydrologische parameters	24
7.1	Dikte watervoerend pakket.....	24
7.2	Doorlatendheid watervoerend pakket	25
7.3	Korrelgrootte D_{70}	34
7.4	Intrede- en uittredelijns	34
7.5	Samenvatting.....	34
8	Aanbevelingen	36

Bijlagen

Bijlage 1	Historisch kaartmateriaal
Bijlage 2	Analyse peilbuisgegevens
Bijlage 3	Geotechnisch lengteprofiel
Bijlage 4	Geotechnische sterkteparameters

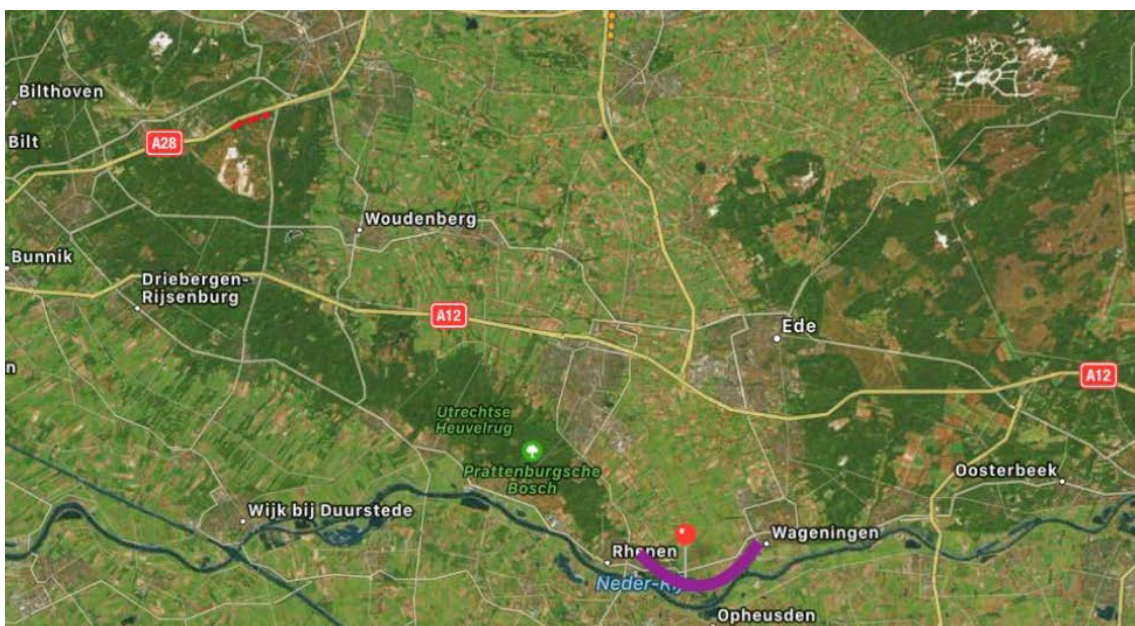


- Bijlage 5 Doorlatendheidsprofielen
- Bijlage 6 Bepaling autonome bodemdaling
- Bijlage 7 Commentaartabel

1 Inleiding

1.1 Projectbeschrijving

De Grebbedijk maakt onderdeel uit van dijkkring 45 – Gelderse Vallei en beschermt de Gelderse Vallei tegen hoogwater vanuit de Nederrijn. De dijk loopt van de hoge gronden bij Wageningen (Veluwe) naar de hoge gronden bij Rhenen (Utrechtse Heuvelrug) en vormt in zijn geheel het normtraject 45-1. De Grebbedijk is ca. 5,5 kilometer lang, zie Figuur 1-1.



Figuur 1-1: Locatie Grebbedijk [WSVV 2017a]

De Grebbedijk is door het waterschap Vallei en Veluwe in de Eerste Veiligheidsbeoordeling als onvoldoende beoordeeld. De veiligheidsrapportage van de Grebbedijk concludeert op basis van het WBI2017 (wettelijk beoordelingsinstrumentarium 2017) dat het veiligheidsoordeel van de Grebbedijk (normtraject 45-1) voor de eerste beoordelingsronde ‘categorie D’ is: ‘de overstromingskans van het normtraject is veel groter dan de signaleringswaarde en de maximaal toelaatbare kans’. Het Rijk heeft dit oordeel overgenomen.

De Grebbedijk staat met hoge prioriteit op het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) 2017-2022 om te zorgen dat de dijk gaat voldoen aan de geldende veiligheidsnorm. Het HWBP is een programma van rijk en waterschappen en onderdeel van het Deltaprogramma. Het valt onder het uitvoeringsprogramma, het Deltaplan Waterveiligheid. De scope van het project, inclusief de opgaven voor Natura 2000 en NURG en de overige ambities is voor de verkenningsfase daarom de hele lengte van de Grebbedijk.



1.2 Aanleiding en doelstelling

Voorafgaand aan de verkenning Grebbedijk heeft RoyalHaskoningDHV een nadere veiligheidsanalyse (NVA) opgesteld [RHDHV 2018]. Hierin is de veiligheidsopgave voor de verkenningsfase inzichtelijk gemaakt. Deze is voor de Grebbedijk aanzienlijk en omvat voor vrijwel het hele traject tussen dp 0 en 13 en tussen dp 22 en 54 een opgave voor de mechanismen overloop en overslag, opbarsten en piping, macrostabiliteit binnenwaarts, macrostabiliteit buitenwaarts en de grasbekleding.

Op dit moment is bekend dat er een veiligheidsopgave is, maar is de omvang van de versterkingsopgave nog niet stabiel in kaart gebracht. Daarom wordt parallel aan het zoeken naar dijkversterkingsoplossingen nader geotechnisch, geofysisch, geohydrologisch en geodetisch onderzoek uitgevoerd om de veiligheidsopgave te stabiliseren en de bandbreedte in de versterkingsomvang te verkleinen. Doel van dit rapport is om de kenmerken van de Grebbedijk in kaart te brengen. In de volgende hoofdstukken wordt de historische ligging van de Grebbedijk geanalyseerd, de geologie, geometrie, geohydrologie en bijbehorende parameters.

1.3 Totstandkoming

Dit document is tot stand gekomen na voorbespreking van de inhoudsopgave met KPR (Kennisplatform Risicobenadering) en WSVV (Waterschap Vallei en Veluwe).

Sinds de vorige versie van dit rapport zijn de resultaten van de peilbuis- en waterspanningsmetingen verwerkt. Ook zijn de autonome bodemdaling en grondparameters vastgesteld.

1.4 Gebruikte informatie

Voor dit document is gebruik gemaakt van de volgende informatie:

- [BMC 2010] Omgevingsanalyse Grebbedijk, Gebiedsanalyse en Actorenanalyse, BMC, projectnummer 418420, maart 2010
- [DHV 2001] Piping-analyse Grebbedijk, DHV, 2001
- [HEI 1995a] Dijkverbeteringsplan Grebbedijk dp 1-5 en dp 38 – 49 Geotechnisch rapport, Heidemij, Waterschap Gelderse vallei en Eem, documentnummer 634/OA94/2929/16125/LR, juni 1995
- [HEI 1995b] Verbetering Grebbedijk Trajecten dp 0-1, dp 5-38 en dp 48.8-53.7 Concept-definitief plan, Heidemij, november 1995. Bijbehorende tekeningen zie Tabel 1-1



- [HEI 1994] Technische analyse huidig profiel Grebbedijk Eindrapport+ bijlage rapportage, Heidemij ,Waterschap Gelderse vallei en Eem, documentnummer 634/EA94/D025/16125, mei 1994
- [KPR 2017] Voorstel t.a.v. beoordeling macrostabiliteit incl. golfoverslag, KPR memo, 14-03-2017
- [KvK 2009] Klimaatdijk Een verkenning, Kennis voor klimaat, KvK rapportnummer 011/09, 2009
- [LCF 2018a] Geotechnisch onderzoek Verkenning Grebbedijk, LievenseCSO Fugro, 17M3041-R-004-V02, 18 juni 2018
- [LCF 2018b] Uitgangspuntendocument verkenning Grebbedijk, LievenseCSO Fugro, 17M3041-R-005-V02, 22 juni 2018
- [OI2014v4] Handreiking ontwerpen met overstromingskansen OI2014v4, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, december 2016
- [POVP 2016] Doorlatendheidsschematisatie in Piping analyses o.b.v. HPT sonderen, 1213-0101-000.R06, Fugro GeoServices B.V., 20 mei 2016
- [POVP 2015] POV Piping regionale kwelstroom theoretische beschrijving, Waterschap Vallei en Veluwe, AP539-7/15-006.500,17 april 2015
- [RHDHV 2018] Dijkversterking Grebbedijk - Nadere veiligheidsanalyse, rapport RHDHV WATBE8333R002F003, versie 007, 24 januari 2018
- [SHM 2016] Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 1 december 2016
- [TRZW 1999] Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen, Technische adviescommissie voor de waterkeringen (TAW), maart 1999
- [TOETS 2010] Veiligheidstoetsing Grebbedijk (Dijkkring 45) Dijklichaam 3^e Toetsronde (2006-2011) Waterschap Vallei & Eem, rapport DHV, registratienummer WA-HW20090304, september 2010
- [TW 2011] Geotechnisch advies voor: Beoordeling waterkeringsveiligheid kistdamconstructie Grebbedijk DP 52,0 – DP 53,4 i.v.m. project Het Hoornwerk, opdracht nr. 11-5028, Teeuw Grondmechanica ,juni 2011
- [WIER 2017] Geotechnisch onderzoek: veiligheidsanalyse Grebbedijk te Wageningen, Wiertsema en Partners, documentnummer R47623 ,31 januari 2017
- [WSVV 2017a] Plan van aanpak dijkversterking Grebbedijk Verkenningfase, Waterschap Vallei en Veluwe, documentnummer 942267, geen datum
- [WSVV 2017b] Bouwsteen waterveiligheid, Waterschap Vallei en Veluwe, geen datum of referentie

Tabel 1-1 Overzicht tekeningen uit [Heidemij 1995b]

Titel tekening behorende bij [Heidemij 1995b]	Projectnummer	Tekening nr
Werktekening Situatie aanleg lage damwand west- en noordzijde havenkom	634-86658	W7-3



Titel tekening behorende bij [Heidemij 1995b]	Projectnummer	Tekening nr
Werktekening aanleg lage damwand west- en noordzijde havenkom dorsnede A-A	634-86658	W7-4
Werktekening aanleg lage damwand west- en noordzijde havenkom dorsnede B-B	634-86658	W7-5
Werktekening Doorsnede C-C D-D aanleg lage damwand west- en noordzijde havenkom	634-86658	W7-7
Overzichtskaart verbetering grebbedijk dp 0-1 5-38 48,80-57.30	634-10242	nr 10-1
Concept-definitief plan situatie dp 0-1 en 5-26	634-10242	nr 10-2
Concept-definitief plan situatie dp 27-38 en 48.80-53.70	634-10242	nr 10-3
Concept-definitief plan situatie dwarsprofielen 0,60 5 t/m 18	634-10242	nr 10-4
Concept-definitief plan situatie dwarsprofielen 19 t/m 32	634-10242	nr 10-5
Concept-definitief plan situatie dwarsprofielen 33 t/m 37 50 t/m 53.60	634-10242	nr 10-6
Concept-definitief plan situatie Witte sluis	634-10242	nr 10-7
Concept-definitief plan situatie Detail (principe detail profiel 11 damwand, principe detail kistdam	634-10242	nr 10-8

2 Historische informatie dijkopbouw

Voor de toekomstige dijkversterking is het van belang zoveel mogelijk informatie te verzamelen over de geschiedenis van het dijklichaam. Historische doorbraken en verleggingen van de dijk geven mogelijk informatie over de opbouw van de dijk en de ondergrond. In dit hoofdstuk wordt eerst de historische ligging, verleggingen en doorbraken gepresenteerd. Vervolgens worden de maatregelen van de dijkversterking uit de jaren '90 van de 20^e eeuw weergegeven.

2.1 Historische ligging, verleggingen en doorbraken

In topotijdreis (topotijdreis.nl) staan historische topografische kaarten, op basis waarvan historische verleggingen kunnen worden herleid. In bijlage 1 staan de topografische kaarten van verschillende jaartallen gepresenteerd. In 1855 is er een doorbraak geweest van de Grebbedijk bij Den Dooven [BMC 2010]. Na deze doorbraak is een gedeelte van de Grebbedijk verlegd zoals te zien is in figuur 2-1.



Figuur 2-1 Dijkverlegging na doorbraak 1855 [bron: topotijdreis.nl]

Verdere bestudering van de kaarten laat zien dat een gedeelte van de dijk nabij Wageningen tussen 1850 en 1870 verlegd is, dit is weergegeven in figuur 2-2.



Figuur 2-2 Dijkverlegging nabij Wageningen oorzaak onbekend [bron: topotijdreis.nl]

Na het hoogwater van 1995 is er besloten om de dijk te versterken en zijn er verschillende maatregelen uitgevoerd, maar de ligging van de dijk is niet aangepast [HEI 1995].

In tabel 2-1 zijn deze gebeurtenissen samengevat.

Tabel 2-1 Overzicht gebeurtenissen Grebbedijk

Gebeurtenis	Jaartal	dijkpaal
Dijkdoorbraak	1855	Den Dooven
Dijkverlegging na doorbraak	1855	Huidige dijkpaal 35-45
Verlegging Wageningen	Tussen 1850-1870	8-11
Dijkversterking	1996-2000	0-54

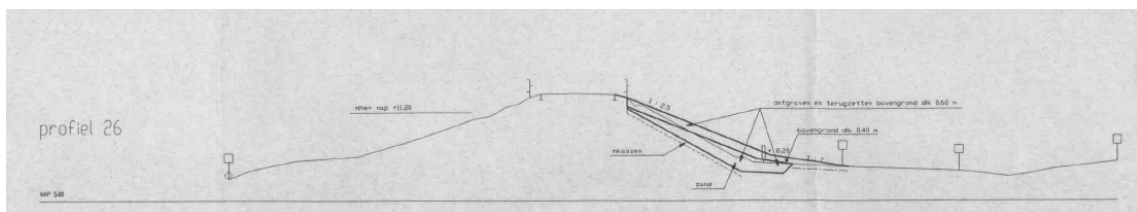
De dijkverlegging van de doorbraak in 1855 van de Grebbedijk is niet terug te zien in de dijkopbouw uit het grondonderzoek.

2.2 Dijkversterking jaren '90

Na het hoogwater van 1995 is de Deltawet Grote Rivieren opgesteld. Het Waterschap Vallei & Eem heeft naar aanleiding van deze wet de Grebbedijk volgens twee sporen aangepakt:

1. Deltawet-trajecten (dp 1-5 en dp 38-49) gereed voor eind 1996
2. Resterende (Niet-Delta) trajecten(dp 0-1 , dp 5-38 en dp 49-53,7), gereed voor 2000

De knelpunten zijn geïnventariseerd door [HEI 1994] als macrostabiliteit binnentalud, microstabiliteit en piping. De uitgevoerde maatregelen zijn opgenomen in tabel 2-2, deze informatie is overgenomen uit [TOETS 2010]. In figuur 2-3 is een typische maatregel weergegeven van de dijkversterking waarbij er een talud verflauwing is uitgevoerd en een zandinkassing is gecreëerd. Deze zandinkassing is bij alle trajecten waarbij een talud verflauwing is uitgevoerd aanwezig.



Figuur 2-3 Typische maatregel dijkversterking [HEI 1995a]

Tabel 2-2 Overzicht maatregelen dijkversterking

Dijkpaal nr	Type	Maatregelen op basis van bestekstekeningen
0-1	Niet-Delta	Verflauwen binnentalud ¹⁾
1-5	Delta	Verflauwen binnentalud ¹⁾



		Dijkpaal 4 klei-ingraving ²⁾ voorland 20 m
5-9	Niet-Delta	Verflauwen binnentalud ¹⁾ en klei-ingraving ²⁾ voorland 15 a 30 m
8,7	Niet-Delta	Kwelscherm aanbrengen (witte sluis)
9-37	Niet-Delta	Verflauwen binnentalud ¹⁾ dijkpaal 9-12, 16-39, 36 drainage in grindkoffer ³⁾ dijkpaal 11 damwand ⁴⁾ kruin 10 m lang dijkpaal 23 damwand ⁴⁾ binnentalud 10 m dijkpaal 29 drain in schelpenbed ³⁾ dijkpaal 33 verplaatsen sloot achterland
37-38	Niet-Delta	Verflauwen binnentalud ¹⁾ en klei-ingraving ²⁾ voorland 11,5 m
38-49	Delta	Verflauwen binnentalud ¹⁾ Dp 48,8-49,5 damwand ⁴⁾ binnentalud en klei-ingraving voorland
49-52	Niet-Delta	Verflauwen binnentalud ¹⁾
52-53,7	Niet-Delta	Kistdam ⁵⁾

- 1) Het gemiddelde talud is aangepast tot een helling van 1:2,5. Op trajecten waar de microstabiliteit onvoldoende was getoetst, is en de reconstructie een ondertalud van 1:7 of 1:10 aangebracht.
- 2) Klei-ingraving houdt in: het aanbrengen van een kleikist met een dikte van 1 m, waar bovenop 0,5 m oorspronkelijke bovengrond teruggezet is.
- 3) Drain in grindkoffer: drainbuis 160mm grindkoffer 0,4*0,4 m rondom bekleed met nylondoek (1,4 m) daarop 0,5 m draineerzand, afgedekt met 0,1 m grasbetontegels, grind of teelaarde, doorspuitstukken (PVC) iedere 100 m in straatpot met gietijzeren deksel. Drain in schelpenbed: drainbuis 100 mm kunststofbuis met kokosomhulling in schelpenbed (0,3 m) ontgraven en aanvullen 0,5 m.
- 4) Damwand (erosiescherm) of kistdam op trajecten waar aanbrengen klei-ingraving niet mogelijk was.
- 5) Kistdam: damwand buitenkruin 17 m lang binnenkruin 12m (5 m tpv dp 53), anker h.o.h.- afstand 2 m op NAP +11.4 m.

Uit informatie van de beheerder blijkt dat de drainages niet actief worden onderhouden. De staat van de damwanden is niet bekend.

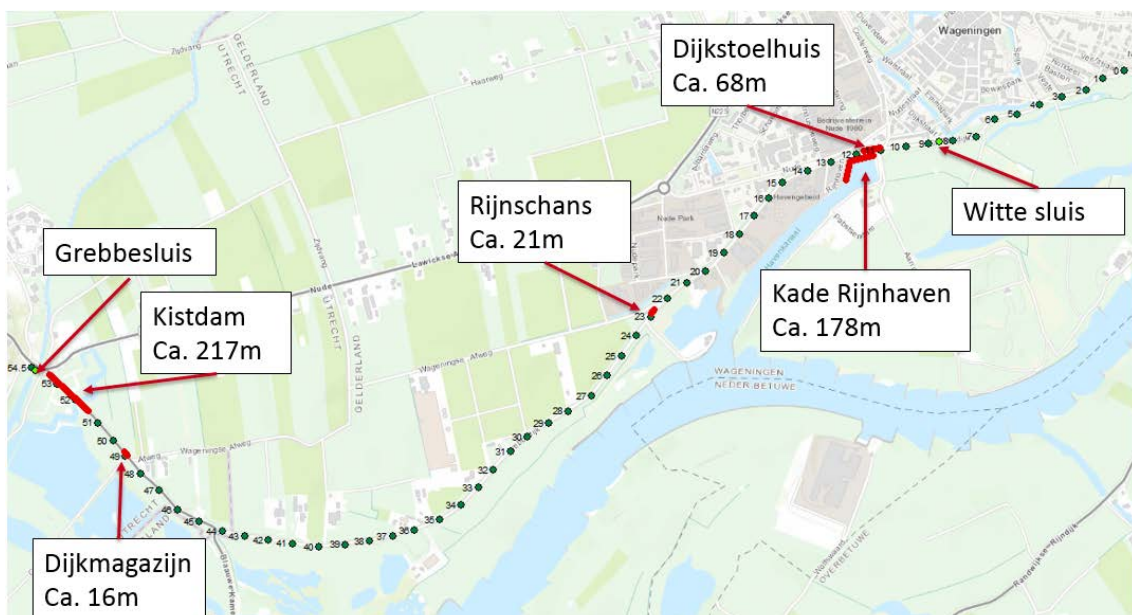
Naar aanleiding van het ontstaan van een zand meevoerende wel nabij dijkpaal 40 in het voorjaar van 2001, en eerdere meldingen uit 1995, is er in 2001 een pipinganalyse uitgevoerd [DHV 2001]. In de conclusies van deze analyse wordt geadviseerd om in het westelijke gebied alle sloten in het achterland die binnen 55 m van de binnenteen liggen te dempen. Dit werd geadviseerd omdat er in het uitgevoerde ontwerp in 1997 geen rekening gehouden was met de beperkte kleidikte onder de slootbodem. Volgens opgaaf van het Waterschap zijn alle betreffende sloten gedempt [TOETS 2010].

In 2006 is de nieuwbouwwijk Rustenburg opgeleverd. Het plan bestond onder andere uit de ophoging van het maaiveld aan de binnenzijde van de dijk (ca. 1,5 m boven oorspronkelijk maaiveld) en de aanleg van een kwelscherm [TOETS 2010].

2.3 Constructieve elementen

In de Grebbedijk bevinden zich enkele constructieve elementen.

Er zijn twee sluisen aanwezig, namelijk de Witte sluis uit 1925 die momenteel dienst doet als rioolleiding en de Grebbesluis die in 1979-1980 is aangepast aan het MHW van 1996. In figuur 2-4 is de locatie van de Witte sluis en de Grebbesluis weergegeven.



Figuur 2-4 Locaties constructieve elementen

Naast deze afsluitbare constructies staan er ook op verschillende locaties damwanden aanwezig. Deze damwanden zijn geplaatst ten behoeve van de stabiliteit van het binnentalud (deels ten behoeve van aanwezige bebouwing), de locaties zijn hieronder opgesomd:

- damwand dp 11 (dijkstoelhuis)
- damwand dp 11 tot dp 13
- damwand dp 23 (Rijnschans)
- damwand dp 49,1 (dijkmagazijn)

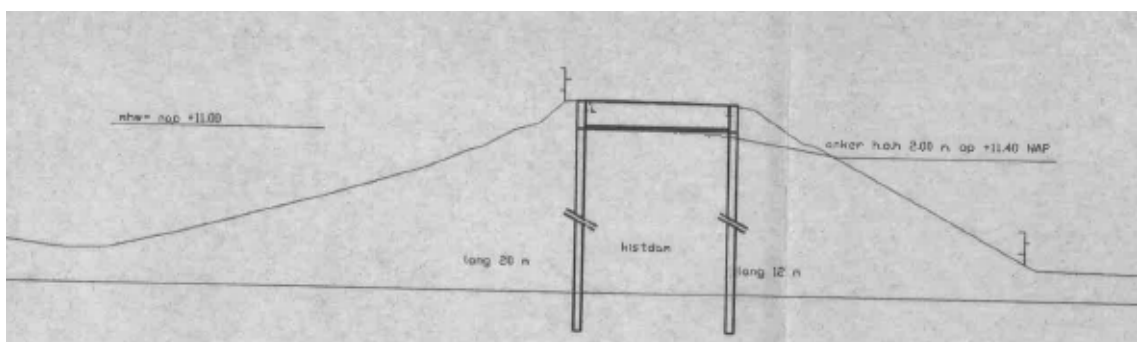
In figuur 2-4 staan de locaties weergegeven evenals de lengte waarover de damwand aangebracht is. Op basis van de tekeningen uit [Heidemij 1995b] is tabel 2-3 opgesteld met daarin de gebruikte damwandprofielen, ankers en aanleghoogtes als deze bekend zijn.

Tabel 2-3 Overzicht tekeningen en maatregelen constructieve elementen

Locatie	Tekening nr.	Maatregelen volgens tekeningen[Heidemij 1995b]
---------	--------------	--

Kade Rijnhaven	W 7-3	Stalendamwand type ARBED AZ26 L lang 12000/13000 gestaffeld aanbrengen bovenkant op NAP+8,00
Kade Rijnhaven	W 7-4	Detail tekening damwand, doorsnede A-A, Stalendamwand type ARBED AZ26 L lang 12000 / 13000 gestaffeld aanbrengen, Groutankers aanwezig h.o.h. 1260 onder 45 graden. Aangesloten op gording HEB 200. Grindkist met drain aanwezig achter damwand bovenkant op NAP+8,00
Kade Rijnhaven	W 7-5	Detail tekening damwand, doorsnede B-B, Stalendamwand type ARBED AZ26 L lang 12000 / 13000 gestaffeld aanbrengen, Groutankers aanwezig h.o.h. 1260 onder 35 graden. Aangesloten op gording HEB 200. Grindkist met drain aanwezig achter damwand bovenkant op NAP+8,00
Kade Rijnhaven	W 7-6	Detail tekening damwand, doorsnede C-C, Stalendamwand type ARBED AZ26 L lang 12000 / 13000 gestaffeld aanbrengen, Groutankers aanwezig h.o.h. 1260 onder 35 graden. Aangesloten op gording HEB 200. Grindkist met drain aanwezig achter damwand bovenkant op NAP+8,00
Kade Rijnhaven	W 7-7	Detail tekening damwand, doorsnede D-D, Stalendamwand type ARBED AZ26 L lang 12000/13000 gestaffeld aanbrengen bovenkant op NAP+8,00
Dijkstoelhuis	10-4	Lengte van damwand 13 m
Rijnschans	10-5	Lengte van damwand 14 m

Tussen dijkpaal 52 en 53,4 is een kistdam aangebracht, zie figuur 2-4. Uit de tekeningen [Heidemij 1995b], zie figuur 2-5, blijkt dat er aan weerszijde damwanden zijn aangebracht die met een anker aan elkaar verbonden zijn.



Figuur 2-5 Ontwerptekening kistdam

Door [Teeuw 2011] is een analyse gemaakt van de kistdam ter beoordeling van de waterveiligheid. In de oorspronkelijke ontwerpberekeningen is uitgegaan van een damwandprofiel AZ18 (of gelijkwaardig) van 17m (van NAP+12,5 tot NAP-4,5m) voor de buitenkruinzijde. Voor de binnenkruinzijde is uitgegaan van profiel AZ13 (of gelijkwaardig) met een lengte van 12m (van NAP+12,5m tot NAP+0,5m) [Teeuw 2011]. Opgemerkt wordt dat de



ontwerptekeningen een damwand lengte van 20 m aangeven, dit volgt ook uit de oorspronkelijke vergunningsaanvraag. Op de ontwerptekeningen volgt dat op dp 53 een lengte van 5m aangegeven wordt voor de damwand aan de binnenzijde, zie tabel 2-4. Dit komt omdat op deze locatie het achterland hoger ligt.

Tabel 2-4 Overzicht maatregelen kistdam

Dijkpaal nr.	Maatregelen op basis tekening [Heidemij 1995b]
52	Kistdam 20m lang buitenkruin, 12m lang binnenkruin, anker h.o.h. 2m op NAP+11,40m, verflauwen binnentalud, ontgraven en terugzetten bovengrond, inkassen en aanbrengen zand
52,4	Kistdam 20 m lang buitenkruin, 12 m lang binnenkruin, anker h.o.h. 2 m op NAP+11,40 m
52,7	Kistdam 20 m lang buitenkruin ,12 m lang binnenkruin, anker h.o.h. 2 m op NAP+11,40 m
53	Kistdam 20 m lang buitenkruin, 5 m lang binnenkruin, anker h.o.h. 2 m op NAP+11,40 m
53,4	Kistdam 20 m lang buitenkruin, 12 m lang binnenkruin, anker h.o.h. 2 m op NAP+11,40 m
53,6	Kistdam 20 m lang buitenkruin, 12 m lang binnenkruin, anker h.o.h. 2 m op NAP+11,40 m

3 Geologie en laagindeling

3.1 Geologie

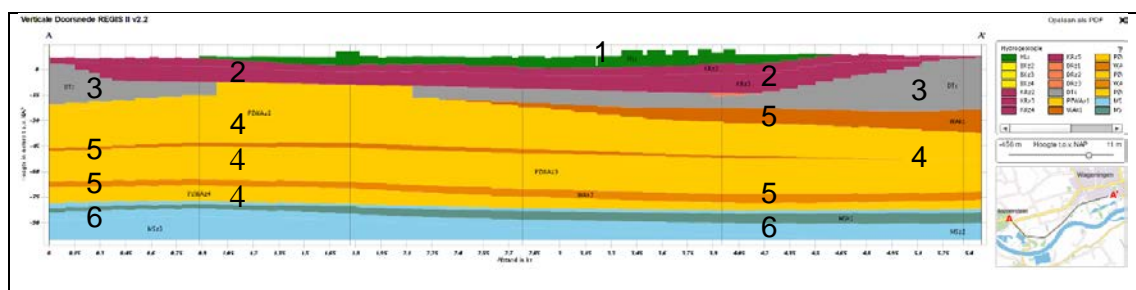
Voor het bepalen van de geologische laagbeschrijving is REGIS II geraadpleegd (REGIS II v2.2, 2017 op basis van DGM 2.2).

De bodemopbouw binnen het projectgebied laat zich kenmerken door verschillende rivierafzetting en opstuwingen. De bovenste laag gezien vanaf het maaiveld bestaat uit een Holocene afzetting. Dit is een complexe laag die bestaat uit afwisselend zandige klei en fijn zand, in een enkele situatie kan hier veen aangetroffen worden. De dikte van deze veelal slecht doorlatende afzetting bedraagt enkele meters. Onder deze afzetting bevindt zich de formatie van Kreftenheye die bestaat uit grof tot matig grof zand.

De formatie van Kreftenheye wordt ingesloten door gestuwde afzettingen. Dit zijn complexe afzettingen die onder de invloed van ijs over en onder elkaar doorgedrukt zijn. Deze laag bestaat uit sterk wisselende opbouw uit zandige klei en matig tot grof zand. Hieronder is de formatie van Waalre aanwezig. Dit is een zandpakket met daarin grote, vlakke kleilagen op verschillende diepten.

Binnen het traject is de eerste kleilaag die het watervoerende pakket over de volledige lengte afsluit de derde kleiige eenheid van Waalre. Deze formatie bevindt zich op een diepte van ca. NAP -45 m, waardoor het zandpakket hier een dikte heeft van ongeveer 50 m. Deze kleiige eenheid van Waalre is de geohydrologische basis binnen het projectgebied. In het oostelijk deel van het gebied daarentegen is de eerste kleiige eenheid van Waalre aanwezig, waardoor het zandpakket van Waalre lokaal een dikte heeft van circa 30 m.

Het resultaat van het ondergrondmodel langs het traject is weergegeven in figuur 3-1 en tabel 3-1.



Figuur 3-1: Resultaat lengteprofiel ondergrondmodel Regis II

Tabel 3-1: Samenvatting formaties conform Regis II

Nummer	Kleur	Formatie	Omschrijving
--------	-------	----------	--------------



1	Groen	Holoceen	Dit is een complexe laag die bestaat uit afwisselend zandige klei en fijne zand, in een enkele situatie kan hier veen aangetroffen worden.
2	Paars	Kreftenheye	Goed doorlatende laag die bestaat uit grof tot matig grof zand.
3	Grijs	Gestuwde afzetting	Wederom een complexe afzettingen die onder de invloed van ijs over en onder elkaar doorgedrukt zijn. Deze laag bestaat uit sterk wisselende opbouw van zandige klei en matig tot grof zand.
4	Geel	Waalre (zand)	Dit is een goed doorlatend zandpakket met daarin grote, vlakke kleilagen op verschillende diepten.
5	Oranje	Waalre (klei)	Binnen het traject is de eerste kleilaag die het watervoerende pakket over de volledige lengte afsluit de derde kleilige eenheid van Waalre. Deze formatie bevindt zich op een diepte van NAP -70 m. In het oostelijk deel van het gebied zijn er aanwijzingen voor de eerste kleilige eenheid op een diepte van ongeveer NAP -20 m.
6	Blauw	Maassluis	Vroeg Pleistocene eenheid wordt getypeerd door schelphoudende zanden met kleilagen. Gelegen onder eerste scheidende kleilaag.

3.2 Geotechnisch lengteprofiel

Het geotechnisch lengteprofiel van de kruin is opgesteld op basis van het grondonderzoek uit [LCF 2018a] en [WIER 2017]. Het geotechnisch lengteprofiel is opgenomen in bijlage 3.

In het geotechnisch lengteprofiel zijn de geologische formaties van Kreftenheye, Waalre en de gestuwde afzetting weergegeven. Er is geen koppeling gemaakt met de WBI-SOS codes. Dit is niet gedaan omdat uit het SOS niet naar voren kwam dat er gestuwde formaties aanwezig zijn, terwijl deze in REGIS wel aangegeven worden. Ook laten de HPT sonderingen op enkele locaties ook een duidelijk scheiding zien.

Vanaf dp0 tot 43 is een kleilaag aangetroffen op een diepte tussen NAP-15,0 m en NAP-25,0 m. Tussen dp36 en 43 is het onzeker of deze doorlopend is.

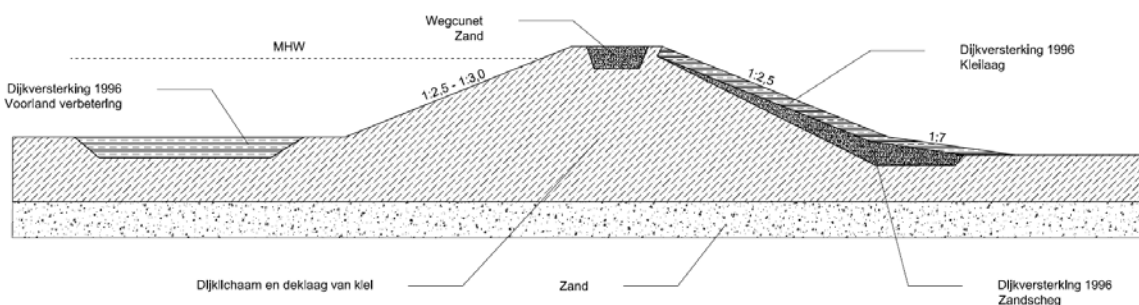
In de sonderingen en boringen is de dikte van het wegcunet niet eenduidig af te leiden, omdat deze over het algemeen aan de rand van de kruin zijn uitgevoerd. Het uitgevoerde geofysisch onderzoek geeft hier echter op een aantal locaties meer inzicht in, omdat de overgang tussen het zandpakket en de klei/leemlaag duidelijk herkenbaar is op ca. 1 á 2 m onder het maaiveld niveau.

Uit het grondonderzoek is de scheiding tussen het antropogeen dijk materiaal en de deklaag niet duidelijk zichtbaar. Ter indicatie is in het lengteprofiel de maaiveldhoogte van het voor- en achterland weergegeven.

3.2.1 Geotechnisch dwarsprofiel

Het geotechnisch dwarsprofiel is van het dijklichaam is opgesteld op basis van het grondonderzoek uit [LCF 2018a] en tekeningen van de dijkversterking in de jaren 90 [Heidemij 1995b]. In figuur 3-2 staat een typisch dwarsprofiel van de Grebbedijk gepresenteerd. Het dijklichaam bestaat voornamelijk uit siltige klei of leem zonder een duidelijke laagscheiding met de deklaag van het voor en achterland. Hieronder is een zandlaag aanwezig.

Tijdens de versterking zijn er verschillende maatregelen genomen, zie paragraaf 2.2 voor een gedetailleerde beschrijving. In figuur 3-2 zijn de typische maatregelen weergegeven, namelijk een voorland verbetering en het verflauwen van het binnentalud. Bij het verflauwen van het talud is er een inkassing van zand gemaakt, deze zandscheg is op een groot deel van het dijktraject onder het binnentalud aanwezig. Uit EM-metingen [LCF 2018a] volgt dat er onder de asfalt verharding een zandcunet van ca. 1-2 m aanwezig is. Uit het beschikbare grondonderzoek, zie [LCF 2018a], komt naar voren dat er klei aanwezig is tussen het zandcunet en buitentalud. Het is niet duidelijk hoe breed dit zandcunet is. Er wordt tijdens de verkenning aangenomen dat dit wegcunet alleen onder de asfaltweg aanwezig is. Aangeraden wordt om dit aan het begin van de planfase vast te stellen door een proefsleuf te graven om deze aanname te verifiëren.



Figuur 3-2 Typisch dwarsprofiel Grebbedijk inclusief dijkversterkingsmaatregelen van 1996

4 Geometrie

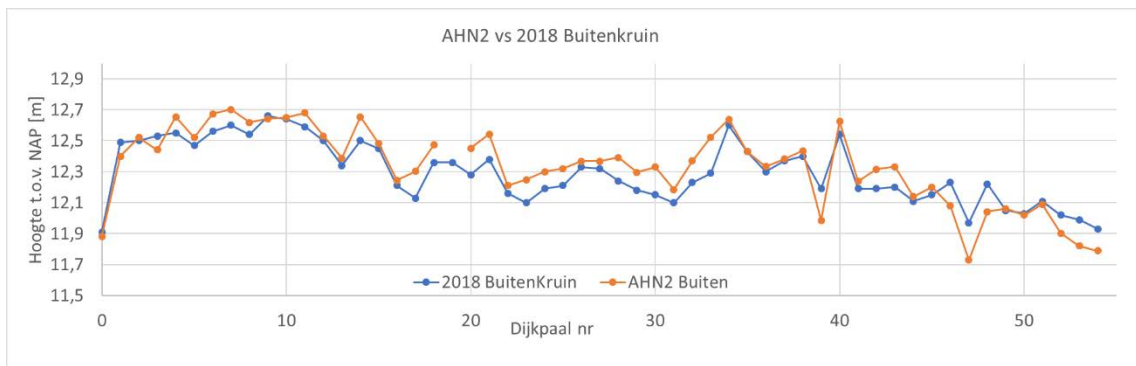
4.1 Inmetingen

Er is door Fugro [LCF 2018a] geodetisch veldwerk uitgevoerd waarbij drie lengteprofielen op de kruin zijn ingemeten te weten de buitenkruinlijn, as van de weg en de binnenkruinlijn. Daarnaast zijn de NWO's tot 10m uit de binnenteen ingemeten, zie [LCF 2018a].

4.2 AHN2

Voor de verkenningsfase wordt het algemeen hoogte bestand Nederland gebruikt voor het genereren van dwarsprofielen van het dijklichaam. Reden hiervoor is dat deze data gebiedsdekkend beschikbaar is.

De data uit het AHN2 bestand is vergeleken met de ingemeten kruinlijnen door [LCF 2018a]. In figuur 4-1 en figuur 4-2 is de data van de AHN2 en 2018 meting vergeleken. Hieruit komt naar voren dat de lijnen redelijk goed met elkaar overeenkomen. Voor het analyseren van de geotechnische mechanismen is het gebruik van de AHN2 data voldoende nauwkeurig. Voor het ontwerp van de hoogte wordt de nauwkeurigere kruinmeting uit [LCF 2018a] aangehouden.



Figuur 4-1: Hoogte vergelijking AHN2 en 2018



Figuur 4-2: Verschil buitenkruin 2018 en AHN2 meting



4.3 Autonome bodemdaling

Voor de bepaling van de autonome bodemdaling wordt verwezen naar bijlage 6.

4.4 Waterpartijen

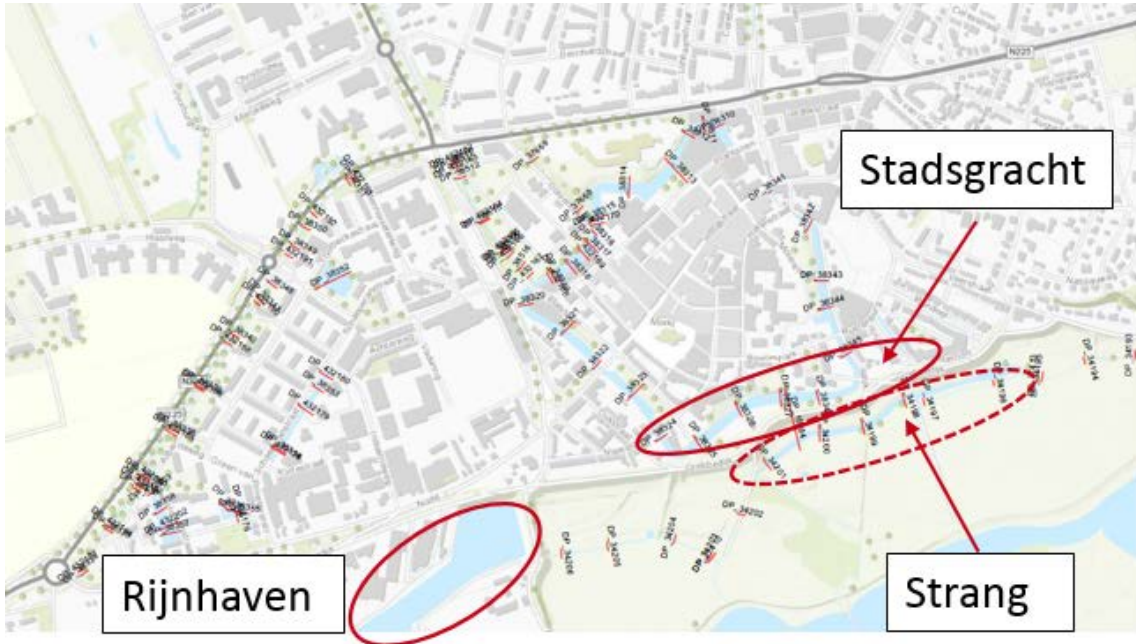
Rondom de Grebbedijk bevinden zich verschillende watergangen en waterpartijen. De door het waterschap geleverde data van ingemeten profielen wordt aangehouden als bodemdiepte van de desbetreffende waterpartij. In de figuur 4-3 en figuur 4-4 staan de locaties weergegeven waarvan de bodemdiepte bekend (ingemeten) is in 2018.

Voor de Rijnhaven is de contractdiepte op basis van tekeningen uit [Heidemij 1995b] vastgesteld op NAP+2,0 m en bovenkant bodembescherming op NAP+1.50 m. De bovenkant bodembescherming wordt aangehouden als constructiediepte.

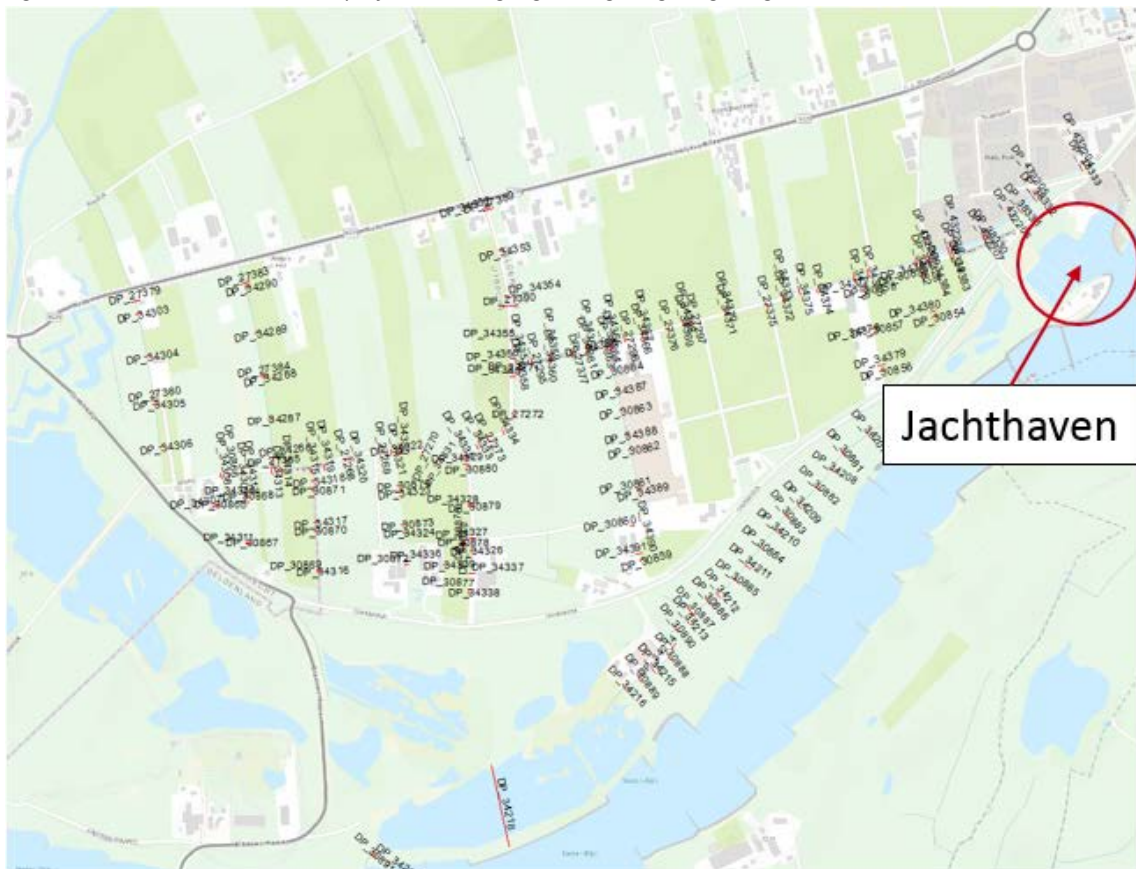
De havenmeester geeft aan dat het havenkanaal een gemiddelde diepte heeft van 3,80m bij een waterstand van NAP+6,0 m. Dit komt goed overeen te komen met de contractdiepte + enige opbouw van slib. Voor de jachthaven heeft de havenmeester aangegeven dat deze een diepte van 3 m heeft bij het havenkanaal en dat het binnen de haven een diepte van 1m heeft tegen de Grebbedijk aan.

De stadsgracht van Wageningen direct achter het dijklichaam heeft een bodemniveau van ca. NAP +5,62 m. Uit het beschikbare grondonderzoek ter plaatse van de stadsgracht, zie [LCF 2018a], komt naar voren dat de deklaag overgaat in zand tussen NAP+5,88m en NAP+6,43m. Dit houdt in dat de stadsgracht met grote waarschijnlijkheid in het watervoerende pakket snijdt. De strang op aan de voorzijde van het dijklichaam heeft een bodemniveau van ca. NAP +6m in het oosten tot ca. NAP +5,7m in het westen.

Uit de analyse van de peilbuisgegevens lijkt de strang voor Wageningen in verbinding te staan met het watervoerend pakket. In het najaar 2018 wordt dit doormiddel van handboringen en geofysisch onderzoek geverifieerd.



Figuur 4-3 Overzicht locaties dwarsprofielen watergangen omgeving Wageningen



Figuur 4-4 Overzicht locaties dwarsprofielen watergangen omgeving Rhenen

5 Geohydrologie

5.1 Geohydrologische beschrijving

De Grebbedijk is ingesloten door de Grebbeberg aan de westzijde en de Wageningse berg aan de oostzijde. Dit zijn hoger gelegen gronden en deze hebben invloed op de grondwaterstroming. Dit effect komt tot uiting in een regionale kwelstroom. Dit is een grondwaterstroom vanaf hooggelegen gronden richting het buitenwater. Bij een klassiek geval van piping is de grondwaterstroming tegengesteld. Het grondwater stroomt dan van het buitenwater/rivier naar het achterland. In de POV piping is onderzoek gedaan naar het effect van de regionale kwelstroom op piping. In figuur 5-1 is een schematische weergave gegeven van het effect van de regionale kwelstroom in combinatie met een tegengestelde grondwaterstroming door een hoogwatergolf.

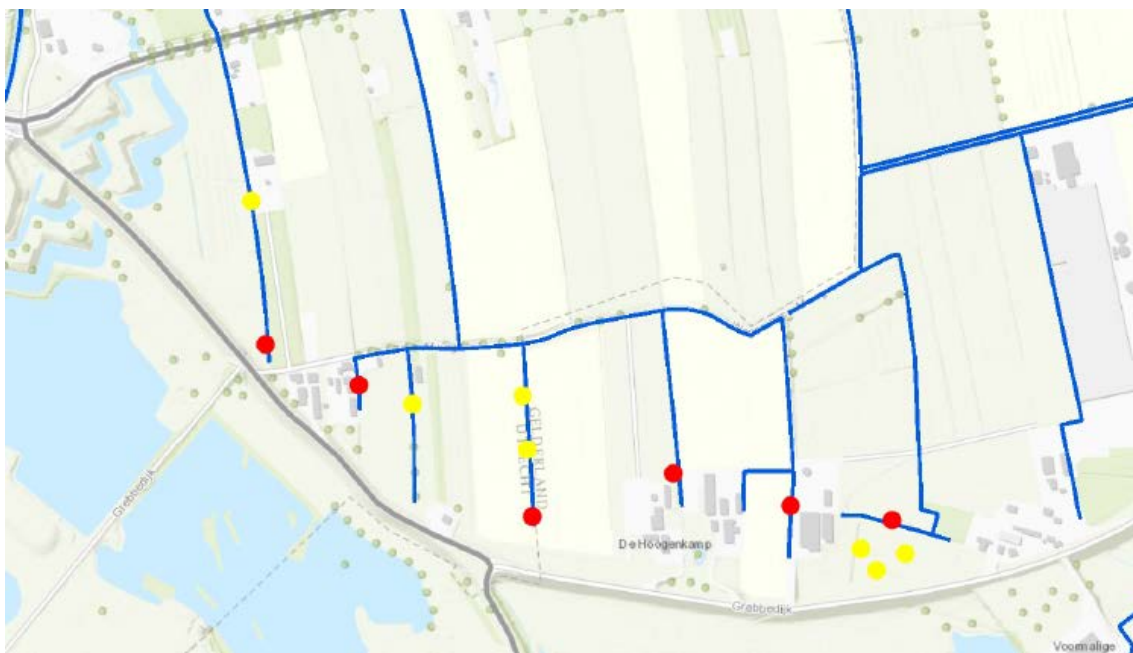
1		<p>In het geval van regionale kweldruk is tijdens dagelijkse omstandigheden een verhang aanwezig tot in de rivier. De rode lijn geeft aan dat tijdens een hoogwatergolf de stroming nog steeds in de richting van de rivier is. De blauwe lijn geeft aan dat dan een tegengestelde grondwaterstroming kan ontstaan.</p>
2		<p>Tijdens een hoogwatergolf kan de afstroming van water door het watervoerend pakket stikken door de toegenomen potentiaal ter plaatse van de rivier</p>
3		<p>In de polder tussen hooggelegen grond en de waterkering zal nu de waterdruk in het zandvoerend pakket toenemen, totdat op een locatie de opbarstpotentiaal wordt overschreden. De locatie van opbarsten is afhankelijk van de verhouding tussen de potentiaal vanuit de regionale kweldruk en het hoogwater.</p>
4		<p>Door het opbarsten zal ter plaatse van de wel de potentiaal afnemen tot de opbarstpotentiaal</p>
5		<p>De waterstand in de rivier kan nog steeds toenemen, waardoor de potentiaal tussen het intredepunt van rivierwater en de eerste opbarstlocatie zal toenemen. Mogelijk zal hierdoor op een locatie dichterbij de waterkering een additionele wel vormen indien hier de opbarstpotentiaal wordt overschreden.</p>

Figuur 5-1 Schematische weergave regionale kwelstroom en het optreden van opbarsten [POVP 2015]

Uit de resultaten van het onderzoek van de POV piping komt naar voren dat de aanwezigheid van een regionale kwelstroom het risico op piping niet verlaagd. Het risico op piping kan

toenemen doordat er eerder opbarsten optreedt. Tijdens maatgevende omstandigheden verandert de stroomrichting (van rivier naar achterland) onder de waterkering niet. Dit heeft tot gevolg dat de erosierichting hetzelfde blijft. Hieruit wordt geconcludeerd dat er alleen gevaar voor de waterkering ontstaat als er een wel optreedt binnen de kritieke lengte van de waterkering.

Tijdens hoogwaters in het verleden, maar ook nog enige tijd daarna, zijn door het Waterschap zandmeevoerende wellen geconstateerd. Deze locaties zijn weergegeven in figuur 5-2. Opvallend is dat deze tot zeer grote afstand uit de dijk optreden. De verwachting is dat deze deels veroorzaakt worden door de regionale kwelstroom die zorgt voor een hogere waterdruk in het watervoerend pakket dan alleen op basis van de buitenwaterstanden verwacht zou worden.

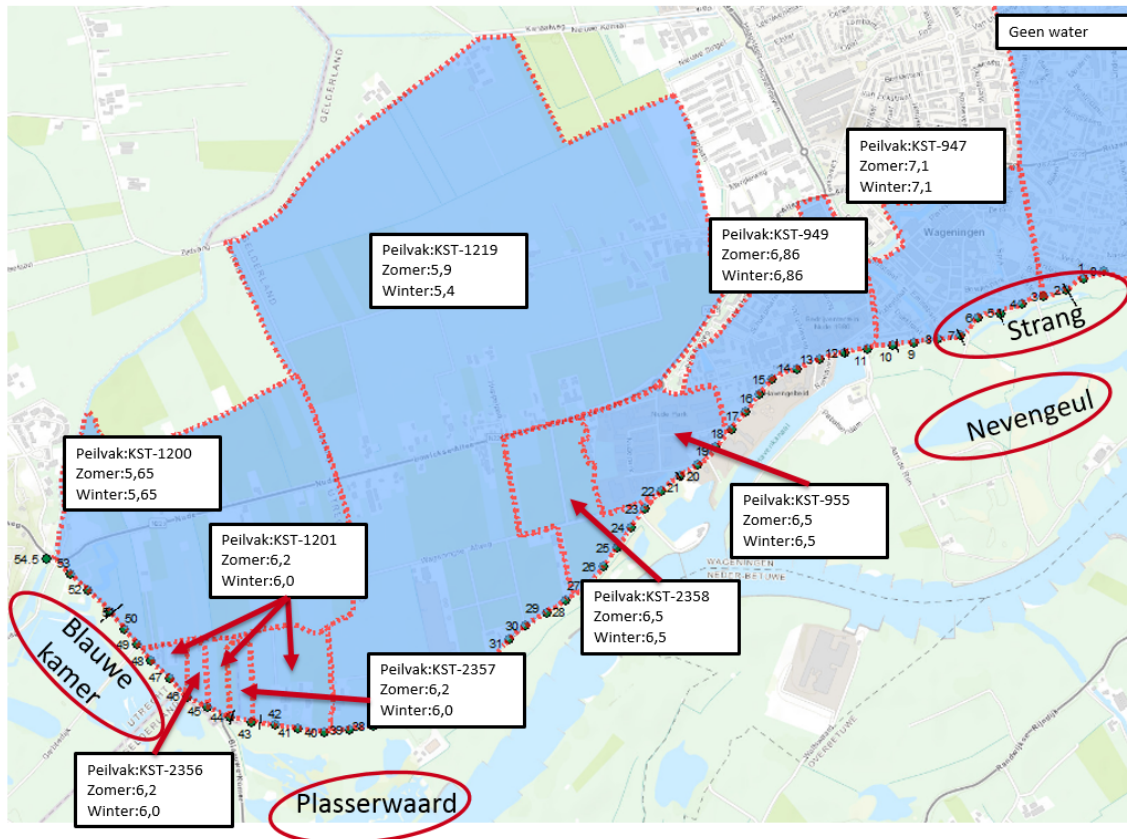


Figuur 5-2: Locatie geconstateerde zandmeevoerende wellen (rood=groot, geel=klein), bron WSVV

5.2 Beheerpeilen en open waterpeilen

De beheerpeilen van de peilvakken aan de binnenzijde van het dijklichaam zijn weergegeven in figuur 5-3.

Tussen dijkpaal 0-3 is geen peilvak aanwezig vanwege de afwezigheid van open water.



Figuur 5-3 overzicht peilvakken binnendijks met bijbehorende beheerpeilen voor zomer en winter

Tabel 5-1 Overzicht beheerpeilen voor zomer en winter voor binnendijkse peilvakken

Peilvak	Zomerpeil	Winterpeil	Dijkpalen
KST-1200	5,65	5,65	54 - 48,7
KST-1201	6,2	6,0	48,7 - 46,1 45 - 44 43 - 39,8
KST-2356	6,2	6,0	46,1 - 45
KST-2357	6,2	6,0	44 - 43
KST-1219	5,9	5,4	39,8 - 27,7
KST-2358	6,5	6,5	27,7 - 22,3
KST-955	6,5	6,5	22,3 - 18,2
KST-949	6,86	6,86	18,2 - 10,7
KST-947	7,1	7,1	10,7 - 3
Geen opp. water	-	-	0 - 3

Het peil van de Neder-Rijn is afhankelijk van de afvoer bij Lobith en fluctueert daardoor. De afvoer van de Rijn is sterk seizoen afhankelijk met hoge afvoeren in de winter en lage afvoeren in de zomer. Dit vertaalt zich ook in hoge waterstanden in de winter en lage waterstanden in de zomer. De gemiddelde waterstand ligt tussen NAP +5,85m en NAP +7,5m.



De buitendijkse wateren zijn deels in open verbinding en deels gestuwd. De blauwe kamer heeft een open verbinding met de Neder-Rijn en volgt de rivierwaterstand.

De plasserwaard heeft een stuw. Deze staat normaliter dicht, maar tijdens hoogwater wordt deze opengezet om de zomerkade te beschermen door het waterstandsverschil te verkleinen.

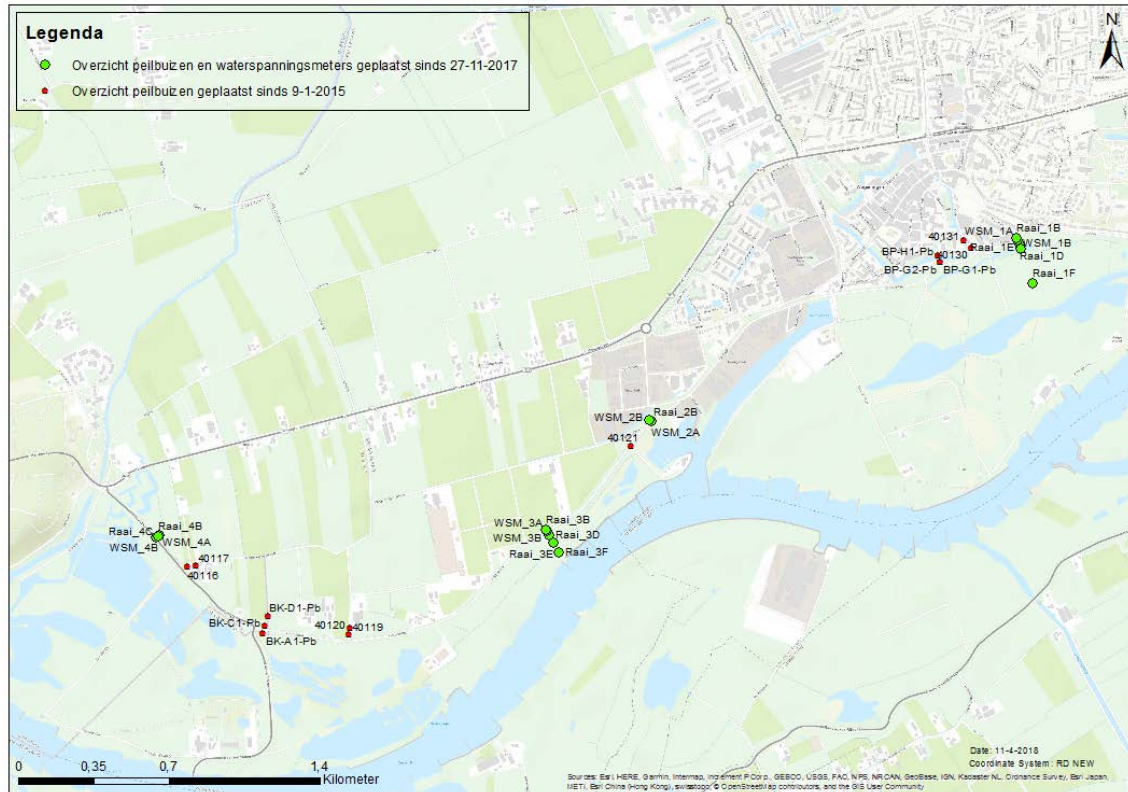
De nevengeul is niet direct verbonden met de Neder-Rijn. Uit de ontwerptekeningen uit [HEI 1995b] blijkt dat deze de onderliggende zandlaag doorsnijdt. Daarom wordt verwacht dat de waterstand in de nevengeul met enige vertraging het waterpeil van de Neder-Rijn volgt.

5.3 Grondwaterstands- en stijghoogtemetingen

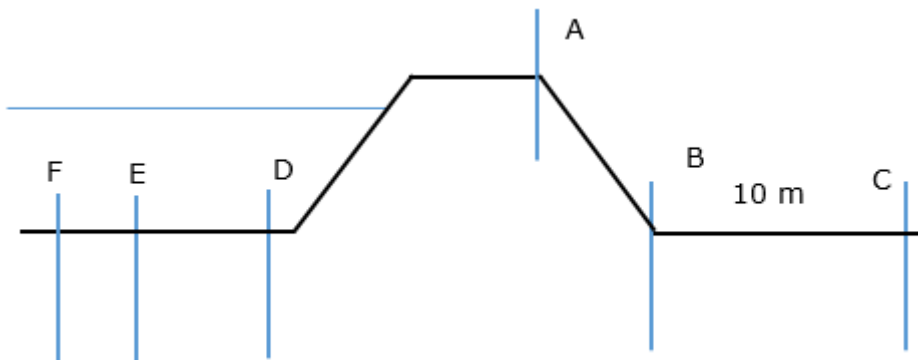
Ter bepaling van de freatische lijn en de respons van de grondlagen op veranderingen in waterstand zijn er door het waterschap grondwaterstandsmetingen verricht. In deze paragraaf wordt uiteen gezet welke meetpunten beschikbaar zijn. Voor enkele locaties zijn langdurige peilbuismetingen verricht, zie figuur 5-4. In november 2017 is er nieuwe meetapparatuur geplaatst op 4 raaien, zie figuur 5-4. Deze apparatuur bestaat uit waterspanningsmeters en peilbuizen. De locatie op het dwarsprofiel en de betreffende apparatuur staan weergegeven in figuur 5-5 en tabel 5-2. In bijlage 2 zijn meer detail betreffende de filterdieptes gegeven.

Tabel 5-2 Overzicht sinds 29 november 2017 geplaatste meetapparatuur

Locatie	Raai 1	Raai 2	Raai 3	Raai 4
A	Waterspanningsmeter	Waterspanningsmeter	Waterspanningsmeter	Waterspanningsmeter
B	Peilbuis, Waterspanningsmeter	Peilbuis, Waterspanningsmeter	Peilbuis, Waterspanningsmeter	Peilbuis, Waterspanningsmeter
C	-	-	-	Peilbuis
D	Peilbuis	-	Peilbuis	-
E	Peilbuis	-	Peilbuis	-
F	Peilbuis	-	Peilbuis	-



Figuur 5-4 Overzicht locatie meetraaien



Figuur 5-5 Indicatieve locaties meetpunten

5.4 Freatische lijn in de dijk

Ter plaatse van de binnenkruinlijn zijn waterspanningsmeters in het dijklichaam geplaatst. Deze dienen voor het vaststellen van de freatische lijn onder dagelijkse en extreme condities. De metingen zijn geanalyseerd in Bijlage 2. Hieruit blijkt dat de freatische lijn onder dagelijkse omstandigheden ter plaatse van de binnenkruinlijn varieert tussen ca. NAP +6 en +7,5m. Voor de freatische lijn ter plaatse van de binnenkruinlijn tijdens maatgevende condities kan uit worden gegaan van NAP +10,0 m.



5.5 Stijghoogte binnenteen

Ter plaatse van de binnenteen zijn peilbuizen in het watervoerendpakket geplaatst. Deze dienen voor het vaststellen van de stijghoogte in het watervoerend pakket onder dagelijkse en extreme condities. De metingen zijn geanalyseerd in Bijlage 2. Hieruit blijkt dat de stijghoogte onder dagelijkse omstandigheden varieert tussen NAP +6 en +7,5m. Voor de stijghoogte tijdens maatgevende condities kan uit worden gegaan van NAP +10,5m.



6 Geotechnische sterkteparameters

Voor de afleiding en beschrijving van de geotechnische sterkteparameters wordt verwezen naar bijlage 4.



7 Geohydrologische parameters

In dit hoofdstuk zijn de geohydrologische parameters beschreven welke benodigd zijn voor het mechanisme piping.

Het is bekend dat de doorlatendheid en de korrelgrootte van de ondergrond sterk afhankelijk zijn van de betreffende formatie. Voor de bepaling van de geologische laagbeschrijving, de sequenties en globale ligging van de formaties in het gebied is met behulp van het ondergrondmodel REGIS II achterhaald. Met dit ondergrondmodel is waar nodig ook de dikte van het watervoerend pakket bepaald. Het resultaat van het ondergrondmodel langs het traject is beschreven in paragraaf 3.1. De korrelgrootte is bepaald in de Nadere Veiligheidsanalyse [NVA, 2018].

7.1 Dikte watervoerend pakket

Voor de methode van Sellmeijer is de dikte van het watervoerend pakket (D) van belang. De onderkant van het watervoerend pakket is bepaald op basis van het geotechnisch lengteprofiel, zie Bijlage 3. Hierbij is aangenomen dat de kleilaag ondoorlatend is. Het is daarom van belang dat deze kleilaag voldoende dik is en aaneengesloten aanwezig is. Een dunne kleilaag bezit mogelijk gaten en een kleilaag die niet over een lengte aanwezig is, is mogelijk een kleilens. Een dergelijke lens is niet volledig afsluitend. Het blijkt dat in het oosten, dijkpaal 1 tot en met dijkpaal 35,5, van het gebied tussen de NAP -15 m en NAP -25 m een duidelijke, dikke afsluitende kleilaag aanwezig is. Deze kleilaag is te zien in naast elkaar gelegen sonderingen, zie het geotechnisch lengteprofiel in Bijlage 3, zowel in sonderingen van Fugro als in sonderingen van derden en REGIS II, waardoor een aaneengesloten afsluitende kleilaag aannemelijk is. Voor het westelijk deel, dijkpaal 35,5 tot en met dijkpaal 54,5, van het gebied is geen duidelijke waterremmende kleilaag af te leiden uit het beschikbare grondonderzoek. Om een inschatting te kunnen maken hoe dik dit watervoerend pakket is, als er geen duidelijke kleilaag uit de sonderingen blijkt, is REGIS II geraadpleegd (zie paragraaf 3.1. Het westelijk profiel heeft de eerste afsluitende laag de tweede kleiige eenheid van de formatie van Waalre, zie paragraaf 3.1 op een diepte van ongeveer NAP -45 m.

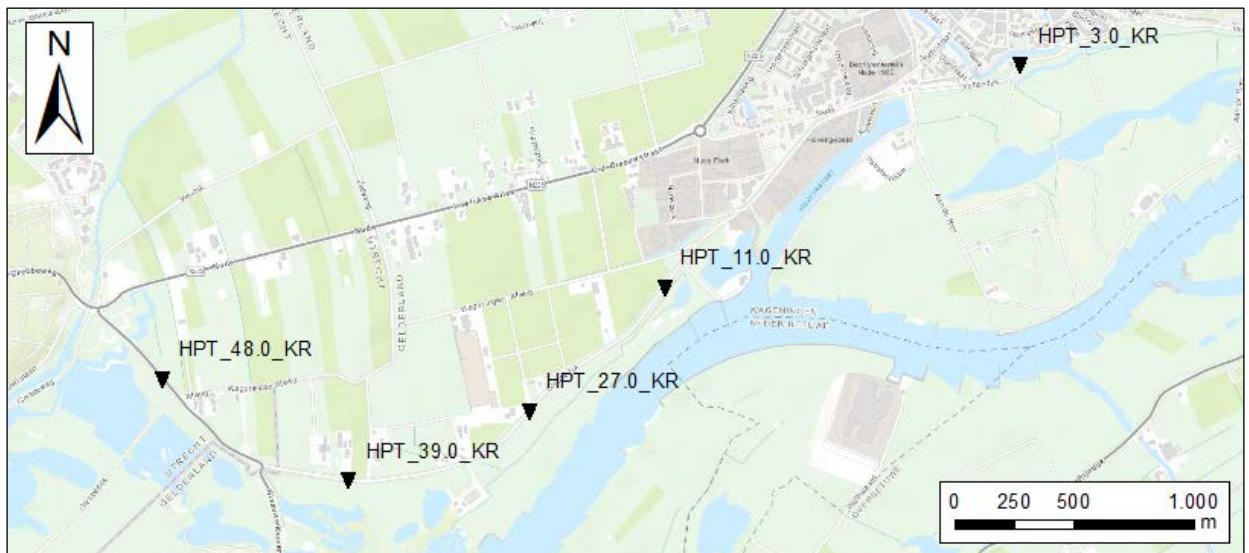
Een samenvatting van de dikte van het watervoerendpakket is weergegeven in tabel 7-1.

Tabel 7-1: Dikte watervoerend pakket

Traject	Dikte watervoerend pakket (D) [m]
Dp 0-4	30
Dp 4-35,5	25
Dp 35,5-54,5	50

7.2 Doorlatendheid watervoerend pakket

Voor de analyse met betrekking tot methode van Sellmeijer is het van belang dat de doorlatendheid van het watervoerend pakket bekend is. Hoewel dit niet direct in te voeren is, dienen met name de ondiepe lagen nauwkeurig in beeld te zijn. Deze lagen hebben namelijk de grootste invloed op het pipingproces. Om de doorlatendheid in deze lagen nauwkeurig te bepalen zijn sonderingen met behulp van de Hydraulic Profiling Tool (HPT-sonderingen) met bijbehorende mini-pompproeven (mini pumping tests of MPT testen) uitgevoerd. Hierbij wordt tijdens het sonderen water in de grond geïnjecteerd. Tijdens het injecteren wordt de druk en het injectiedebiet gemeten. Uit deze meetdata is vervolgens de relatieve doorlatendheid berekend. Door deze data te ijkten met MPT testen is een continu profiel van de absolute doorlatendheid bepaald over de diepte van de sonderingen) (Figuur 7-1).



Figuur 7-1: Situatietekening HPT-sonderingen Grebbedijk

De resultaten die volgen uit de HPT-sonderingen en MPT testen zijn in diepte beperkt tot de maximale sondeerlengte. Doordat er mogelijk voeding vanuit een dieper gelegen doorlatend pakket plaatsvindt is het noodzakelijk van deze formaties de doorlatendheid in te schatten. De doorlatendheid van de diepere formaties is overgenomen uit het regionale ondergrondmodel Regis II (zie 3.1 Geologie). De doorlatendheid voor de methode van Sellmeijer is vervolgens numeriek berekend met Plaxis.

7.2.1 Beschikbare informatie

Voor de bepaling van de doorlatendheid van het watervoerend pakket binnen het projectgebied is de volgende informatie gebruikt:

- Regionaal geohydrologisch ondergrondmodel Regis II (paragraaf 3.1 Geologie).



- Beschikbaar grondonderzoek [LCF 2018a] en het geotechnisch lengteprofiel (paragraaf 3.2.1).

Naast boor- en sondeeronderzoek van zowel Fugro als derden is er specifiek voor de bepaling van de doorlatendheid grondonderzoek uitgevoerd in de vorm van HPT-sonderingen in combinatie met MPT's.

In enkele gevallen zijn er MPT's minder of niet bruikbaar voor een verdere analyse. Er zijn in totaal 9 MPT testen gebruikt voor de analyse. Tabel 7-2 geeft een overzicht van het relevante grondonderzoek en de eventuele bruikbaarheid voor de analyse met bijbehorende reden.

De HPT-sonderingen en de gebruikte MPT's zijn te vinden in [LCF 2018a].

Tabel 7-2: Overzicht minipompproeven (MPT)

Locatie	Proef	Conuspunt [m NAP]	Opmerking
HPT_3.0_KR	MPT1	4,97	Geen MPT uitgevoerd, MPT2 vervangend uitgevoerd
HPT_3.0_KR	MPT2	4,46	Tweede meetreeks is verstoord en wordt niet meegenomen
HPT_3.0_KR	MPT3	-0,31	
HPT_3.0_KR	MPT4	-5,83	Geen meetreeks beschikbaar door onvolledige dissipatie
HPT_11.0_KR	MPT1	-2,08	
HPT_11.0_KR	MPT2	-10,05	Tweede meetreeks geeft meetruis en wordt niet meegenomen
HPT_11.0_KR	MPT3	-12,55	Geen MPT uitgevoerd, blijkt in kleilaag te zitten, door de zeer lage doorlatendheid kan er geen MPT uitgevoerd worden
HPT_27.0_KR	MPT1	2,39	
HPT_27.0_KR	MPT2	-1,57	
HPT_27.0_KR	MPT3	-18,29	MPT op einddiepte uitgevoerd hierdoor kan de Q/P over het gehele invloedsgebied niet bepaald worden, proef ter verificatie gebruikt
HPT_39.0_KR	MPT1	-2,46	
HPT_48.0_KR	MPT1	1,12	Geen MPT uitgevoerd, MPT2 vervangend uitgevoerd
HPT_48.0_KR	MPT2	1,06	
HPT_48.0_KR	MPT3	-8,95	

Het is bekend dat de doorlatendheid van de ondergrond sterk afhankelijk is van de betreffende formatie. De globale ligging van de formaties in het gebied is met behulp van het ondergrondmodel REGIS II bepaald.



Het resultaat van het ondergrondmodel langs het traject is weergegeven in tabel 7-3.

Tabel 7-3: Resultaat lengteprofiel ondergrond Regis II met bijbehorende doorlatendheden

Nummer	Kleur	Formatie	Doorlatendheid (Regis II) [m/d]
1	Groen	Holoceen	Niet beschikbaar
2	Paars	Kreftenheye	80
3	Grijs	Gestuwde afzetting	Niet beschikbaar
4	Geel	Waalre (zand)	55
5	Oranje	Waalre (klei)	Ondoorlatend
6	Blauw	Maassluis	

Uit het geotechnisch lengteprofiel en het beschikbare grondonderzoek blijkt dat de gestuwde formatie (3) aan de westkant van het projectgebied niet wordt aangetroffen. Aan de oostkant is deze formatie wel aanwezig.

7.2.2 Werkwijze

Voor het bepalen van de doorlatendheid voor de methode van Sellmeijer is een stappenplan gevolgd. Dit stappenplan is overgenomen en getest in het POV Piping onderzoek [POVP 2016] naar de toepassing van de HPT en MPT voor pipinganalyses. Voor de analyse zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Bepalen gemiddelde Q/P-waarde uit de betreffende HPT-sondering in het invloedsgebied van de MPT;
2. Absolute doorlatendheid berekenen uit de MPT testen;
3. De correlatiecoëfficiënt berekenen tussen de bepaalde Q/P-waarde en de doorlatendheid;
4. Bepalen en berekenen van de karakteristieke doorlatendheid over de diepte uit de betreffende HPT-sonderingen met behulp van de correlatieconstante.
5. Bepalen van de doorlatendheid van het totale watervoerend pakket, deze waarde dient als input voor de methode van Sellmeijer.

7.2.3 Relatie tussen absolute en relatieve doorlatendheid

Voor de vertaling van de relatieve (Q/P) naar de absolute doorlatendheid (K-waarde), dient de gemiddelde Q/P waarde binnen het invloedsgebied van de betreffende MPT test (stap 1) te worden gecorreleerd aan de doorlatendheid zoals bepaald uit de MPT testen (stap 2). De grootte van dit invloedsgebied is sterk afhankelijk van onder andere de opbouw van de grond en de doorlatendheid van de grond (zie tabel 7-4). In gevallen van bijvoorbeeld een dikke ondoorlatende laag onder of boven het injectiepunt, is het invloedsgebied verkleind.



Er dient ook rekening mee gehouden te worden dat de relatie tussen relatieve Q/P meting en absolute doorlatendheid afzettings-afhankelijk is. Per afzetting/formatie dient een aparte correlatie te worden bepaald. Het model dat de relatie tussen de relatieve doorlatendheid uit de HPT en absolute doorlatendheid beschrijft is lineair [POVP 2016]:

$$k = \left[\frac{1}{c} \right] * \frac{Q}{P_{HPT}}$$

Met:

k = Absolute doorlatendheid [m/d]

[1/c]=C = Afzettings-afhankelijke constante

Q = Injectiedebiet [ml/min]

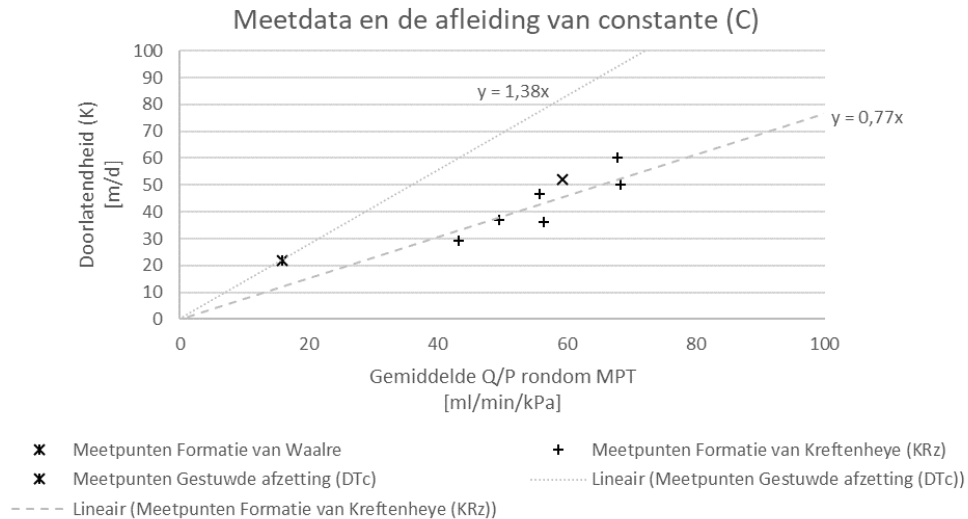
P_{HPT} = Waterdruk ten gevolge van het injectiedebiet [kPa]

Tabel 7-4: Resultaten berekening constante C

Locatie	MPT	Straal Invloedsgebied ¹⁾ [m]	Doorlatendheid (k) [m/d]	Constante (C)	Formatie
HPT_3.0_KR	MPT2	0,5	36	0,64	Kreftenheye
	MPT3	1,0	60	0,89	Kreftenheye
HPT_11.0_KR	MPT1	1,0	37	0,75	Kreftenheye
	MPT2	0,5	22	1,39	Gestuwde afzetting
HPT_27.0_KR	MPT1	1,0	16	0,30	Holoceen
	MPT2	1,0	29	0,67	Kreftenheye
HPT_39.0_KR	MPT1	2,0	50	0,73	Kreftenheye
HPT_48.0_KR	MPT2	2,0	47	0,84	Kreftenheye
	MPT3	2,0	52	0,87	Waalre

¹⁾ De grote van het invloedsgebied is afhankelijk van de laagopbouw rond het injectiepunt.

Om de natuurlijke variaties in de ondergrond (bijvoorbeeld een ondoorlatende laag) en eventuele meeton nauwkeurigheden inzichtelijk te maken zijn de afzonderlijke combinaties van doorlatendheid (k) per MPT en bijbehorende Q/P over het invloedsgebied per formatie geplot in een grafiek. Uit deze afzonderlijke punten is de gemiddelde constante (C) berekend. Hiervoor is een trendlijn toegepast die door de oorsprong gaat. De richtingscoëfficiënt van deze trendlijn is de constante (C) (stap 3). De resultaten zijn opgenomen in figuur 7-2.



Figuur 7-2: Resultaat van de datapunten en de beste fit voor de constante C als richtingscoëfficiënt

De trendlijn uit figuur 7-2 geeft de gemiddelde constante (C). In lijn met het doel van het onderzoek om een equivalente doorlatendheid van het watervoerend pakket af te leiden voor toepassing in de rekenregel van Sellmeijer, is ook de karakteristiek hoge inschatting van de gemiddelde doorlatendheid bepaald. In het projectgebied zijn drie formaties aangetroffen waaruit het watervoerend pakket bestaat, namelijk Kreftenheye, Waalre en de gestuwde afzetting. In de formatie van Kreftenheye zijn 6 MPT's uitgevoerd waarmee de karakteristieke inschatting van het gemiddelde over een laag statistisch is berekend waarbij uit is gegaan van een normale verdeling over een lokale proevenverzameling.

Voor de overige twee formaties (Waalre en de gestuwde afzetting) is slechts één MPT beschikbaar, waardoor geen statistische uitwerking te realiseren is. De MPT die in de formatie van Waalre is uitgevoerd geeft een doorlatendheid van 52 m/d, wat goed overeenkomt met de doorlatendheid volgens Regis II (55 m/d).

In het geval van de formatie van Waalre is daarom de doorlatendheid conform Regis II gehanteerd. Echter is de doorlatendheid van de gestuwde afzetting niet bepaald in Regis II, waardoor een dergelijke vergelijking niet mogelijk is. De doorlatendheid van dit pakket is daarom bepaald door de HPT-data en de MPT uit deze formatie te combineren met de gegevens van de formatie van Kreftenheye. De gestuwde afzetting bestaat immers uit een gestuwde vorm van de formatie van Kreftenheye. De verwachting is dat de verhouding tussen de gemiddelde en de karakteristieke schatting hetzelfde is voor beide formaties. Er is dus een factor op de gemiddelde waarde van de constante C van de gestuwde afzetting toegepast om de karakteristieke waarde te bepalen. Deze factor komt overeen met de berekende factor van de formatie van Kreftenheye. De karakteristiek (95%) hoge inschatting voor de C-waarden zijn opgenomen in tabel 7-5.



Tabel 7-5: Overzicht berekende correlatiecoëfficiënten (C)

Formatie	Gemiddelde correlatiecoëfficiënt (C)	Hoog karakteristieke inschatting van de correlatiecoëfficiënt (C)
Gestuwde afzetting	1,38	1,50
Kreftenheye	0,77	0,83

7.2.4 Karakteristieke doorlatendheid per laag

Uit de relatie tussen de relatieve en de absolute doorlatendheid, uitgedrukt in de hiervoor berekende C-waarden), zijn de HPT-sonderingen uitgewerkt tot continue profielen van de absolute doorlatendheid. De Q/P-grafieken zijn omgerekend naar een doorlatendheid door per laag te vermenigvuldigen met de bijbehorende constante C (stap 4). Vervolgens is de gemiddelde waarde per formatie per sondering bepaald. Omdat er is gerekend met een hoog karakteristieke C-waarde betreft dit de hoog karakteristieke doorlatendheid van deze laag. De resultaten zijn in tabel 7-6 weergegeven. De verkregen karakteristieke doorlatendheidsprofielen zijn opgenomen in bijlage 5.

Tabel 7-6: Overzicht berekende hoog karakteristieke doorlatendheden

Sondering	Formatie	Bovenkant Laag ¹⁾ [m NAP]	Onderkant Laag ¹⁾ [m NAP]	Hoog karakteristieke schatting gemiddelde doorlatendheid ¹⁾ [m/dag]
HPT_3.0_KR	Kreftenheye	+6,5	-1,0	44
	Gestuwde afzetting	-1,5	-8,5	35
HPT_11.0_KR	Kreftenheye	+4,0	-8,0	43
	Gestuwde afzetting	-10,0	-12,0	34
HPT_27.0_KR	Kreftenheye	+4,0	-10,0	40
HPT_39.0_KR	Kreftenheye	+6,5	-5,5	41
HPT_48.0_KR	Kreftenheye	+5,0	-4,5	45

¹⁾ Waarde bepaald uitsluitend voor de goed doorlatende lagen. Eventuele ondoorlatende (stoor)lagen zijn conservatief buiten beschouwing gelaten.

Zoals beschreven is voor de watervoerende lagen op grotere diepte het geohydrologische ondergrondmodel REGIS II gehanteerd. Onder de onderzochte lagen bevindt zich de goed doorlatende formatie van Waalre. Deze laag heeft, in overeenstemming met de waarneming uit de MPT (52 m/d), een door Regis II toegepaste doorlatendheid van 55 m/d. Er is daarom een doorlatendheid aangehouden van 55 m/d. Voor de formatie van Kreftenheye en de

gestuwde afzetting is de gemiddelde waarde over de sonderingen (tabel 7-6) gehanteerd. Doordat dit per sondering hoog karakteristieke waarden zijn is het gemiddelde over de sonderingen ook een hoog karakteristieke waarde. De doorlatendheden per formatie zijn weergegeven in tabel 7-7.

Tabel 7-7: Overzicht doorlatendheid per formatie

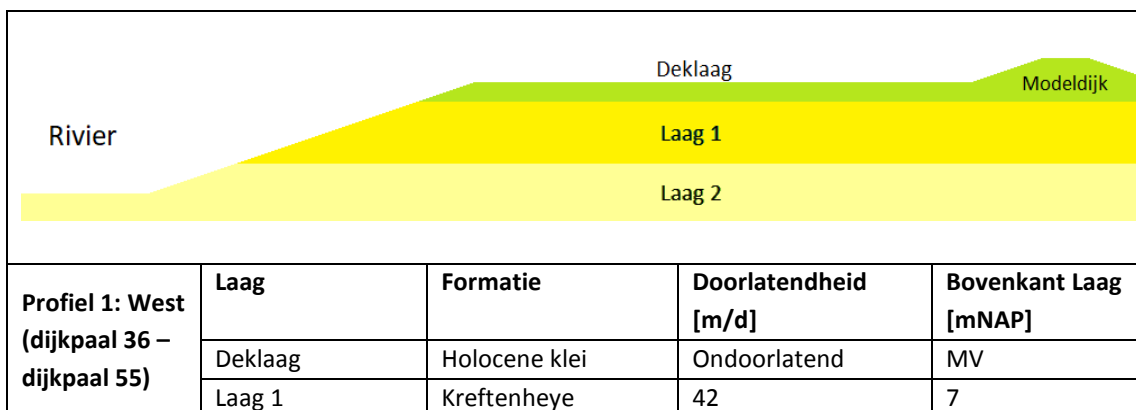
Formatie	Hoog karakteristieke doorlatendheid [m/d]
Kreftenheye	42
Gestuwde afzetting	34
Waalre	55

7.2.5 Doorlatendheid watervoerende laag (grondwaterstromingsmodellering)

De equivalente (te gebruiken in de rekenregel van Sellmeijer) doorlatendheid is bepaald door de eigenschappen van de toplaag van het watervoerend pakket (Kreftenheye en de gestuwde afzetting) en de diepe ondergrond (Waalre) toe te passen in een hydrologisch model. De rekenmethode staat beschreven in de rapportage van de doorlatendheidsschematisatie [POVP 2016]. In deze analyse is gebruik gemaakt van variant 2: de Lithostratigrafische methode. Bij deze methode worden de gegevens van de HPT terug geschematiseerd tot enkele lithostratigrafische eenheden (formaties). Vervolgens wordt met deze gelaagde opbouw één homogeen watervoerend pakket opgesteld met dezelfde doorstroomeigenschappen door een fictieve wel. Voor de analyse is gebruik gemaakt van het eindige elementen model Plaxis.

7.2.5.1 Uitgangspunten

Voor deze analyse is een fictieve, representatieve dijkopbouw, zoals die te vinden is binnen het projectgebied, toegepast. Het gaat hierbij om een veilige aanname van de doorsnede. Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om te bepalen welke parameters van positieve of negatieve invloed zijn. De fictieve profieldoorsnede en de laagopbouw per profiel is weergegeven in figuur 7-3.





	Laag 2	Waalre	55	-10
	Afsluitende laag	Waalreklei	Ondoorlatend	-43
Profiel 2: Oost (dijkpaal 1 – dijkpaal 36)	Deklaag	Holocene klei	Ondoorlatend	MV
	Laag 1	Kreftenheye	42	7
	Laag 2	Gestuwde afzetting	34	-12
	Afsluitende laag	Waalreklei	Ondoorlatend	-23

Figuur 7-3: Doorsnede profiel gebruikt in de modellering

Deklaag

Zowel de dijk als de deklaag worden conservatief gemodelleerd als zeer ondoorlatende grond. Zeer ondoorlatende grond is in deze een veilige aanname voor de bepaling van de equivalente doorlatendheid. De relatief goede doorlatendheid van de diepe formatie van Waalre wordt immers geactiveerd door de aanwezigheid van diepe stroomlijnen.

Wel

Achter de dijk naast de bekleding is een wel aangenomen met een zeer hoge doorlatendheid (1000 m/dag). Uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat een grote welafmeting de hoogste doorlatendheid oplevert. Voor deze analyse wordt daarom een veilige bovengrens van 75 cm voor de welbreedte gehanteerd [POVP 2016].

Voorland

Doordat er verschillende types voorland in het project gebied aanwezig zijn is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar het effect van het voorland. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat een lang voorland en een hoge transmissiviteit van het watervoerend pakket resulteert in een hoge equivalente doorlatendheid. Per scenario (tabel 7-8) is op basis van deze uitgangspunten met het beschikbare grondonderzoek en de geografie bepaald wat de ongunstige combinatie van parameters voor dit gebied is. Het blijkt dat er voor beide profielen niet eenduidig vast gesteld kan worden wat de meest nadelige situatie is. Daarom zijn per profiel 2 scenario's geanalyseerd. Een overzicht per profiel per samenstelling is samengevat in tabel 7-8.

Tabel 7-8 Overzicht uitgangspunten per scenario

Scenario	Ondergrond -profiel	Maximale lengte voorland (niet te gebruiken als intredepunt Sellemeijer) [m]	Geul/ plas aanwezig	Maximale afstand tot de dijk/ breedte geul of plas (niet te gebruiken als intredepunt Sellemeijer) [m] / [m]
----------	------------------------	---	------------------------	--



I	2 (oost)	1000	Ja	100 / 200
II	2 (oost)	100	Nee	nvt
III	1 (west)	1000	Ja	100 / 200
IV	1 (west)	100	Nee	nvt

Geohydrologische basis

De onderzijde van de zandlaag is begrensd door de slecht doorlatende kleiformatie van Waalre die in het model als gesloten randvoorwaarde is toegepast. De bovenzijde van deze laag is door middel van REGIS II en het beschikbare grondonderzoek (paragraaf 7.1) bepaald.

Randvoorwaarden

Het model is aan de voorlandzijde begrensd door het midden van de rivier. Uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat de bodemligging van de rivier niet van invloed is als deze minimaal tot in de diepe, goed doorlatende lagen (Laag 2) reikt. Voor de modelgrens aan de binnendijkse zijde is het van belang dat de opgelegde randvoorwaarde geen versturende invloed heeft op het resultaat. Deze grens dient daarmee voldoende ver van het interessegebied te liggen. Deze afstand is benaderd door 3x de spreidingslengte conform [TRZW 1999] te hanteren:

$$\lambda = \sqrt{k_z D_z c}, \text{ met } c = \frac{D_k}{k_k}$$

Met:

- k_z = Doorlatendheid zand [m/d]
- k_k = Doorlatendheid deklaag [m/d]
- D_z = Dikte zandlaag [m]
- D_k = Dikte deklaag [m]

7.2.5.2 Modelresultaten

De modelresultaten zijn weergegeven in tabel 7-9.

Tabel 7-9 Overzicht resultaten per scenario

Scenario	Equivalentente doorlatendheid [m/d]
I	40,1
II	40,5
III	46,5
IV	45,3



Uit Tabel 7-9 blijkt dat in deze situatie het verschil in equivalente doorlatendheid nauwelijks afhankelijk is van de verschillende scenario's. Het ligt daarom voor de hand om voor ieder profiel één doorlatendheid te hanteren, onafhankelijk van de geometrie van het voorland dat aanwezig is. Voor profiel 1: west is daarom een doorlatendheid aangehouden van 47 m/d en voor profiel 2: oost een doorlatendheid van 41 m/d. De grens tussen profiel 1 en profiel 2 ligt nabij dijkpaal 36. Hier blijkt uit de sonderingen dat de kleilaag significant in dikte afneemt.

7.3 Korrelgrootte D_{70}

Voor de methode van Sellmeijer is de korrelgrootte direct onder de cohesieve laag, de locatie waar de pipe zou kunnen ontwikkelen, van belang. In de Nadere Veiligheidsanalyse [NVA, 2018] zijn daartoe 37 korrelverdelingen geanalyseerd. Conform het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [TRZW 2012] is uit die korrelverdelingen een korrelgrootte bepaald die overeen komt met 70-percentielwaarde van de korrelverdeling, ofwel de D_{70} -waarde. Voor de methode van Sellmeijer is vervolgens de lage karakteristiek inschatting van het laaggemiddelde voor een regionale waarnemingsbestand afgeleid. Uit de 37 beschikbare korrelverdelingen, waarvan er drie niet zijn meegenomen (in grind), blijkt dat de karakteristieke D_{70} -waarde 307 μm is. Uit het regionale ondergrondmodel is de verwachting dat de zandlaag direct onder de cohesieve laag binnen het projectgebied uit één formatie, de formatie van Kreftenheye, bestaat (zie paragraaf 3.1 Geologie). Op basis van dit gegeven is het daarom aannemelijk dat er binnen het projectgebied geen (deel)gebieden aan te wijzen zijn waar een significant hogere of lagere D_{70} -waarde te verwachten is. Binnen deze verkenning wordt daarom een karakteristieke korrelgrootte D_{70} van 307 μm gehanteerd.

7.4 Intrede- en uittredelijijn

Op basis van het beschikbare grondonderzoek (deklaagdiktes) en peilbuismetingen zijn de intrede- en uittredelijijn bepaald. Hiervoor wordt verwezen naar Bijlage 2.

7.5 Samenvatting

In het kader van de verkenning is nader grondonderzoek uitgevoerd [LCF 2018a]. Op basis van dit onderzoek is een gedetailleerde analyse uitgevoerd naar de parameters die gehanteerd worden in de formule van Sellmeijer. Een overzicht van deze parameters is weergegeven in Tabel 7-9.

Tabel 7-10 Samenvatting parameters Sellmeijer

Traject	D_{kar} [m]	k_{kar} [m/d]	$D_{70, kar}$ [μm]
Dp 0-4	30	41	307
Dp 4-35,5	25	41	307
Dp 35,5-54,5	50	47	307

WVP = watervoerend pakket



D_{kar} = karakteristieke dikte WVP

k_{kar} = karakteristieke waarde doorlatendheid WVP

$D_{70;kar}$ = karakteristieke 70-percentielwaarde van de korrelverdeling

Op basis van het beschikbare grondonderzoek (deklaagdiktes) en peilbuismetingen zijn de intrede- en uittredelijns bepaald. Hiervoor wordt verwezen naar Bijlage 2. Opgemerkt wordt dat in de berekeningen voor traject dp0-35,5 is uitgegaan van een dikte van het watervoerend pakket van 30m. In Tabel 7-9 is een nadere detaillering van de dikte van het watervoerend pakket aangebracht. Het effect hiervan op de berekeningsresultaten is echter verwaarloosbaar.



8 Aanbevelingen

Tussen dijkspaal 36 en 43 is het onzeker of de kleilaag op een diepte van NAP -15m doorlopend is. Het wel of niet doorlopen van de kleilaag heeft invloed op het vaststellen van de benodigde kwelweglengte. Voor de verkenningsfase wordt geadviseerd uit te gaan van de conservatieve aanname dat deze niet doorlopend is. Door aanvullend onderzoek voor de planfase kan dit geoptimaliseerd worden met het aanvullend grondonderzoek wat in die fase benodigd is.

Op dit moment zijn 5 HPT sonderingen uitgevoerd. Dit is voldoende voor de verkenningsfase (ontwerp op SO niveau). Voor de planfase (ontwerp op DO niveau) wordt geadviseerd om deze dichtheid te vergroten naar een hart op hart afstand van ca. 200m. Hierdoor kan de grens tussen het oostelijk en westelijk profiel nauwkeuriger worden ingeschat. Daarnaast zijn nu zowel in de formatie van Waalre als in de gestuwde afzetting slechts één MPT uitgevoerd. Geadviseerd wordt om in deze formaties aanvullende MPT's uit te voeren, zodat de pipingopgave nauwkeuriger kan worden vastgesteld.

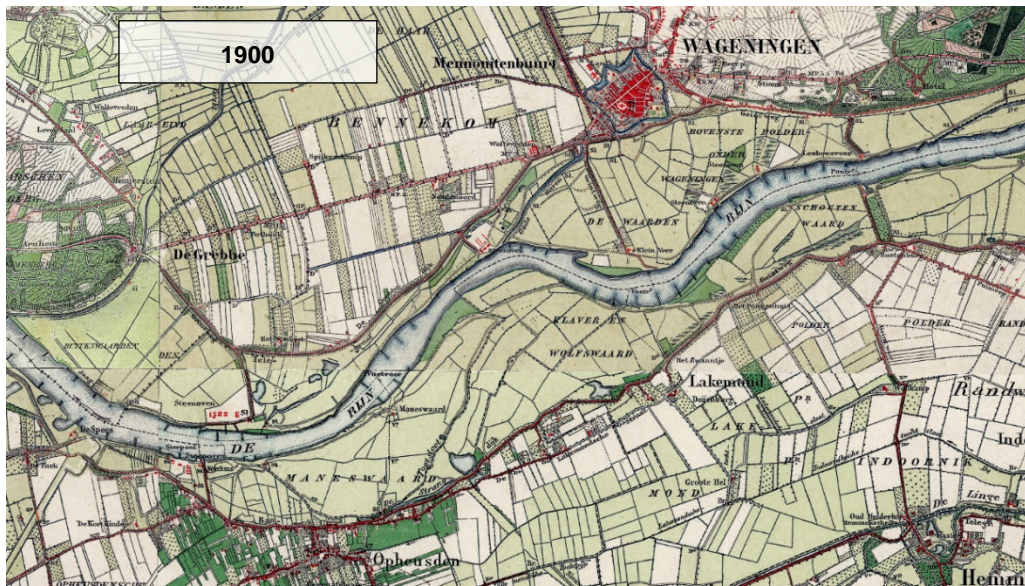
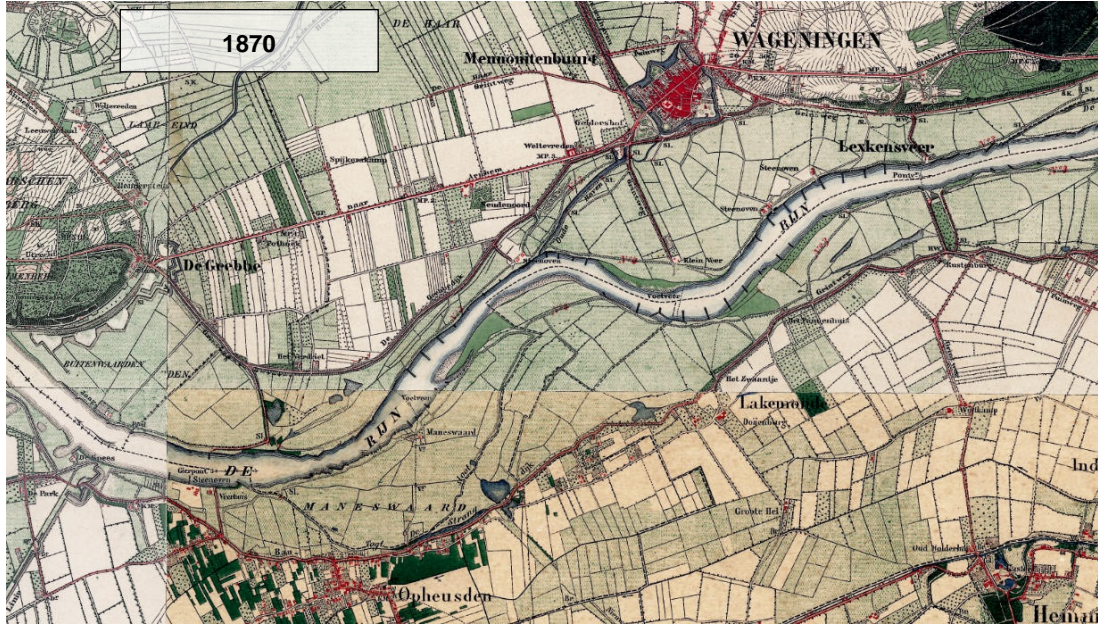
Uit het geofysisch onderzoek komt naar voren dat er een wegcunet van zand aanwezig is onder de asfaltverharding. Het is nu nog niet mogelijk om met zekerheid te zeggen over welke breedte dit cunet aanwezig is over het dwarsprofiel. Dit heeft invloed op de aannames van de verzadiging van het dijklichaam. Bij een smal wegcunet zal het water minder makkelijk kunnen intreden vanwege het kleilichaam aan de buitenzijde. Bij een breed cunet is het tegenovergestelde het geval. Voor de verkenningsfase wordt er van uitgegaan dat het wegcunet alleen onder de weg aanwezig is. Geadviseerd wordt om voor de planfase een aantal proefsleuven te graven en boorkernen uit te voeren om deze aanname te verifiëren.



Bijlagen

Bijlage 1	Historisch kaartmateriaal
Bijlage 2	Analyse peilbuisgegevens
Bijlage 3	Geotechnisch lengteprofiel
Bijlage 4	Geotechnische sterkteparameters
Bijlage 5	Doorlatendheidsprofielen
Bijlage 6	Bepaling autonome bodemdaling







Bron: Topotijdreis.nl



Bijlage 2 Analyse peilbuisgegevens



Project	: Verkenning Grebbedijk
Onderwerp	: Analyse peilbuizen
Datum	: 24 augustus 2018
Projectnr LCSO/Fugro	: 17M3041_Verkenning_Grebbedijk
Opgesteld door	: ir. M. Hop
Gecontroleerd door	: drs. B.M. Berbee
Vrijgegeven	: ir. B. Rijnveld

1 Doel en aanleiding

Uit de Nadere Veiligheidsanalyse blijkt dat er bij de Grebbedijk een significante versterkingsopgave is voor de mechanismen piping en macrostabiliteit [RHDHV 2018]. In [RHDHV 2018] is echter slechts beperkt rekening gehouden met het aanwezige voorland.

Om meer inzicht in de weerstand van het voorland en de respons op het buitenwater in het achterland te verkrijgen zijn door Waterschap Vallei en Veluwe (WSVV) peilbuizen en waterspanningsmeters geplaatst. Daarnaast heeft WSVV al een bestaand peilbuizen netwerk. Doel van deze memo is het analyseren van deze peilbuisgegevens om de volgende parameters nauwkeuriger te bepalen:

- Doorlatendheid deklaag voor en achterland
- Fictieve voorlandlengte
- Respons stijghoogte achterland
- Respons grondwaterstand dijklichaam

Bovenstaande parameters worden gebruikt in de analyses voor piping, heave, opbarsten en macrostabiliteit. De doorlatendheid van de deklaag is van belang voor het bepalen van de fictieve voorlandlengte. De fictieve voorlandlengte bepaald hoeveel voorland er in rekening gebracht mag worden voor piping. De respons van de stijghoogte in het achterland is van belang voor de analyses heave, opbarsten en macrostabiliteit. Met behulp van de respons wordt de stijghoogte bepaald tijdens maatgevende omstandigheden. De respons van de grondwaterstand in het dijklichaam is van belang voor de analyse van de macrostabiliteit. Uit de respons wordt de grondwaterstand tijdens maatgevende omstandigheden bepaald.

Bovenstaande parameters zijn bepaald door het analyseren van verschillende meetreeksen (langdurig en recent) van peilbuizen en waterspanningsmeters tijdens het hoogwater van 2017-2018 met behulp van analytische formules en numerieke modellering in Plaxis/PlaxFlow.



NOTITIE

In hoofdstuk 2 worden de meetresultaten behandeld. Hoofdstuk 3 beschrijft de gebruikte methode en uitgangspunten. Hoofdstuk 4 omvat de resultaten van de analytische analyse. In hoofdstuk 6 volgen de resultaten van de numerieke analyse in Plaxis/PlaxFlow. De conclusies worden besproken in hoofdstuk 6.

1.1 Gebruikte informatie

Voor dit document is gebruik gemaakt van de volgende informatie:

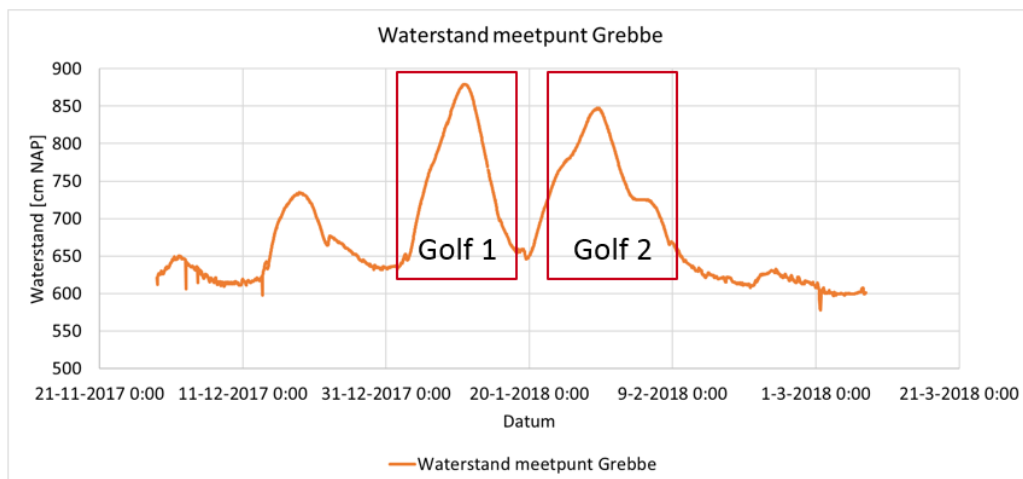
- [Deltares 2014] Vooronderzoek Grebbedijk piping risico's bij Blauwe kamer, Deltares Juni 2014, 1208977-000-GEO-0004
- [DHV 2001] Piping-analyse Grebbedijk, DHV,2001
- [LCF 2018a] Geotechnisch onderzoek Verkenning Grebbedijk, LievenseCSO Fugro, 17M3041-R-004-V02, 18 juni 2018
- [LCF 2018b] Karakterisering Grebbedijk, LievenseCSO-Fugro, 17M3041-R-006-V02, 22 juni 2018,
- [LCF 2018c] Uitgangspuntendocument verkenning Grebbedijk, LievenseCSO Fugro, 17M3041-R-005-V02, 22 juni 2018
- [RHDHV 2018] Dijkversterking Grebbedijk - Nadere veiligheidsanalyse, rapport RHDHV WATBE8333R002F003, versie 007, 24 januari 2018
- [SHPIP 2017] Schematiseringshandleiding piping, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2 januari 2017
- [TR 1999] Technisch rapport zandmeevoerende wellen, Technische adviescommissie voor de waterkeringen (TAW), maart 1999
- [TR 2004] Technisch rapport waterspanningen bij dijken, Technische adviescommissie voor de waterkeringen (TAW), september 2004
- [WSVV 2018] Meetdata langdurige peilbuismetingen verkregen via mail op 31 maart 2018
- [Eijkel 2018a] Meetdata peilbuizen en waterspanningsmeters gedownload via TeleControlNet op 15 maart 2018
- [Eijkel 2018b] Boorstaten peilbuizen en waterspanningsmeters verkregen via mail op 14 mei 2018

2 Open waterstanden

Er is ter plaatse van de peilbuismetingen geen meting van de buitenwaterstand beschikbaar. De waterstand ter plaatse is daarom bepaald door lineaire interpolatie tussen twee beschikbare meetpunten, zie bijlage 1.



NOTITIE



Figuur 2-1 Waterstand meetpunt Grebbe gedurende hoogwater tussen november 2017 en maart 2018

De waterstand tijdens het hoogwater is weergegeven in figuur 2-1. Er zijn drie 'pieken' te zien. Op basis van de waternormalen wordt de eerste piek niet gerekend tot hoog water. De twee resterende pieken worden respectievelijk golf 1 en golf 2 genoemd in deze notitie.

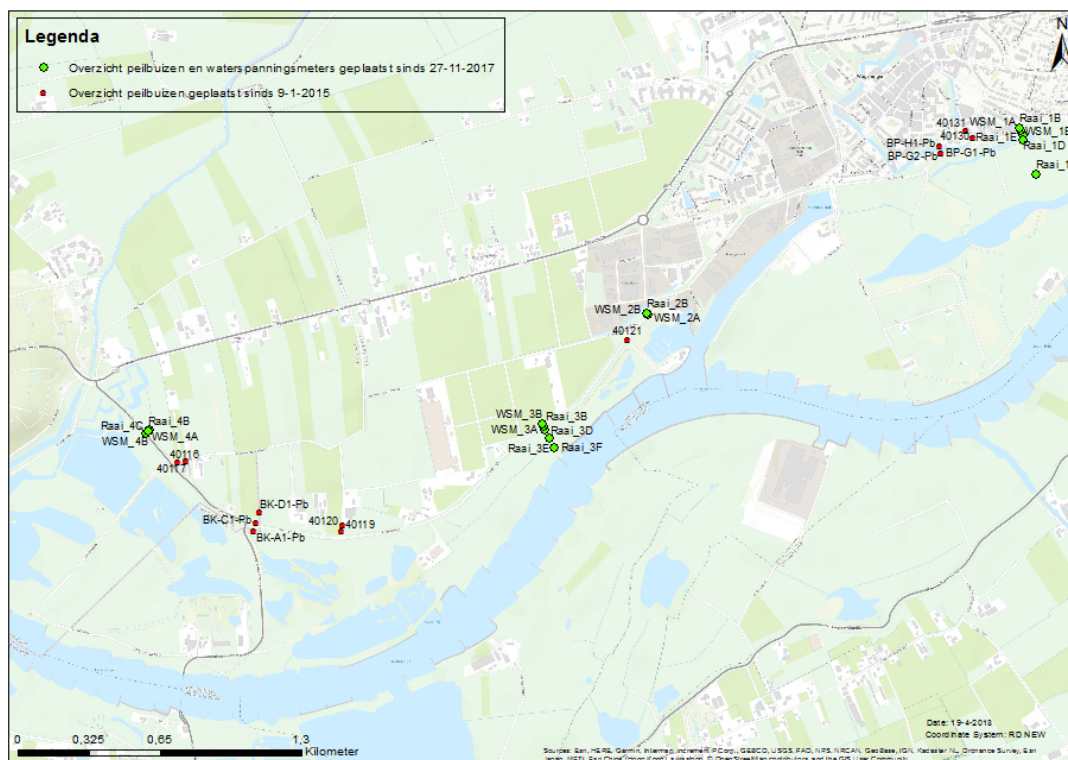
Voor het polderpeil zijn de streefpeilen bekend, het is ook bekend dat tijdens hoogwater de polderpeilen worden opgezet tot ca. 20 tot 40 cm onder maaiveld.

3 Meetresultaten

Voor de analyse en bepaling van de benodigde parameters zijn verschillende meetreeksen beschikbaar gesteld door het Waterschap. De locatie van de meetinstrumenten is weergegeven in figuur 3-1. De meetresultaten zijn op te delen in langdurig (meerdere jaren) en kortdurend (sinds eind november 2017). De langdurige meetreeksen zijn beschikbaar sinds 9-1-2015 [WSVV 2018] en zijn weergegeven in rood. Deze meetreeksen zijn verkregen uit peilbuizen in voornamelijk het dijklichaam en achterland. De recent gemeten data is beschikbaar sinds 27-11-2017 (weergegeven in groen) en is uitgevoerd door Eijkelkamp, de data is beschikbaar en gedownload via TeleControlNet [Eijkel 2018a]. De recent verkregen meetdata bestaat uit stijghoogtes verkregen uit peilbuizen in het voor en achterland, en grondwaterstanden in het dijklichaam gemeten met waterspanningsmeters. Voor beide meetreeksen geldt dat het opgetreden hoogwater tussen december 2017 en februari 2018 is gemeten.



NOTITIE



Figuur 3-1 Overzicht locatie peilbuizen en waterspanningsmeters

3.1 Kortdurende meetreeksen

De recent geplaatste peilbuizen en waterspanningsmeters zijn geplaatst in vier meetraaien zoals te zien op figuur 3-1. In tabel 3-1 staat aangegeven welke apparatuur er per raai geplaatst is. In figuur 3-2 staat de codering en locaties in het dwarsprofiel van het dijklichaam aangegeven. Alle vier de raaien bevatten waterspanningsmeters in de binnenkruin (dijklichaam) en binnenteen (deklaag). Alle raaien bevatten eveneens een peilbuis in de binnenteen van de dijk (watervoerend pakket). Daarnaast bevatten raai 1 en raai 3 beide drie peilbuizen in het voorland (watervoerend pakket). In bijlage 2 staan gedetailleerde plaatsingsgegevens weergegeven.

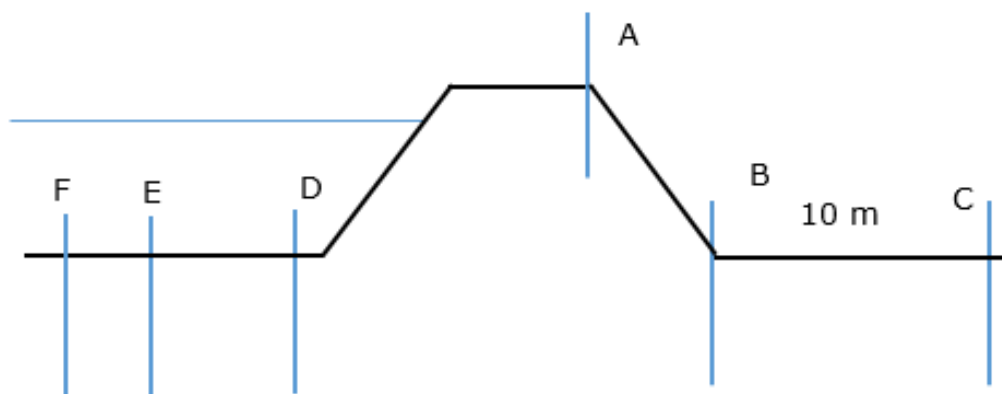
Tabel 3-1 Overzicht geplaatste apparatuur

Locatie	Raai 1, DP2	Raai 2, DP22	Raai, 3 DP29	Raai 4, DP51
A	Waterspanningsmeter	Waterspanningsmeter	Waterspanningsmeter	Waterspanningsmeter
B	Peilbuis, Waterspanningsmeter	Peilbuis, Waterspanningsmeter	Peilbuis, Waterspanningsmeter	Peilbuis, Waterspanningsmeter
C				Peilbuis
D	Peilbuis		Peilbuis	



NOTITIE

E	Peilbuis		Peilbuis	
F	Peilbuis		Peilbuis	



Figuur 3-2 Overzicht locatie en naamgeving meetapparatuur

De verschillende meetreeksen zijn geanalyseerd op betrouwbaarheid zie bijlage 3. Enkele meetreeksen vertonen onbetrouwbare afwijkingen. Voor de meetresultaten van meetpunten 1F en 1D heeft het beheersysteem aangegeven dat er een storing heeft voor gedaan tijdens de eerste hoogwatergolf. Daarom zijn de gegevens van de eerste hoogwatergolf voor deze twee meetpunten niet meegenomen. Meetraai 3 bestaat uit 4 meetpunten. De meetpunten 3D, 3E en 3F staan in het voorland en onlogische resultaten zien. Er is geen duidelijk aan te wijzen oorzaak van deze afwijkingen. Wegens de onlogische resultaten worden deze 3 meetpunten niet meegenomen in de analyse. Meetpunt 3B wordt wel meegenomen in de analyse.

3.2 Langdurig meetreeksen

In tabel 3-2 staan de peilbuizen opgesomd waarvan langdurige en complete meetreeksen beschikbaar zijn [WSVV 2018]. Enkele meetreeksen missen het hoogwater van 2017-2018, of zijn niet compleet, deze meetreeksen worden niet meegenomen in de analyse (aangegeven in oranje). De overgebleven meetreeksen worden gebruikt om de respons van de stijghoogte in het watervoerend pakket te bepalen.

Tabel 3-2 Langdurige peilbuis instrumenten

Id	Dijkpaal	Naam	Bovenkant peilbuis	opmerkingen
40116	48,5	Grebbedijk Ruinemans halverwege	8,61	Achterland
40117	48,5	Grebbedijk Ruinemans beneden	8,57	Achterland



NOTITIE

40119	40	Grebbedijk W.Rooyen halverwege	9,98	Hoogwater 2017-2018 niet aanwezig
40120	40	Grebbedijk W.Rooyen beneden	9,64	Achterland
40121	23	Grebbedijk Helderich boven	12,26	Hoogwater 2017-2018 niet aanwezig
40130	4	Grebbedijk Van Lent halverwege	9,05	Achterland
40131	4	Grebbedijk 't Spijk beneden	8,87	Achterland
BP-A1-Pb	44	BP-A1-Pb	7,695	Zeer korte reeks <4 Maanden Hoogwater 2017-2018 niet aanwezig
BK-C1-Pb	44	BK-C1-Pb	7,957	Achterland
BP-D1-Pb	44	BP-D1-Pb	7,006	Hoogwater 2017-2018 niet aanwezig
BP-G1-Pb	6	BP-G1-Pb	8,49	Achterland
BP-G2-Pb	6	BP-G2-Pb	8,507	Achterland
BP-H1-Pb	6	BP-H1-Pb	8,614	Achterland

4 Methode en uitgangspunten

4.1 Methode

Om de benodigde parameters te bepalen worden de verschillende meetreeksen geanalyseerd hiervoor is gebruikt gemaakt van [TR1999] en [TR2004]. Hieronder staat per parameter de gebruikte methode.

Respons stijghoogte

De respons van de stijghoogte in het watervoerend pakket in de binnenteen wordt bepaald door het optredende hoogwater uit te zetten tegen de gemeten stijghoogte in de peilbuizen in het watervoerend pakket. De respons van de stijghoogte wordt bepaald door



NOTITIE

een extrapolatie van de meetreeks naar maatgevende omstandigheden. Hiertoe wordt een raaklijn aan het stijgende gedeelte van de grafiek getrokken. Daarnaast wordt de stijghoogte tijdens dagelijkse omstandigheden bepaald.

Respons grondwaterstand dijklichaam

De respons van de grondwaterstand in het dijklichaam wordt bepaald door het optredende hoogwater uit te zetten tegen de gemeten stijghoogte/grondwaterstand in de waterspanningsmeters in het dijklichaam. De respons van de grondwaterstand wordt bepaald door extrapolatie van de meetreeks naar maatgevende omstandigheden. Hiertoe wordt een raaklijn aan het stijgende gedeelte van de grafiek getrokken. Daarnaast wordt de grondwaterstand tijdens normale omstandigheden bepaald.

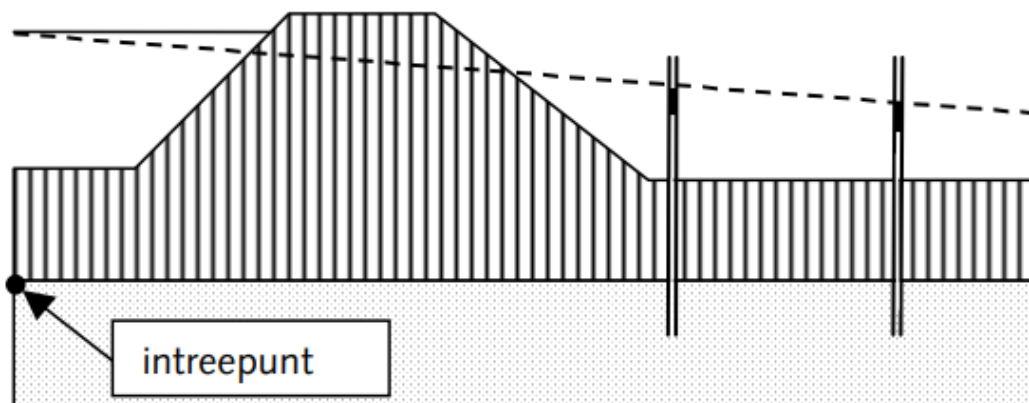
Doorlatendheid deklaag voor en achterland

Doormiddel van analytische formules beschreven in [TR 2004] wordt het stijghoogte verloop benaderd. Door het aanpassen van doorlatendheden van het voor en achterland wordt er een fit gemaakt op de gemeten stijghoogtes. Deze analyse wordt in Excel uitgevoerd. Voor het maken van de fit zijn zoveel mogelijk datapunten op een meetraai benodigd. Uit de validatie van de meetresultaten in hoofdstuk 2 komt naar voren dat alleen meetraai 1 tijdens de 2^e hoogwatergolf beschikbaar is voor analyses. Dit komt omdat meetraai 3 niet verklaarbare resultaten vertoont. Naast de analytische analyse is een verificatie met een numeriek model (Plaxis) uitgevoerd voor meetraai 1.

Intrede en uittredepunt

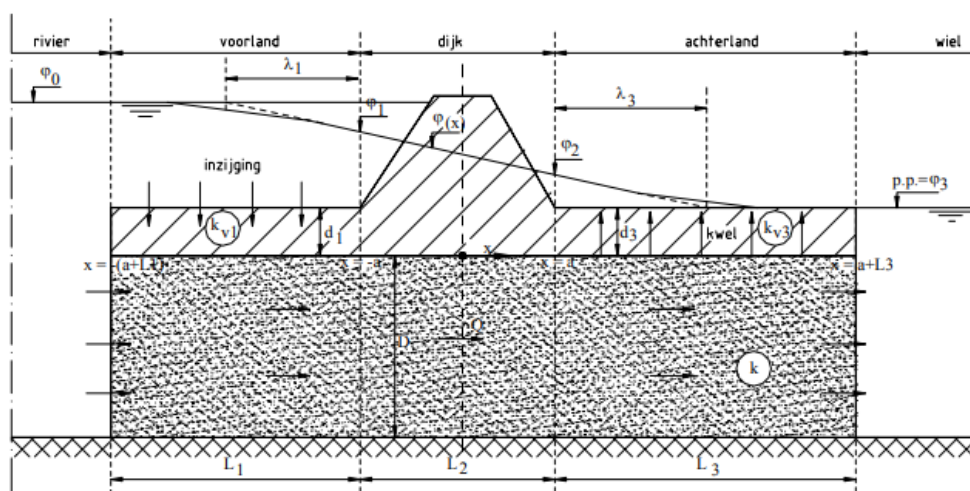
Het intrede en uittredepunt zijn van belang voor het faalmechanisme piping. Het intredepunt wordt bepaald door een raaklijn door de meetresultaten te trekken conform [TR 2004], zie figuur 4-1. De locatie waar deze raaklijn de buitenwaterstand snijdt geeft een indicatie van het intredepunt. Deze methode is alleen geschikt als er meerdere meetpunten op een rij beschikbaar zijn. Uit de validatie van de meetresultaten in hoofdstuk 2 komt naar voren dat alleen meetraai 1 tijdens de 2^e hoogwatergolf beschikbaar is voor deze methode.

NOTITIE



Figuur 4-1 Bepaling van intreepunt uit peilbuiswaarnemingen [TR 2004]

Op basis van de verkregen doorlatendheden van het voorland en deklaagdiktes wordt met behulp van analytische formules de fictieve voorlandlengte bepaald conform [SHPIP 2017] voor de overige locaties. Op basis van de fictieve voorlandlengte wordt het intredepunt bepaald. Waarbij opgemerkt moet worden dat wanneer de fictieve voorlandlengte groter wordt dan twee keer de dijkbasis (buitenteen tot uittredepunt) de beheerder moet aantonen met aanvullende checks dat de fictieve lengte volledig meegenomen mag worden [SHIP 2017]. De basis van deze berekening is de schematisatie weergegeven in figuur 4-2.



Figuur 4-2 Schematisering van grondwaterstroming ter plaatse van een kleidijk [TR 2004]

Het uittredepunt is het punt waar de verschil waterdruk hoger is dan het effectief verticaal gewicht. Het uittredepunt wordt bepaald door analyse van de meetreeksen (treedt opbarsten op) en een realistische inschatting gebaseerd op deklaagdiktes en aanwezige



NOTITIE

waterpartijen. In de praktijk ligt dit punt ter plaatse van de binnenteen van de dijk of bij een (kop)sloot.

4.2 Uitgangspunten

Watersysteem

Tijdens normale omstandigheden ligt de Neder-Rijn in haar zomerbed, waarbij de waterstanden tijdens dagelijkse omstandigheden variëren tussen NAP+5,85 m en NAP+7,50 m. Door de hoge gronden van de Grebbeberg en de Wageningse berg is er een regionale kwelstroom naar de rivier toe. Het effect van deze kwelstroom is beschreven in [LCF 2018b].

Deklaag

De dikte van de deklaag volgt uit de deklaagdikte kaart [LCF 2018a].

Watervoerend pakket

Voor het maken van de fit op de meetresultaten van raai 1 wordt er gebruikt gemaakt van gemiddelde waardes. De gemiddelde waarde voor de dikte van het watervoerend pakket en doorlatendheid van het watervoerend pakket zijn weergegeven in tabel 4-1.

Tabel 4-1 Parameters watervoerend pakket voor meetraai 1

D_{gem} [m]	K_{gem} [m/d]
22	39

Voor het bepalen van de intredepunten doormiddel van de bepaling van de fictieve voorlandlengtes wordt er gebruik gemaakt van karakteristieke waarde die beschreven staan in [LCF 2018c] en weergegeven zijn in tabel 4-2.

Tabel 4-2 karakteristiek waardes te gebruiken voor bepaling fictieve voorlandlengte [LCF 2018c]

Traject	D [m]	k_{kar} [m/d]
0-4	30	41
4-35,5	25	41
36-54,5	50	47

Polderpeil

Voor de polderpeilen worden de waardes gebruikt zoals gepresenteerd in [LCF 2018b]. Het is bekend dat tijdens hoogwater de watergangen worden opgezet tot ca 0,2-0,4 m onder

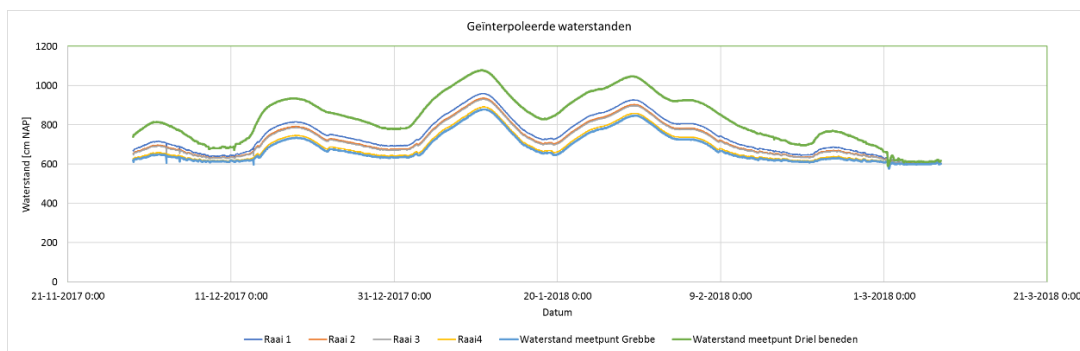


NOTITIE

maaiveld. Aangenomen wordt dat het polderpeil zich 40 cm onder maaiveld bevindt. Voor de stadsgracht wordt het polderpeil aangehouden.

Waterstand Neder-Rijn

De buitenwaterstanden ter plaatse van de peilbuizen zijn niet gemeten. De buitenwaterstand ter plaatse van de peilbuizen wordt berekend uit de lineaire interpolatie van de waterstanden van meetpunt 'Grebbe' en 'Driel beneden' die verkregen zijn via waterinfo.rws.nl. De geïnterpoleerde waterstanden zijn weergegeven in Figuur 4-3. De gebruikte gegevens en analyse staat in bijlage 1. Hoogwatergolf 1 loopt van 2 januari tot 18 januari 2018, hoogwatergolf 2 loopt van 20 januari tot 12 februari 2018.



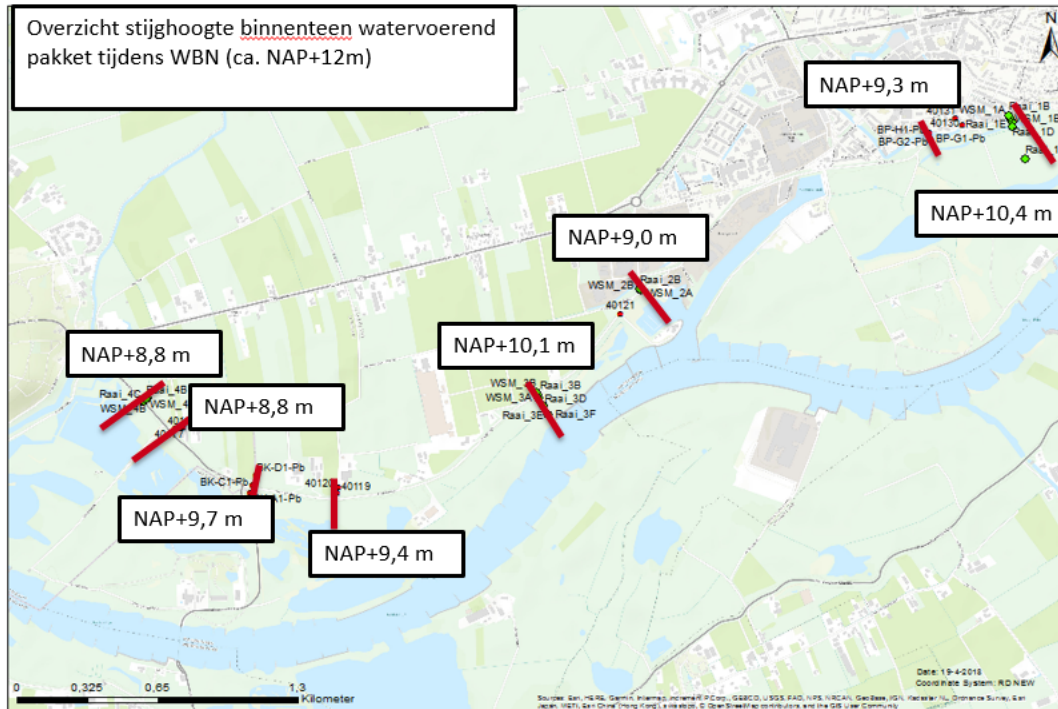
Figuur 4-3 Geïnterpoleerde waterstanden t.b.v. van analyse meetreeksen

5 Analyse

5.1 Respons stijghoogte

De respons voor de stijghoogte is bepaald voor alle peilbuizen voor de 1^e en 2^e hoogwatergolf in het achterland. De responsgrafieken zijn weergegeven in bijlage 3. De geëxtrapoleerde stijghoogtes tijdens maatgevend hoogwater van ca. NAP+12,0 m zijn weergegeven in figuur 5-1. Geadviseerd wordt om voor het gehele dijktraject een stijghoogte in de binnenteen van NAP +10,5m tijdens maatgevende condities aan te houden.

NOTITIE

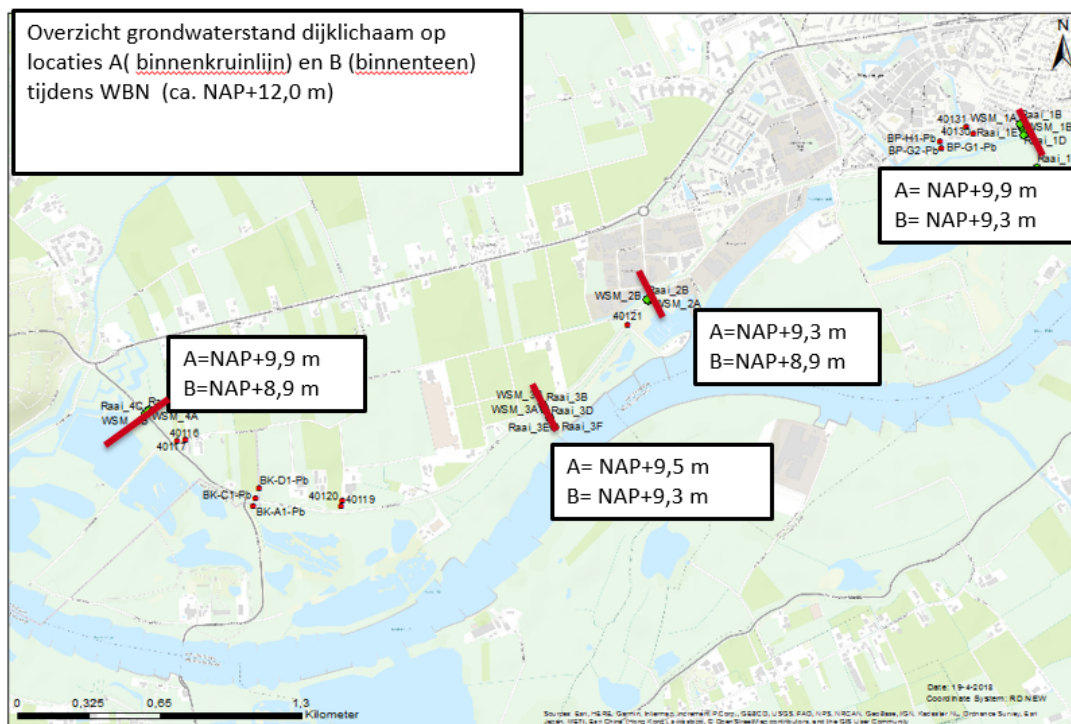


Figuur 5-1 Stijghoogte watervoerend pakket binnenteen bij WBN (ca. NAP+12 m)

5.2 Respons freatische lijn

De respons voor de freatische lijn ter plaatse van de binnenkruinlijn is bepaald voor alle waterspanningsmeters voor de 1^e en 2^e hoogwatergolf. De responsgrafieken zijn weergegeven in bijlage 5. De grondwaterstand tijdens maatgevend hoogwater van ca. NAP +12,0 m zijn weergegeven in figuur 5-2. Geadviseerd wordt om voor het gehele dijktraject de freatische lijn in de binnenkruinlijn onder maatgevende condities op NAP +10 m aan te houden.

NOTITIE



Figuur 5-2 Respons grondwaterstand klei dijklichaam voor binnenkruinlijn (A) en binnenteen (B)

5.3 Doorlatendheid voor en achterland

De doorlatendheid van de deklaag in het voor en achterland is van belang voor het stijghoogte verloop. De doorlatendheid is bepaald door een fit te maken op de meetresultaten uit meetraai 1. Omdat de meetresultaten tijdens de eerste hoogwatergolf voor de locaties 1D en 1F onbetrouwbaar zijn wegens een storing wordt de fit uitgevoerd op de tweede hoogwatergolf. Uit de fit op de meetresultaten volgt een doorlatendheid van 0,04 m/dag. De analyse is terug te vinden in bijlage 6. In hoofdstuk 6 is een numerieke analyse m.b.v. Plaxis uitgevoerd op dezelfde meetraai. Uit de numerieke analyse volgt een doorlatendheid van 0,01 m/d. Geadviseerd wordt om een doorlatendheid van 0,05 m/dag aan te houden om effecten van heterogeniteit in de doorlatendheid van de deklagen te ondervangen.

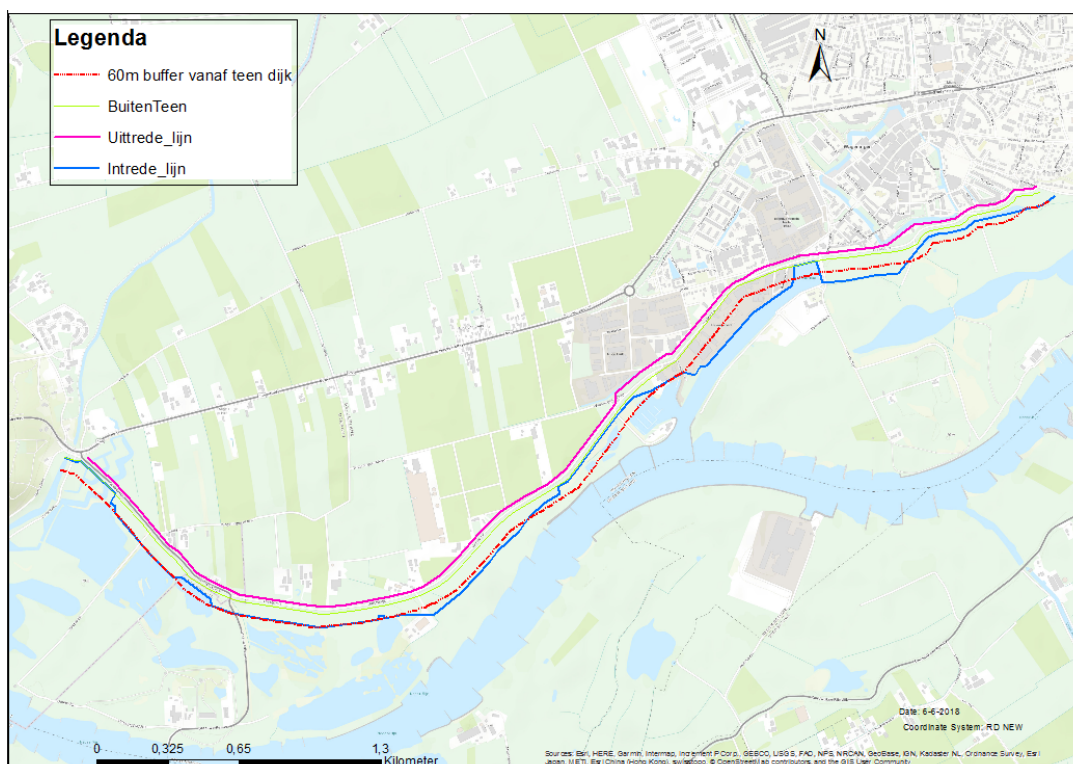
5.4 Intrede en uittredepunt

Het intrede en uittredepunt is van belang voor de piping analyse. Hierbij bepaald de afstand tussen deze twee punten de aanwezige kwelweglengte. Voor meetraai 1 gebeurt het aan de hand van de meetgegevens weergegeven in een dwarsprofiel zoals beschreven in paragraaf 4.1. Voor de overige locaties is het bepaald d.m.v. analytische formules en de verkregen doorlatendheden van de deklaag. De analyses staan gepresenteerd in bijlage 3.



NOTITIE

De resulterende intredepunten zijn weergegeven in een lijn langs het dijktraject in figuur 5-3. In tabel 7-1 zijn per dijktraject de aanwezige kwelweglengtes in het voorland weergegeven.



Figuur 5-3 Overzicht intrede en uittrede lijnen

Tabel 5-1 Aanwezige kwelweglengte voorland

Locatie	Fictieve voorlandlengte [m]
DP 0-1,5	60
DP 1,5-3	30
DP 3-4	30
DP 4-8	25
DP 8-11	100
DP 11-12,5	5
DP 12,5-20	130
DP 20-23 Sloot (voor =achterland)	20
DP 20-23 geen sloot	0
DP 23-27,5	10
DP 27,5-30	35
DP 30-35,5	80
DP 35,5-37	60
DP 37-44	45



NOTITIE

Locatie	Fictieve voorlandlengte [m]
DP44-46,5	25
Dp 46,5-51,5	60
DP51,5-54 Kistdam	0

Voor de uittredepunten wordt geadviseerd de binnentoe van de dijk of achterliggende watergang (indien aanwezig) aan te nemen. De meest waarschijnlijke uittredepunten zijn uitgezet op een lijn en weergegeven in figuur 5-3. Hierin is geen rekening gehouden met de aanwezige kopsloten.

6 Plaxis analyse

6.1 Inleiding

Om de resultaten uit de analytische modellering te controleren is voor raai 1 een 2D model in het programma Plaxis opgezet. Hiermee kunnen variaties in deklaagdikte en geometrie van het voorland nauwkeuriger worden gemodelleerd dan dat dit met analytische modellen mogelijk is. Wegens de 3D eigenschappen van de binnendijkse randvoorwaarde (grondwaterstandsverloop a.g.v. het Veluwe massief) is het model minder geschikt voor het bepalen van de respons in het achterland, voor deze locatie (achterland) zijn de resultaten van het model slechts een indicatie. Het model is wel goed geschikt voor het bepalen van de weerstand in het voorland. Het voorland op grote afstand is slechts in hoofdlijnen gemodelleerd, aangezien gedetailleerd grondonderzoek uitsluitend in een zone van ca. 100 m buiten de dijkteen beschikbaar is.

6.2 Instationaire effecten

Het model is stationair doorgerekend. Er is echter geen aandacht besteed aan het nauwkeurig bepalen van eventuele tijdsafhankelijke effecten (bergingseigenschappen). De reden hiervoor is dat de stuwwal van de Veluwe ten oosten van Wageningen hier waarschijnlijk een grote, zo niet bepalende, rol in speelt in de opstuwing en daarmee vertragingen van de grondwaterstroming, maar dat deze randvoorwaarde niet eenvoudig in een 2D model te vatten is. Een 3D modellering voegt in deze situatie ook niet veel toe, aangezien er onvoldoende peilbuizen in Wageningen – Hoog voorhanden zijn. In Figuur 6-1 is weergegeven hoe het model is opgebouwd.

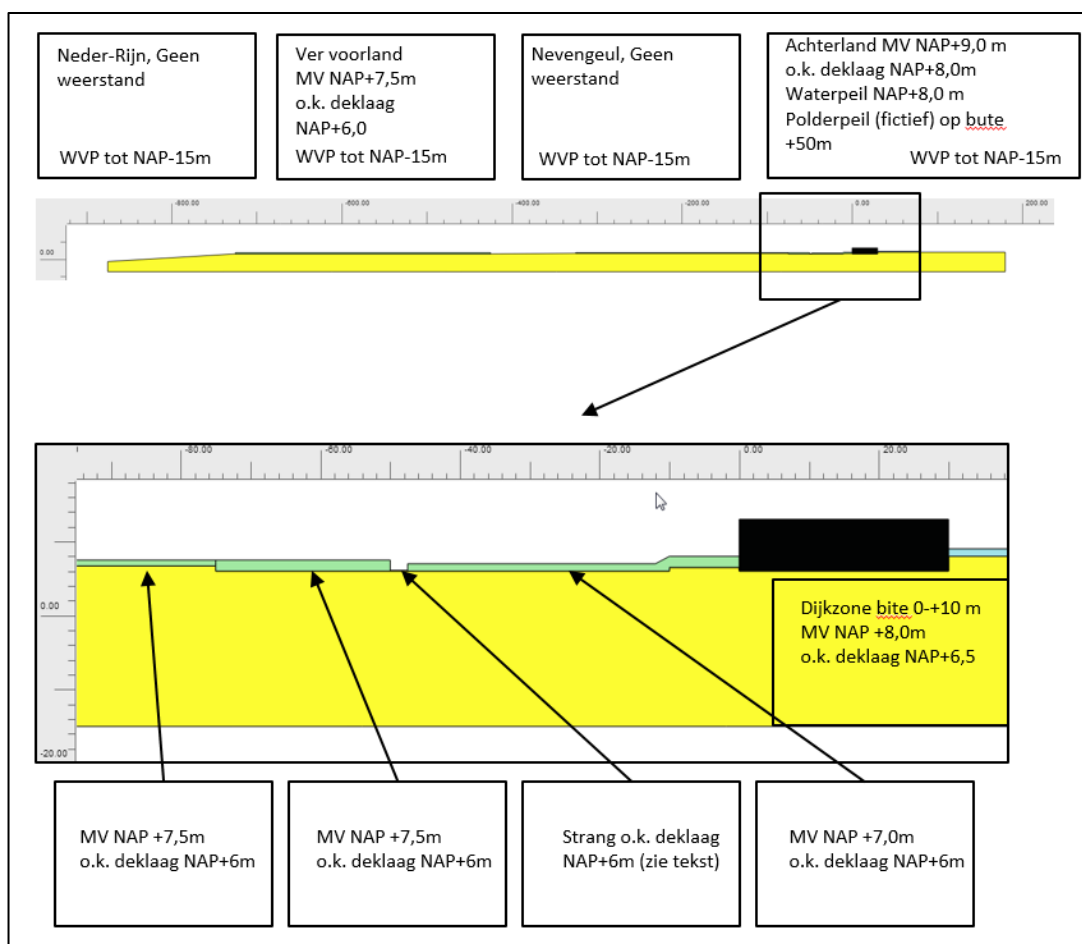
6.3 Toelichting sloot

In het voorland is een strang aanwezig. De diepte en het aan/afwezig zijn van een deklaag alhier is (nog) niet bekend. Grondonderzoek en EM metingen in de omgeving wijzen op een onderzijde deklaag op ca. NAP +6,0 m. Het maaiveld ligt op ca. NAP +7 m (verlengde strang). Begroeiing en AHN reflecties duiden erop dat dit gebied een hoge



NOTITIE

grondwaterstand kent. Aangenomen wordt daarom dat het slootpeil ca. 0,5 m onder NAP +7,0 m gelegen is. Uitgaande van een slootdiepte van 0,5 m zou de slootbodem exact op de onderzijde deklaag gelegen zijn. De sloot is om deze reden als variabele meegenomen in de modellering, waarbij eerst met een deklaag van 0,5 m dik is gerekend, en deze vervolgens stapsgewijs dunner is gemaakt tot dat kortsluiting met het WVP ontstond.



Figuur 6-1 Schematisering Plaxis

6.4 Toelichting doorlatendheid deklaag

De doorlatendheid van de deklaag is als variabele meegenomen in de modellering. Aangevangen is met een doorlatendheid van 0,05 m/d, waarna deze op basis van de modelresultaten stapsgewijs is verlaagd (waterdichter gemaakt). De doorlatendheid van de kleilagen zijn overal in het model gelijk gehouden, om het aantal vrijheidsgraden in de fit beperkt te houden.



NOTITIE

6.5 Toelichting achterland

In het achterland is, naar analogie met het gehanteerde analytisch model, gebruik gemaakt van een fictief open water op 50 m achter de dijk, om het effect van polderpeil te modelleren. Er is een beheerspeil van NAP +8 m gehanteerd. Direct achter de dijk is een 1 m dikke kleilaag aangehouden. Op basis van grondonderzoek lijkt dit hier een overschatting, maar het onderzoek in het achterland wijst op sterke variatie, die niet goed in een 2D model kan worden opgenomen. Het aanvullend fitten van zowel afstand als deklaagdikte zou neerkomen op het introduceren van schijnnaauwkeurigheid. Om deze reden zijn de achterland parameters niet als variabele in het model meegenomen. De deklaagdikte in het achterland heeft geen invloed op de bepaling van de doorlatendheid van het voorland.

6.6 Methode

De modellering is stapsgewijs uitgevoerd, waarbij na iedere uitvoer de resultaten zijn vergeleken met de peilbuismetingen, en op basis van de bevindingen de parameters zijn bijgesteld. Aangezien de twee hoogwatergolven die zijn opgetreden niet in alle gevallen dezelfde trends weergaven is bij twijfel gekozen voor een fit op de metingen van de tweede hoogwatergolf. Niet alleen wordt hiermee het effect van het pas op een laat moment volstromen van de uiterwaard opgevangen (zie tevens informatie over interpolatie van Rivierstanden, paragraaf 4.2), maar ook wordt hiermee veiligheidshalve gecorrigeerd voor effecten van erosie in de (neven)geulen tijdens het hoog water. Qua rivierstanden geldt dat door modelmatige effecten in enkele gevallen de piek van het hoog water niet even goed in het model is weergegeven. De spreiding in de resultaten gaf echter geen aanleiding tot het gedetailleerder modelleren van het hoog water.

De fit van parameters heeft zich uiteindelijk gericht op de dikte van de kleilaag onder de bodem van de strang en de doorlatendheid van kleilagen.

6.7 Resultaat sloot

Het resultaat van de modellering is dat de sloot direct insnijdt in de zandbodem. Uit de modellering blijkt weinig effect van eventuele sliblagen in de slootbodem. De sloot heeft een voedend effect op het watervoerend pakket. Hierdoor wordt het intredepunt dichter naar de teen van dijk verplaatst. Maar het voedend effect is niet zo groot dat het intredepunt t.p.v. de sloot komt te liggen.

6.8 Resultaat doorlatendheid

Uit de modellering volgt dat de beste fit wordt verkregen bij een doorlatendheid van de kleilagen van ca. 0,01 m/d. Hierbij wordt opgemerkt dat de resultaten van de fit enige



NOTITIE

variatie vertoonden: sommige peilbuizen gaven een betere fit bij doorlatendheden van 0,001 m/d, andere bij doorlatendheden van 0,05 m/d. De verwachting is dat dit samen hangt met variaties in de deklaagdikte in het voorland en de grote onzekerheid in de binnendijkse randvoorwaarden.

Bij een doorlatendheid van 0,01 m/d en een effectieve deklaagdikte van 1 m bedraagt een spreidingslengte/lekfactor ca. 280 m, dit is een maat voor het invloedsgebied. Dit is bijna het gehele voorland tot aan de nevengeul. Echter door de aanwezigheid van de strang, en het voedend daarvan wordt deze lente beperkt.

6.9 Extrapolatie

Voor extrapolatie naar andere deeltrajecten wordt aanbevolen niet de 0,01 m/d te hanteren, maar een hogere doorlatendheid van 0,05 m/d om effecten van heterogeniteit in de doorlatendheid van de dekragen te ondervangen. Het intredepunt kan worden bepaald op basis van een veilige inschatting van de deklaagdikte in combinatie met deze doorlatendheid. Indien sloten in het voorland aanwezig zijn waarvan verwacht kan worden dat deze de deklaag doorsnijden wordt er geadviseerd een intredepunt bij de sloot te kiezen, of het maken van een numerieke analyse waarbij onzekerheden in de bodemopbouw worden afgedekt.

7 Conclusies en resultaten

Voor de verkenningsfase van dijkversterking Grebbedijk zijn de meetresultaten van waterspanningsmeters en peilbuizen geanalyseerd. Doel van deze analyse is het bepalen van intredepunten, uittredepunten, responsfactoren en doorlatendheden van het voor en achterland. Hierbij is gebruikt gemaakt van analytische en numerieke analyses.

Respons stijghoogte binnenteen

Op basis van een extrapolatie van de meetresultaten tijdens de historische hoogwaters wordt geadviseerd om ter plaatse van de binnenteen bij een buitenwaterstand van ca. NAP+12,0 m uit te gaan van een stijghoogte van NAP+10,5. *Respons grondwaterstand binnenkruinlijn*

binnenkruinlijn

Op basis van een extrapolatie van de meetresultaten tijdens de historische hoogwaters wordt geadviseerd om ter plaatse van de binnenkruinlijn bij een buitenwaterstand van ca. NAP+12,0 m uit te gaan van een freatische grondwaterstand van NAP +10m.

Fictieve voorlandlengte

De intredepunten zijn van belang voor een juiste piping analyse. De intredepunten bepalen mede de aanwezige kwelweglengte. Uit de analyse van meetraai 1 volgt een



NOTITIE

intredepunt dat ca. 90 m uit de teen van de dijk ligt. Uit veiligheidsoverwegingen wordt de daar aanwezige strang als intredepunt gekozen, welke op ca. 30 m uit de buitenteen van de dijk ligt. Voor de rest van het gebied zijn geen betrouwbare meetraaien beschikbaar. Voor deze gebieden is op basis van analytische formules, deklaagdikte en doorlatendheid van de deklaag een intredelij bepaald.

De fictieve voorlandlengte is weergegeven in tabel 7-1.

Tabel 7-1 Fictieve voorlandlengte

Locatie	Fictieve voorlandlengte [m]
DP 0-1,5	60
DP 1,5-3	30
DP 3-4	30
DP 4-8	25
DP 8-11	100
DP 11-12,5	5
DP 12,5-20	130
DP 20-23 Sloot (voor =achterland)	20
DP 20-23 geen sloot	0
DP 23-27,5	10
DP 27,5-30	35
DP 30-35,5	80
DP 35,5-37	60
DP 37-44	45
DP44-46,5	25
Dp 46,5-51,5	60
DP51,5-54 Kistdam	0

Doorlatendheid voor- en achterland

De doorlatendheid van het voor en achterland zijn bepaald door een fit te maken over de meetresultaten van meetraai 1, waarbij de fit gemaakt is door het variëren van de doorlatendheden. Uit de fit van meetraai volgt een doorlatendheid voor het voor en achterland van 0,05 m/d. Uit de rapportage van Deltares dat in verleden is uitgevoerd volgt eveneens een doorlatendheid van 0,05 m/d. Hieruit wordt geconcludeerd dat een doorlatendheid van 0,05 m/d een karakteristieke waarde is wat voor het voor en achterland over het gehele gebied aangenomen wordt.

Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om ook de buitenwaterstand op verschillende locaties continue te monitoren, zodat een interpolatie van de waterstanden tussen de verschillende meetpunten niet nodig is en een nauwkeurigere analyse kan worden uitgevoerd.



NOTITIE

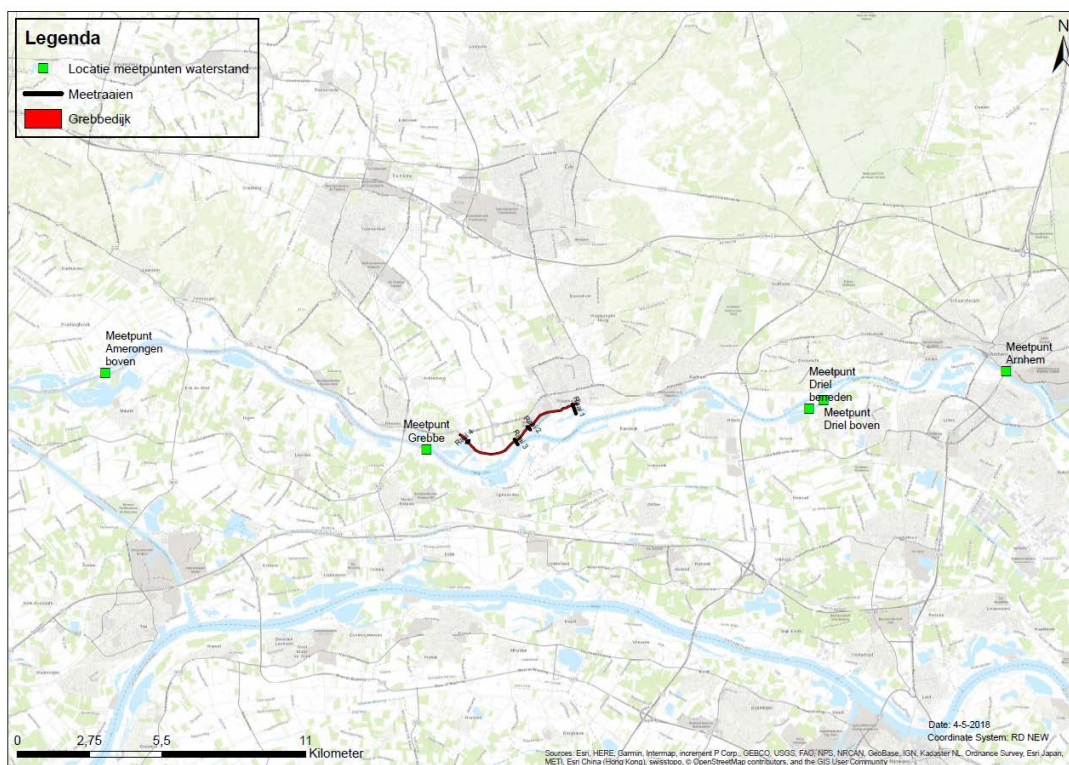
Daarnaast hebben de peilbuizen in het voorland ter plaatse van meetraai 3 geen bruikbare data opgeleverd. Geadviseerd wordt om de werking van deze peilbuizen te controleren en te verbeteren.



NOTITIE

Bijlage 1 Buitenwaterstand

De buitenwaterstand is niet gemeten op de locaties van de peilbuizen. Daarom is ervoor gekozen een lineaire interpolatie van de waterstand te maken tussen de meetpunten 'Grebbe' en 'Driel beneden'. Om te bepalen of dit een realistische inschatting is, zijn er voor enkele punten boven en benedenstrooms de waterstanden vergeleken. Dit betreft de meetpunten 'Arnhem', 'Driel boven', 'Driel beneden' en 'Amerongen boven' zie figuur 7-1.

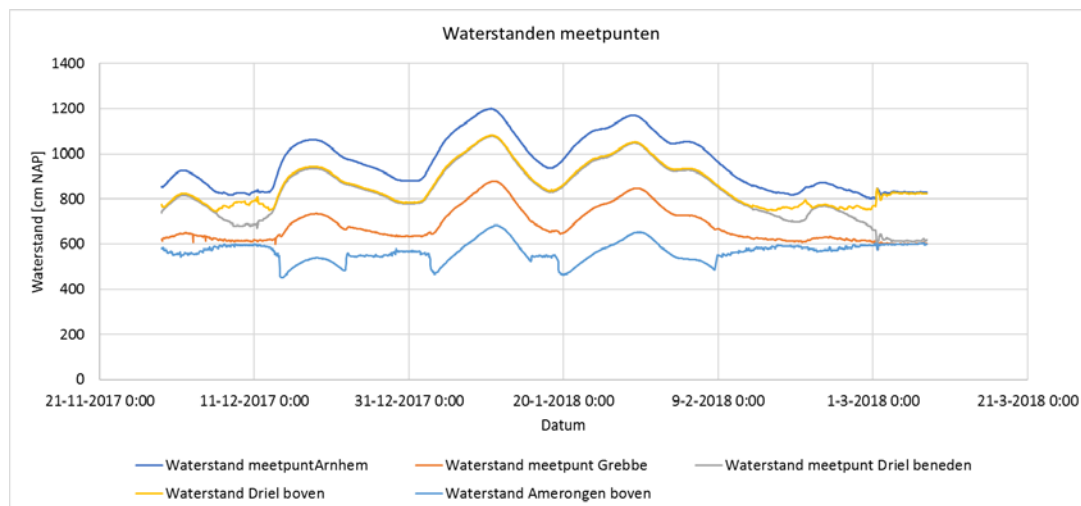


Figuur 7-1 Overzicht meetpunten waterstand Neder-Rijn

In figuur 7-2 zijn de waterstanden van deze meetpunten weergegeven. Het valt op dat tijdens hoogwater en een zeer gelijkmatig verschil tussen de verschillende waterstanden aanwezig is. Voor en na het hoogwater is duidelijk het effect van de stuwen zichtbaar, de verschillen worden grilliger en de waterstanden liggen uiteindelijk op stuwpannd niveau.

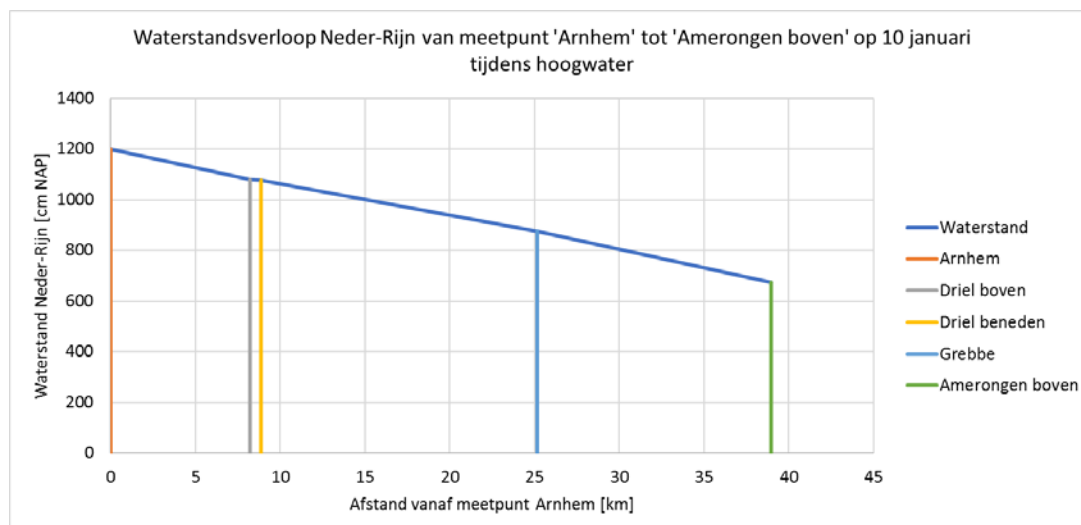


NOTITIE



Figuur 7-2 Overzicht waterstand Neder-Rijn op verschillende meetpunten

Omdat de analyse van de peilbuis gegevens van belang is tijdens hoogwater is in figuur 7-3 het waterstandsverloop over het traject Arnhem – Amerongen boven weergegeven. De afstanden tussen de trajecten staan weergegeven in tabel 7-2 en zijn aan de hand van GIS bepaald. Uit figuur 7-3 is duidelijk het lineaire verloop tussen de verschillende meetpunten te zien. Het verval tussen meetpunten Driel boven en Driel beneden toont de grootste afwijking omdat deze over relatief korte afstand (650 m) waartussen een stuw staat meten. Uit deze resultaten wordt geconcludeerd dat een lineaire interpolatie van de waterstanden tussen meetpunt Driel beneden en Grebbe een goede benadering van de waterstand geeft.



Figuur 7-3 Overzicht waterstand Neder-Rijn op verschillende meetpunten op 10 januari tijdens hoogwater



NOTITIE

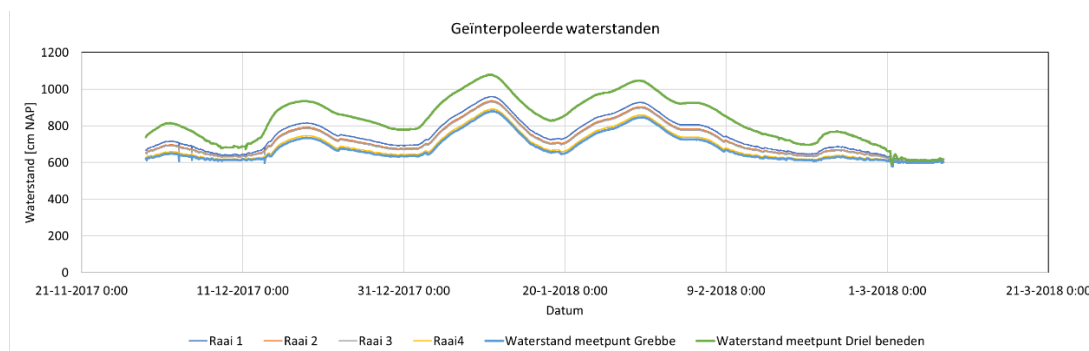
Tabel 7-2 Verval waterstand over traject tijdreeks 29 november 2017 – 7 maart 2018

Meetpunt	Afstand	Afstand [km]	Afstand t.o.v. Meetpunt "Arnhem" [km]
Arnhem	Driel boven	8,2	0
Driel boven	Driel beneden	0,65	8,85
Driel beneden	Grebbe	16,3	25,15
Grebbe	Amerongen boven	13,8	39,95

De lineair geïnterpoleerde waterstanden voor raai 1 t/m 4 staan weergegeven in figuur 7-4. Voor de afstanden zijn de gegevens in tabel 4-1 gebruikt welke bepaald zijn met behulp van GIS.

Tabel 7-3 Afstand raaien t.o.v. meetpunt 'Driel beneden'

	Raai 1	Raai 2	Raai 3	Raai 4
Afstand t.o.v. Driel [km]	9,7	11,6	12,1	15,3



Figuur 7-4 Overzicht geïnterpoleerde waterstanden t.b.v. de peilbuizen



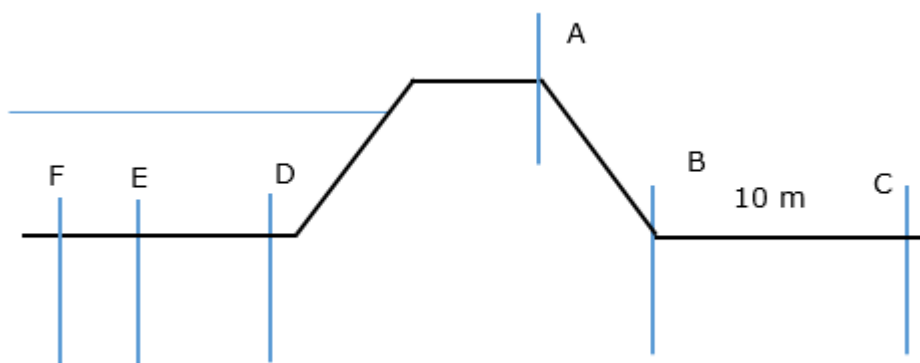
NOTITIE

Bijlage 2 Plaatsingsgegevens peilbuizen en waterspanningsmeters

Door Eijkelkamp zijn voor het Waterschap Vallei en Veluwe op 4 raaien waterspanningsmeters en peilbuizen geplaatst. De onderstaande gegevens komen uit de in TeleControlNet opgegeven data door Eijkelkamp en zijn gedownload op 15 maart 2018. De onderkant van de deklaag is aangegeven in de dwarsprofielen, deze is gebaseerd op het geotechnisch lengteprofiel van de kruin. De onderkant van de deklaag in het voor- en achterland kan hiervan afwijken.

Locatie	Raai 1, DP2	Raai 2, DP22	Raai, 3 DP29	Raai 4, DP51
A	Waterspanningsmeter	Waterspanningsmeter	Waterspanningsmeter	Waterspanningsmeter
B	Peilbuis, Waterspanningsmeter	Peilbuis, Waterspanningsmeter	Peilbuis, Waterspanningsmeter	Peilbuis, Waterspanningsmeter
C				Peilbuis
D	Peilbuis		Peilbuis	
E	Peilbuis		Peilbuis	
F	Peilbuis		Peilbuis	

Tabel 7-4 Geplaatste meetapparatuur per meetraai en locatie



Figuur 7-5 Codering locaties meetinstrumenten

Wegens het opgetreden hoogwater tussen december 2017 en februari 2018 zijn de uiterwaarden volgelopen. Daarom zijn de volgende peilbuisopstellingen opgehoogd, zie.

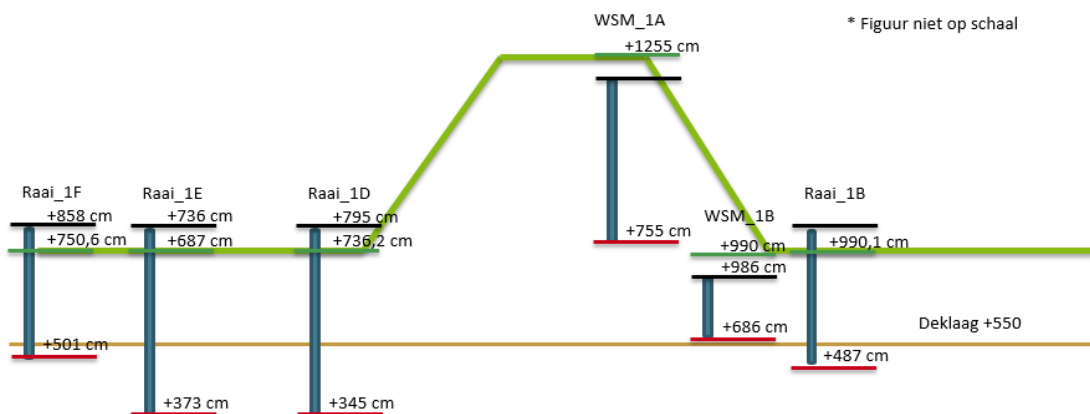
Tabel 7-5 Peilbuis ophoogschema



NOTITIE

	Maaiveld	BKPB	BKPB (opgehoogd)	Opgehoogd	Datum
	[mNAP]	[mNAP]	[mNAP]	[m]	Ophoging
Raai 1B	9,901	10,621	10,621	0,00	n.v.t.
Raai 1D	7,362	7,992	9,99	2,00	23-1-2018
Raai 1E	6,87	7,36	9,82	2,46	18-12-2017
Raai 1F	7,506	8,58	10,56	1,98	23-1-2018
Raai 2B	8,251	8,171	9,65	1,48	8-1-2018
Raai 3B	8,24	8,11	9,61	1,5	8-1-2018
Raai 3D	7,629	7,469	9,969	2,5	18-12-2017
Raai 3E	7,076	6,956	9,956	3	18-12-2017
Raai 3F	7,653	7,523	10,023	2,5	18-12-2017
Raai 4B	8,275	8,135	10,135	2	8-1-2018
Raai 4C	7,469	8,099	9,599	1,5	8-1-2018

Raai 1



Figuur 7-6 Plaatsingsgegevens meetinstrumenten raai 1

Tabel 7-6 Overzicht plaatsingsgegevens meetinstrumenten raai 1

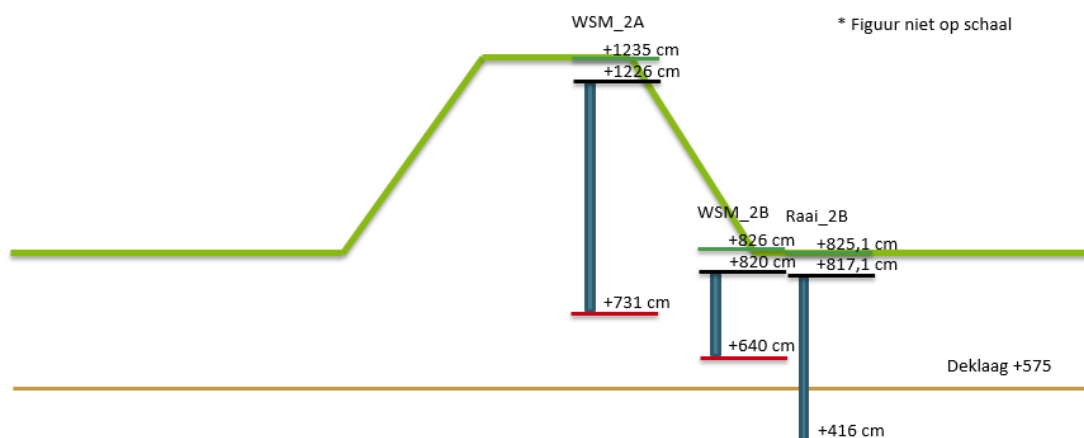
Meting	Naam	X	Y	Datum plaatsing	Maaiveld hoogte	Lengte peilbuis	Bovenkant peilbuis	Diepte filter	Lengte filter
					NAP cm	cm	NAP cm	NAP cm	cm
Peilbuis	Raai_1B	174517.01	441843.48	27-11-'17	990.1	575.1	1062.1	487	100
Peilbuis	Raai_1D	174533.03	441811.32	27-11-'17	736.2	454.2	795	345	100



NOTITIE

Peilbuis	Raai_1E	174536. 71	441790. 87	27-11-'17	687	369	736	373	100
Peilbuis	Raai_1F	174593. 99	441633. 82	27-11-'17	750.6	240.6	858	501	100
Waterspanning	WSM_1 A	174521. 74	441834. 94	27-11-'17	1255	490	1245	755	
Waterspanning	WSM_1 B	174518. 12	441842. 04	27-11-'17	990	300	986	686	

Raai 2



Figuur 7-7 Plaatsingsgegevens meetinstrumenten raai 2

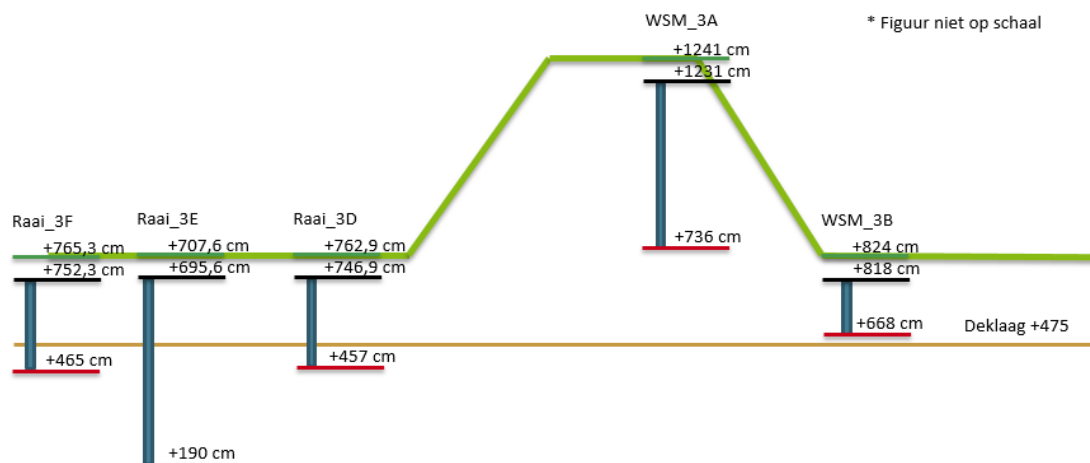
Tabel 7-7 Overzicht plaatsingsgegevens meetinstrumenten raai 2

Meting	Naam	X	Y	Datum plaatsing	Maaiveld	Lengte peilbuis	Bovenkant peilbuis	Diepte filter	Lengte filter
					hoogte				
					NAP cm	cm	NAP cm	NAP cm	cm
Peilbuis	Raai_2B	172806.61	440996.55	27-11-'17	825.1	401.1	817.1	416	100
Waterspanning	WSM_2A	172813.95	440987.6	20-12-'17	1235	495	1226	731	
Waterspanning	WSM_2B	172806.24	440996.21	20-12-'17	826	180	820	640	

Raai 3



NOTITIE



Figuur 7-8 Plaatsingsgegevens meetinstrumenten raai 3

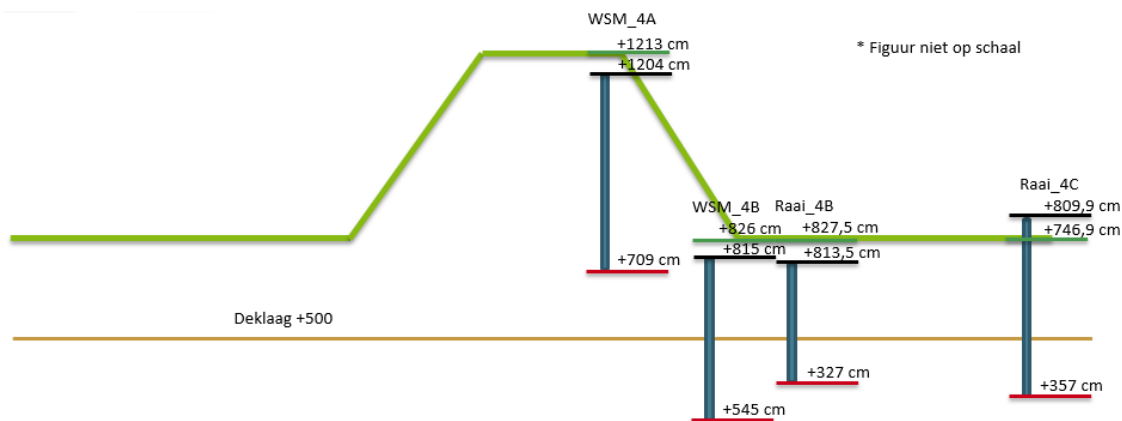
Tabel 7-8 Overzicht plaatsingsgegevens meetinstrumenten raai 3

Meting	Naam	X	Y	Datum plaatsing	Maaiveld hoogte	Lengte peilbuis	Bovenkant peilbuis	Diepte filter	Lengte filter
					NAP cm	cm	NAP cm	NAP cm	cm
Peilbuis	Raai_3B	172326.3	440485.78	27-11-'17	824	396	811	415	100
Peilbuis	Raai_3D	172341.48	440459.01	27-11-'17	762,9	289,9	746,9	457	100
Peilbuis	Raai_3E	172359.4	440422.68	27-11-'17	707.6	505.6	695.6	190	100
Peilbuis	Raai_3F	172385.25	440380.22	27-11-'17	765.3	287.3	752.3	465	100
Waterspanning	WSM_3A	172331.35	440476.37	21-12-'17	1241	495	1231	736	
Waterspanning	WSM_3B	172325.51	440485.55	21-12-'17	824	150	818	668	

Raai 4



NOTITIE



Figuur 7-9 Plaatsingsgegevens meetinstrumenten raai 4

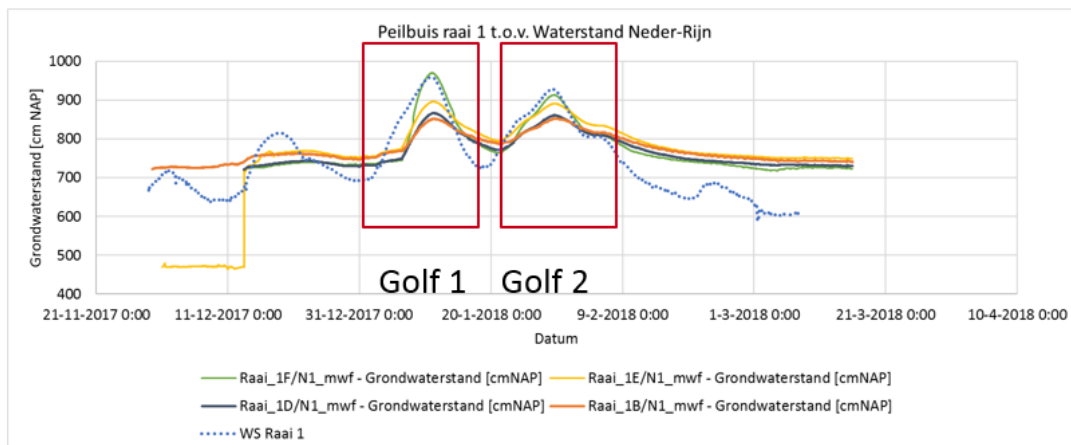
Tabel 7-9 Overzicht plaatsingsgegevens meetinstrumenten raai 4

Meting	Naam	X	Y	Datum plaatsing	Maaiveld hoogte	Lengte peilbuis	Bovenkant peilbuis	Diepte filter	Lengte filter
					NAP cm	cm	NAP cm	NAP cm	cm
Peilbuis	Raai_4B	170517.96	440452.67	27-11-'17	827.5	486.5	813.5	327	100
Peilbuis	Raai_4C	170524.43	440458.42	27-11-'17	746.9	452.9	809.9	357	100
Waterspanning	WSM_4A	170510.1	440446.14	21-12-'17	1213	495	1204	709	
Waterspanning	WSM_4B	170517.58	440453.37	21-12-'17	826	270	815	545	

Bijlage 3 Peilbuis validatie en analyse kortdurende meetreeks



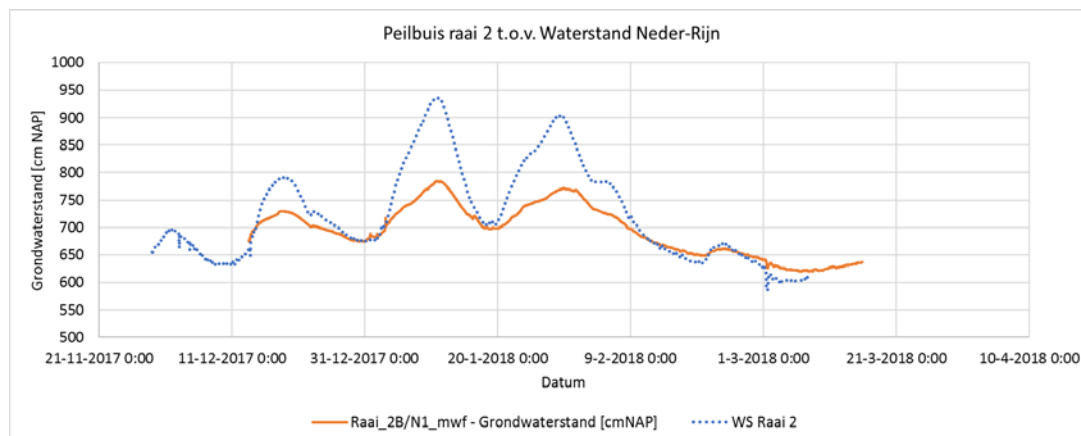
NOTITIE



Figuur 7-11 Meetresultaten raai 1

Validatie meetraai 2

Meetraai 2 bevindt zich ter hoogte van de jachthaven bij dijkpaal 22, zie figuur 7-10. Hier is 1 peilbuis in de binnenteen geplaatst. De meetresultaten weergegeven figuur 7-12 laten een duidelijk signaal zien waarbij de stijghoogte snel reageert op veranderingen in de buitenwaterstand. De gehele meetreeks wordt betrouwbaar geacht.



Figuur 7-12 Meetresultaten raai 2

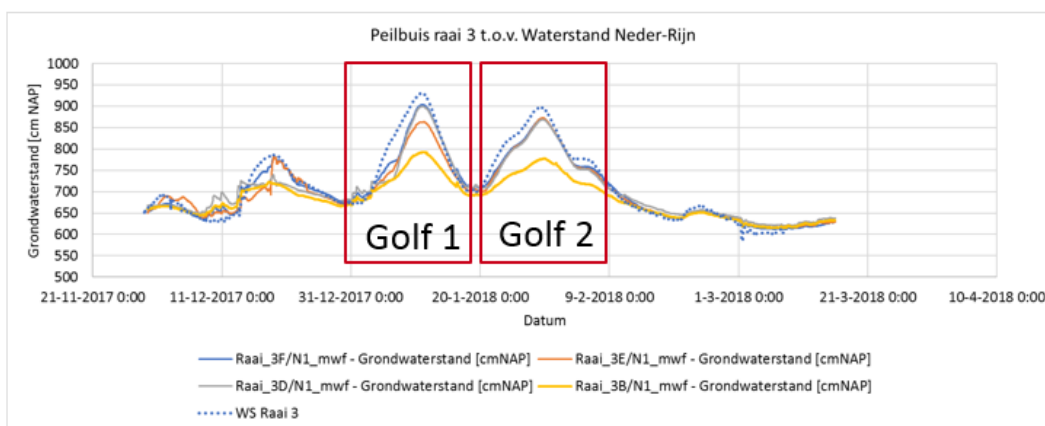
Validatie meetraai 3

Meetraai 3 bevindt zich op het midden van de Grebbedijk bij dijkpaal 29, zie figuur 7-10. De meetresultaten van de peilbuizen zijn weergegeven in figuur 7-13. De meetresultaten laten een onverklaarbaar resultaat zien. De peilbuizen op het voorland (3D, 3E, 3F) geven tijdens golf 2 alle drie precies dezelfde resultaten en liggen vlak onder de geïnterpoleerde buitenwaterstand. Dit zou betekenen dat er geen weerstand op het voorland aanwezig is, wat zeer onwaarschijnlijk is omdat de deklaag op deze locatie tussen ca. 1,5 en 3m dik is.



NOTITIE

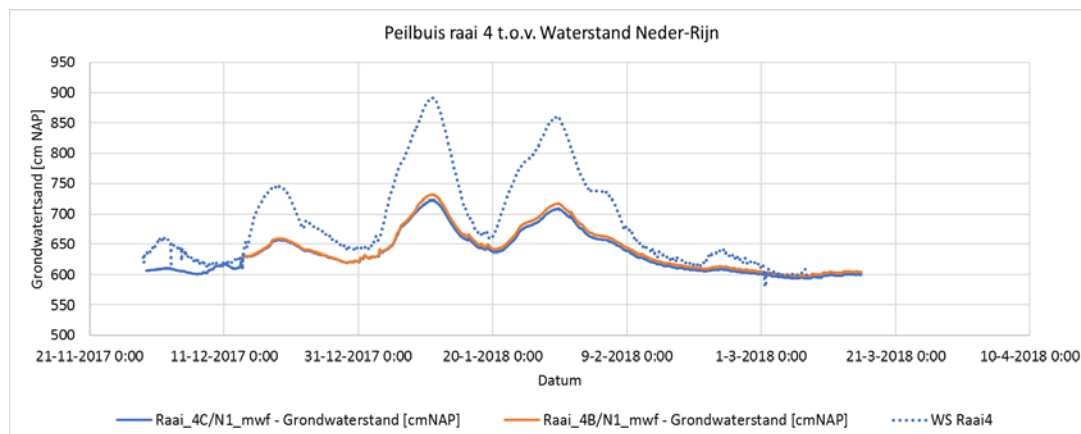
Tijdens golf 1 liggen de stijghoogtes van meetpunten 3D en 3F hoger dan het tussenliggende punt 3E. vergeleken met de resultaten tijdens golf 2 is dit resultaat onverklaarbaar. Uit bovenstaande wordt geconcludeerd dat de meetreeksen 3D, 3E en 3F niet betrouwbaar zijn en niet gebruikt worden in de analyse. Mogelijke oorzaken zijn niet goed afdichten van de peilbuis, niet waterdicht opgelengd.



Figuur 7-13 Meetresultaten raai 3

Validatie meetraai 4

Meetraai 4 bevindt zich ter hoogte van het Hoornwerk bij dijkpaal 51, zie figuur 7-10. Deze meetraai bevat 2 peilbuizen in het achterland. De meetresultaten in figuur 7-14 geven een duidelijk signaal dat fluctuaties in de waterstand snel gevolgd worden. De resultaten van meetraai 4B liggen boven 4C wat verklaarbaar is omdat 4C 15m verder in het achterland staat. De meetdata van 4B en 4C worden betrouwbaar geacht en gebruikt in verdere analyse.



Figuur 7-14 Meetresultaten raai 4



NOTITIE

Bepaling respons stijghoogte

De stijghoogte respons in het achterland is bepaald door het maken van responsgrafieken. Hierbij worden de waterstand en de peilbuismetingen tegen elkaar uitgezet. De raaklijn aan het stijgende deel van de grafiek geeft de responsfactor. Het stijgende gedeelte van de grafiek geeft het stijgen van de waterstand van de Neder-Rijn en het stijgen van de stijghoogte weer. Als de grafiek niet stijgt bij een stijgende waterstand houdt dat in dat de stijghoogte niet toeneemt bij toenemende buitenwaterstand. Voor de Grebbedijk geldt in veel gevallen dat eerst het voorland moet onderlopen en dat gebeurt pas bij een hoge waterstand, daarom loopt het eerste deel van de grafiek in veel gevallen recht.

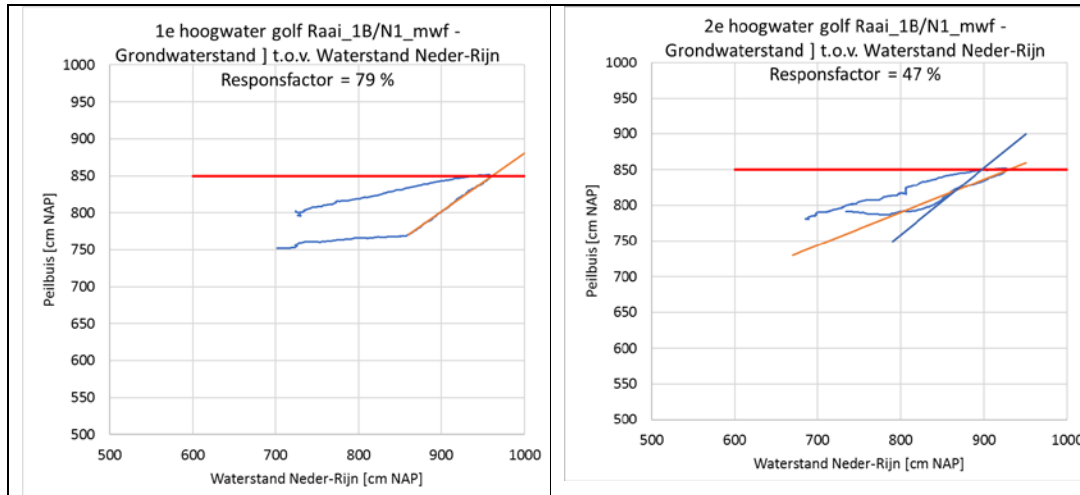
De raaklijn (in oranje aangegeven in de grafieken) wordt getrokken op het gedeelte van de grafiek waar een duidelijke respons op de buitenwaterstand te herkennen is. Deze raaklijn wordt in principe getrokken op basis van het laatste gedeelte van de meetreeks, omdat dit het meest representatieve gedeelte van de responscurve is, omdat deze meetresultaten het dichtst bij de maatgevende condities liggen. Bij het trekken van de raaklijn voor de verschillende peilbuizen zijn ook de meetresultaten van de andere peilbuizen beschouwd om een zo betrouwbaar mogelijk resultaat te verkrijgen. In onderstaande figuren is dat gedaan voor de vier meetraaien voor de 1^e en 2^e hoogwatergolf. In oranje is de raaklijn aangegeven die gebruikt is ter bepaling van de respons. Een rode lijn geeft een mogelijk punt van opbarsten aan. Voor sommige gevallen is een 2^e of zelfs 3^e raaklijn aangegeven. Deze worden echter als minder representatief gezien.

De responsfactor aangegeven in de grafieken is de hellingshoek van de raaklijn. Een responsfactor van 50 % geeft aan dat bij een stijging van de buitenwaterstand met bijv. 4 m de stijghoogte met 2m toeneemt. Door extrapolatie van de raaklijn op basis van de respons wordt de stijghoogte tijdens maatgevende condities bepaald.

Figuur 7-15 geeft de resultaten weer voor locatie 1B. Uit de grafieken is duidelijk het moment waarop opbarsten optreedt te zien, de grafiek vlakt dan namelijk geheel af. Dit gebeurt bij de eerste en 2^e hoogwater golf bij een stijghoogte van NAP +8,5 m.

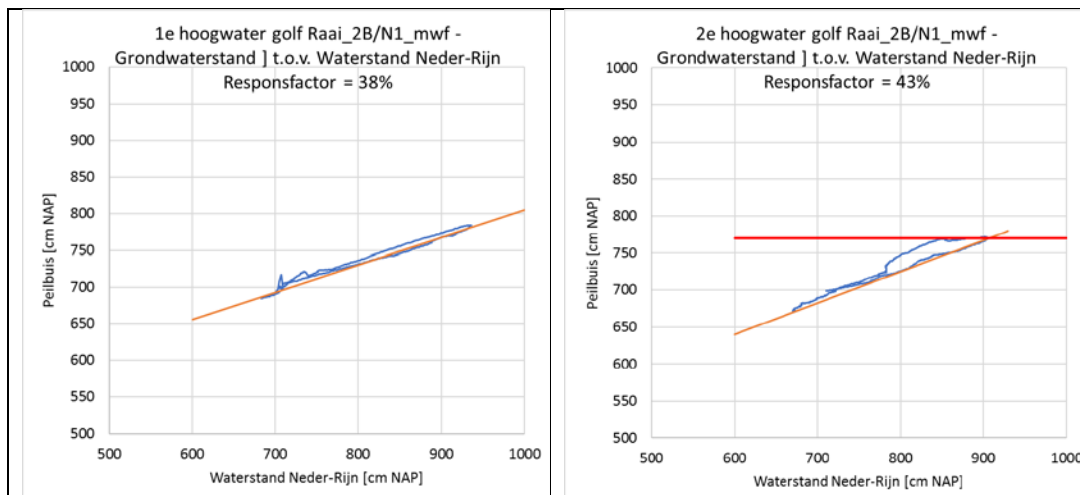


NOTITIE



Figuur 7-15 Responsfactor locatie 1B voor 1e en 2e hoogwatergolf

Figuur 7-16 geeft de resultaten van locatie 2B weer. Hier lijkt bij de 2^e hoogwatergolf opbarsten voor te komen. Er bevindt zich een sloot op ca. 50 m in het achterland. Het opbarsten vindt plaats bij een waterstand van ca. NAP+8,5m en een stijghoogte van ca. NAP+7,65 m. Tijdens de eerste hoogwater golf treedt er geen opbarsten op terwijl een hogere buitenwaterstand aanwezig is.

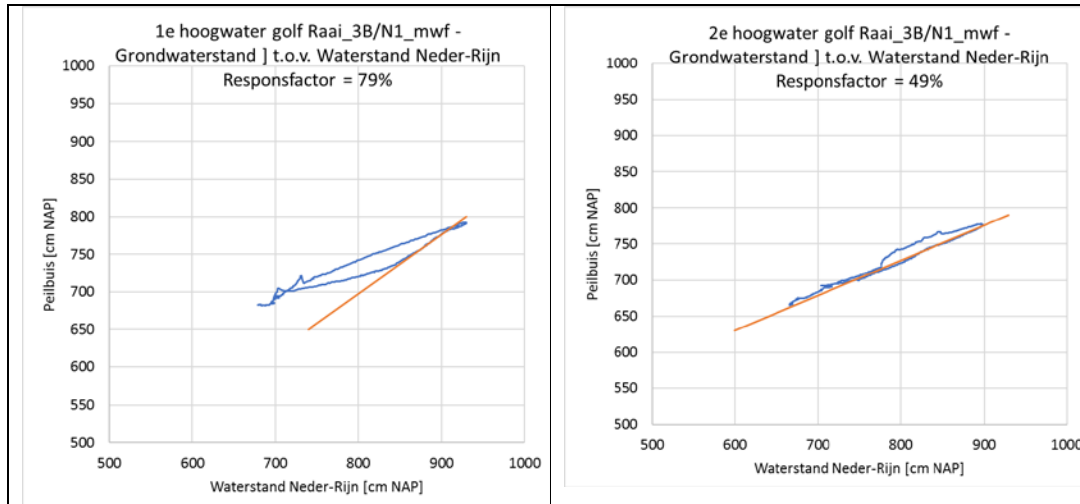


Figuur 7-16 Responsfactor locatie 2B voor 1e en 2e hoogwatergolf

De resultaten voor locatie 3B staan weergegeven in figuur 7-17. Er is geen teken van opbarsten.

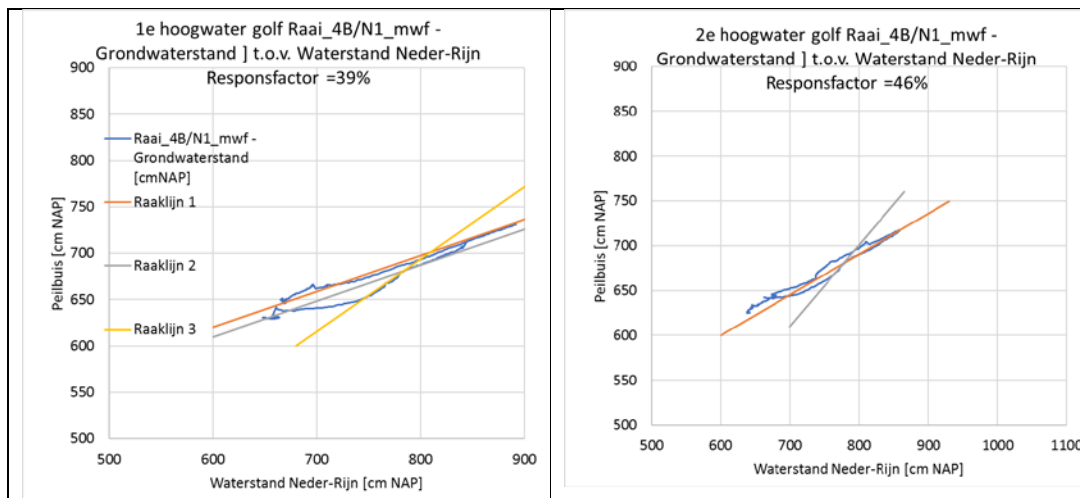


NOTITIE



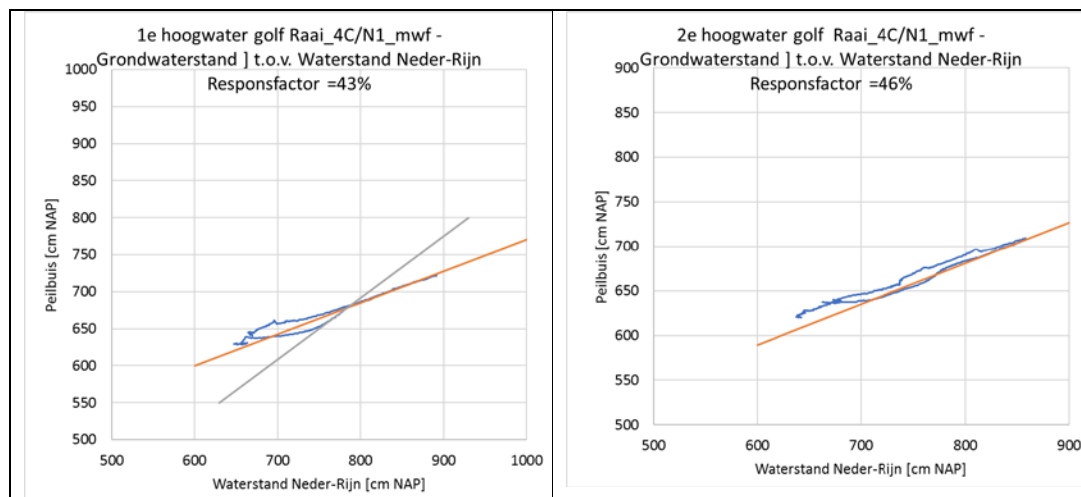
Figuur 7-17 Responsfactor locatie 3B voor 1e en 2e hoogwatergolf

Meetraai 4 bevat 2 peilbuizen in het achterland (4B en 4C) weergegeven in figuur 7-18. Voor beide locaties geldt dat er geen teken is van opbarsten.





NOTITIE



Figuur 7-18 Responsfactor locatie 4B en 4C voor 1e en 2e hoogwatergolf

De resultaten van de bovenstaande analyse zijn samengevat in tabel 7-10. Hierbij is ook de stijghoogte gedurende normale omstandigheden aangegeven.

Tabel 7-10 Responsfactoren stijghoogte achterland

Naam	Dijk-paal	Respons 1 ^e golf [%]	Respon 2 ^e golf [%]	Stijghoogte bij WBN (ca.NAP+12,0m) [m NAP]	Stijghoogte dagelijkse Omstandigheden [m]	opmerkingen
1B	2	79	47	10,4	7,4	1 ^e golf opbarsten Stijghoogte 8,5 waterstand 9,2 2 ^e golf opbarsten Stijghoogte 8,5 waterstand 8,9
2B	22	38	43	8,9	6,0	2 ^e golf Opbarsten Stijghoogte NAP+7,7(waterstand NAP+8,5m) 1 ^e golf geen opbarsten
3B	29	79	49	10,1	6,3	
4B	51	39	46	8,7	6	
4C	51	43	46	8,6	6	

Bepaling intrede en uitredepunt

Het intredepunt is van belang voor de piping analyse. Door het uitzetten van de meetresultaten in een dwarsprofiel is het intrede punt te bepalen. Dit is gedaan voor



NOTITIE

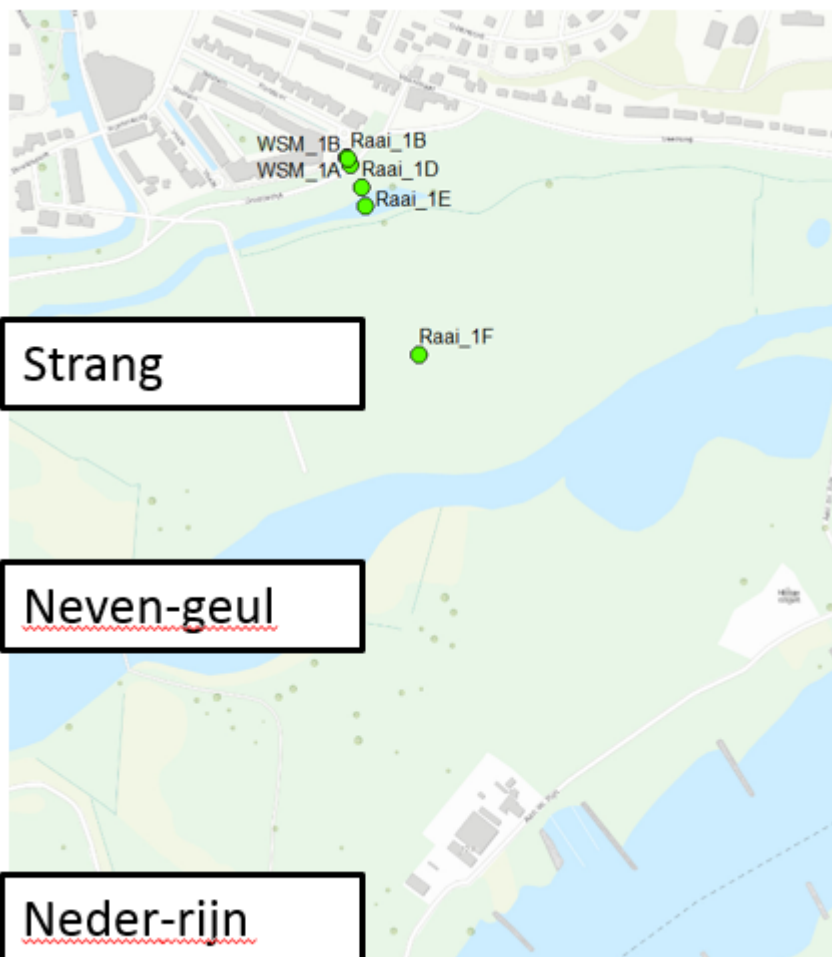
meetraai 1, meetraai 3 is onbetrouwbaar. Voor de overige locaties gebeurt dit op basis van de berekende doorlatendheid en de berekening van de fictieve voorlandlengtes.

Meetraai 1

Zoals te zien in figuur 7-19 is er een strang op ca. 35m uit de buitenteen en de nevengeul op ca. 285m uit de teen van dijk. Uit de dwarsprofielen weergegeven in figuur 7-20 en figuur 7-21 volgt dat het intredepunt tijdens de eerste hoogwatergolf ca. 100m uit de teen bevindt. Tijdens de 2^e hoogwatergolf is deze afstand ca. 90 m. De aanwezige strang ligt 35 m uit de teen van de dijk, dit is dus zeer waarschijnlijk niet het intrede punt. Uit inmetingen van strang komt naar voren dat het laagste punt op NAP+5,62m ligt wat betekent dat deze zeer waarschijnlijk in contact staat met het watervoerende pakket. De nevengeul ligt op 285m van de teen van dijk. Uit de fit op de meetresultaten komt naar voren dat een voorland lengte van 285m de beste fit op levert. Bij deze voorlandlengte , doorlatendheid en deklaagdikte mag een fictief voorland van ca. 100 m meegenomen worden. Uit de Plaxis analyse volgt dat de beste fit wordt gemaakt als de sloot geen weerstand heeft, dit houdt in dat er geen deklaag op de bodem van de sloot aanwezig is. Het uittrede punt bevindt zich waarschijnlijk in de teen van de dijk.



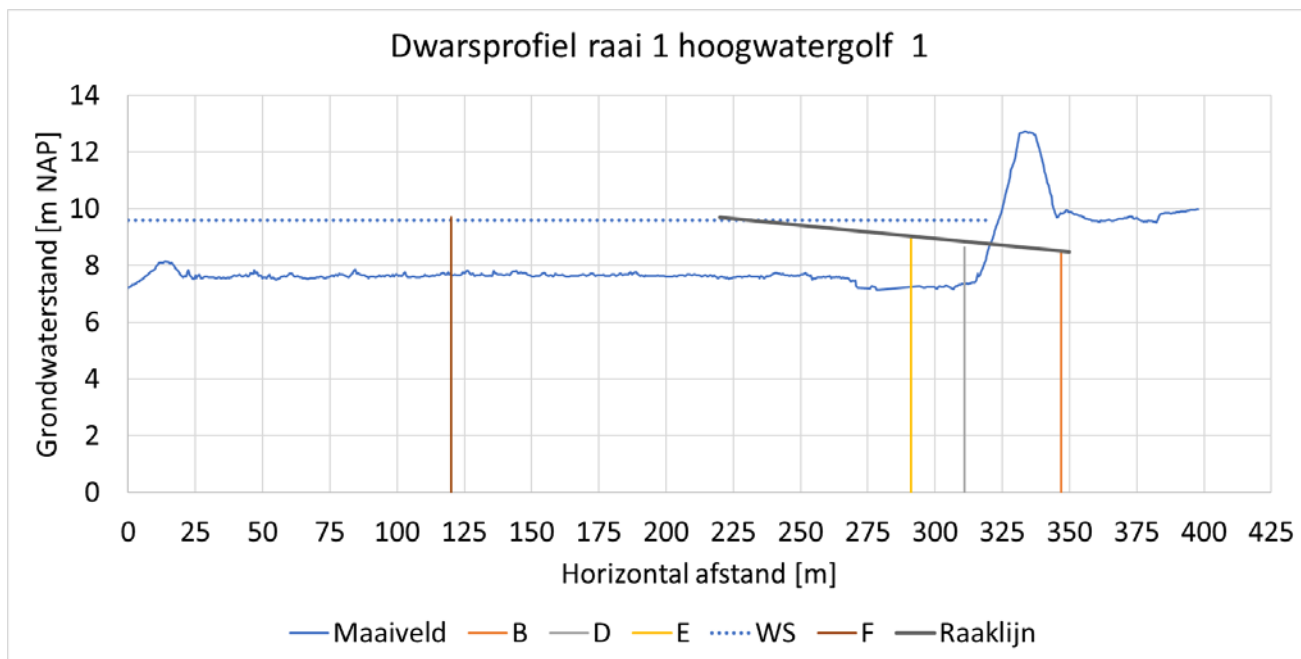
NOTITIE



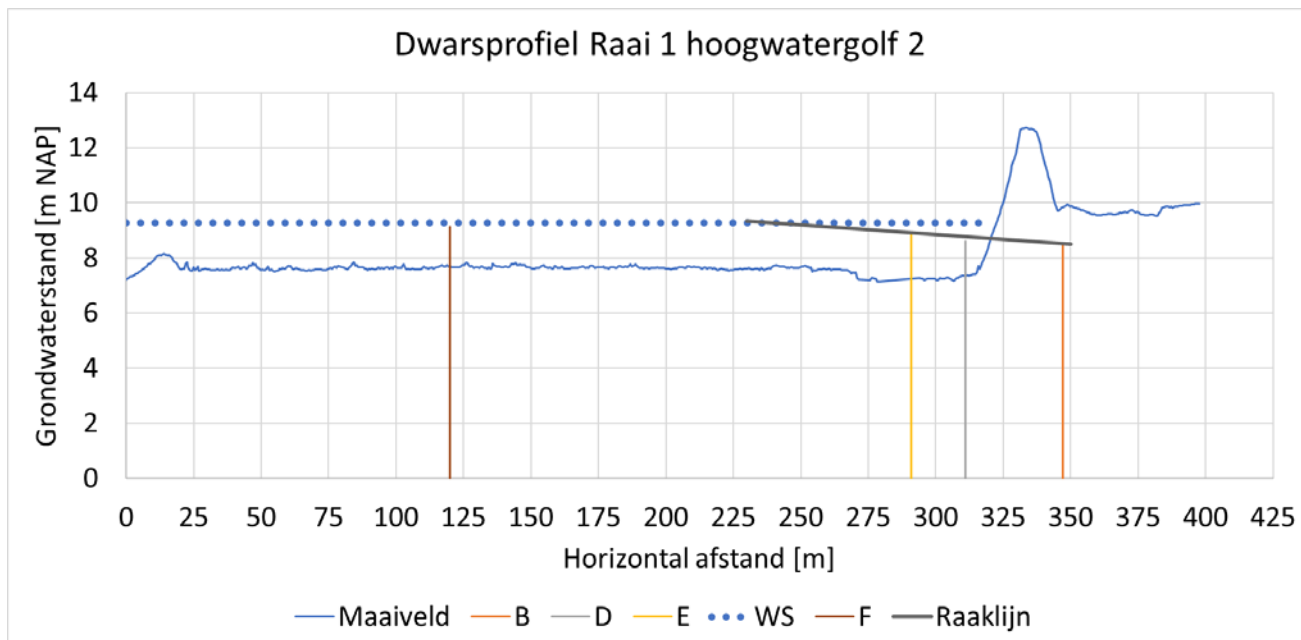
Figuur 7-19 Locatie meetraai 1



NOTITIE



Figuur 7-20 Dwarsprofiel meetresultaten meetraai 1 dijkspaal 2 tijdens hoogwatergolf 1

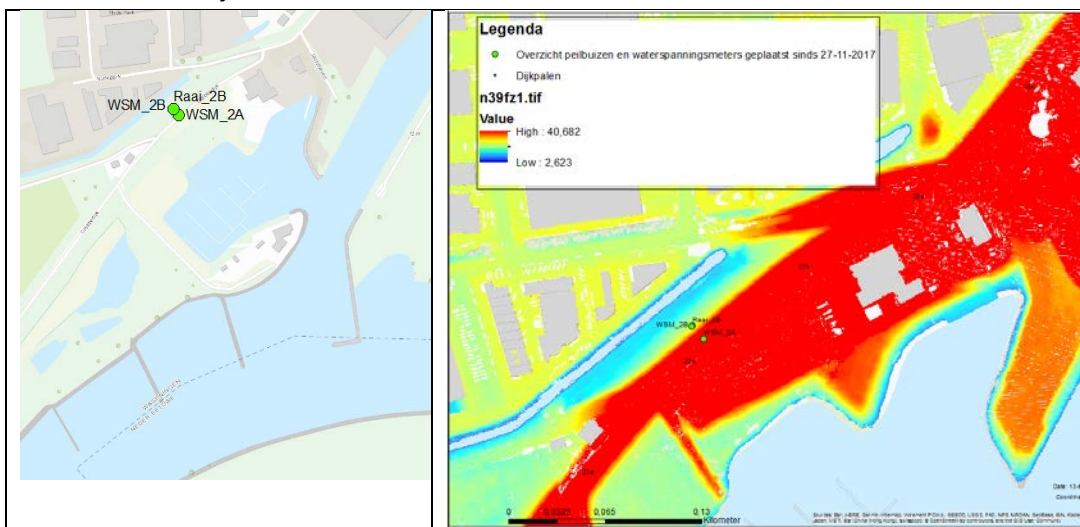


Figuur 7-21 Dwarsprofiel meetresultaten meetraai 1 dijkspaal 2 tijdens hoogwatergolf 2

NOTITIE

Meetraai 2

Meetraai 2 ligt op een locatie waar het voorland relatief hoog (ca. 11,5m) ligt. Op basis van de berekende doorlatendheid en een voorland tot aan het water volgt hier uit een fictief voorland van 50 m. Op het laag gelegen gedeelte is geen data over deklaag dikte aanwezig dus wordt conservatief het begin van het hoge voorland als intredepunt aangenomen. Het uitredepunt bevindt zich zeer waarschijnlijk in de achterliggende sloot op ca. 20m uit de binnentee van dijk.



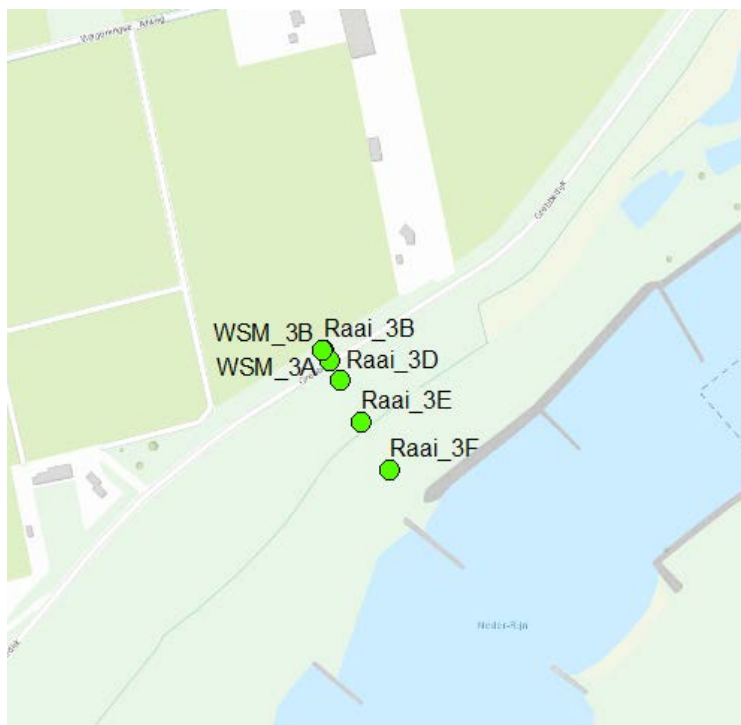
Figuur 7-22 Locatie meetraai 2

Meetraai 3

De meetresultaten van meetraai 3 op het voorland worden onbetrouwbaar geacht. Uit de deklaagdikte kaart uit [LCF 2018a] volgt dat er een deklaag van ca. 2m aanwezig is tot aan de eerste watergang, daarna wordt de deklaag ca. 0,5m. De eerste watergang bevindt zich ca. 50 m uit de buitenteen van de dijk. Op basis van een berekening van de fictieve voorlandlengte bij een voorland van 50 m volgt een fictief voorland van 49 m. Het uitredepunt bevindt zich zeer waarschijnlijk aan de binnentee van het dijklichaam.



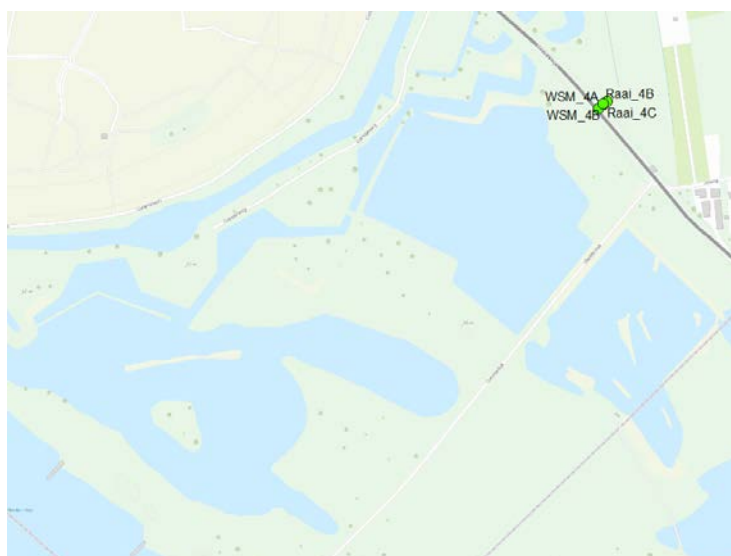
NOTITIE



Figuur 7-23 Locatie meetraai 3

Meetraai 4

Het intredepunt van meetraai 4 is berekend door het bepalen van de fictieve voorlandlengte. Bij een voorland van 70m (tot aan de eerste waterpartij) volgt een fictieve voorlandlengte van 68m. Het uitredepunt bevindt zich zeer waarschijnlijk in de binnenteen van de dijk



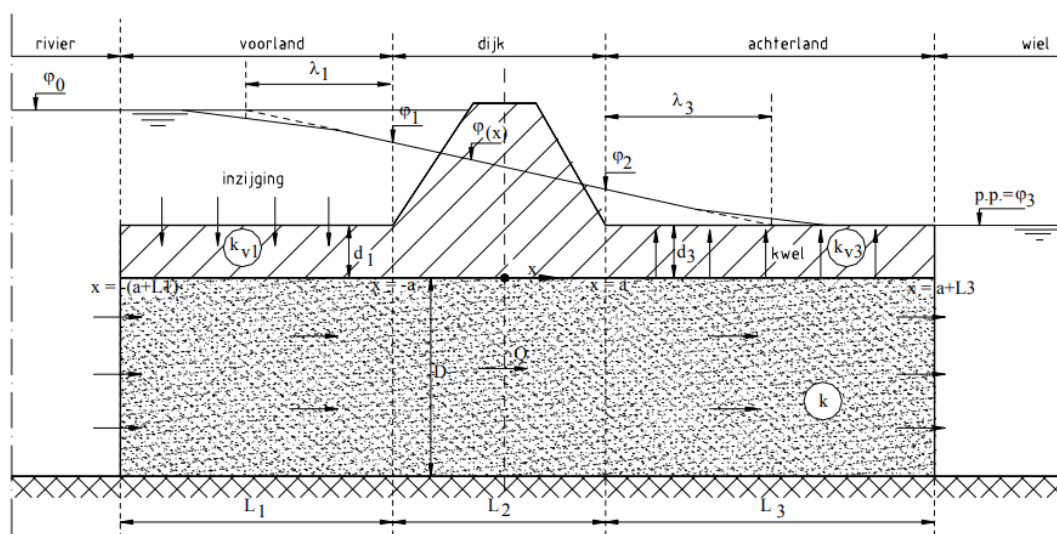
NOTITIE

Figuur 7-24 Locatie meetraai 4

Bepaling doorlatendheden

De bepaling van de doorlatendheden van het voor en achterland wordt gedaan door een fit op de meetresultaten met behulp van de analytische formules uit [TR2004] en schematisatie volgens figuur 7-25. Deze analyse is uitgevoerd in Excel.

Voor een goede fit zijn zoveel mogelijk meetpunten op een lijn nodig in het voor en achterland. Meetraai 1 en 3 hebben meetresultaten in het voor en achterland. Uit de validatie van de meetdata blijkt dat de resultaten van meetraai 3 niet betrouwbaar zijn, hier wordt geen analyse op uitgevoerd. De fit wordt gemaakt op de meetresultaten van meetraai 1.



Figuur 7-25 Schematisering van grondwaterstroming ter plaatse van een kleidijk [TR 2004]

Voor de fit zijn de invoerparameters gebruikt zoals weergegeven in tabel 7-15, waarbij opgemerkt moet worden dat de parameter polderpeil een aanname is. Op deze locatie is geen peilbeheer.

Tabel 7-11 Parameters fit voor meetraai 1 dijkspaal 2

Parameters	Omschrijving	Waarde fit 1	Waarde fit 2
Buitenpeil	Waterstand Neder-Rijn	9,28 m	9,28 m
Polderpeil	Waterstand in achterland	8,00 m	8,00 m



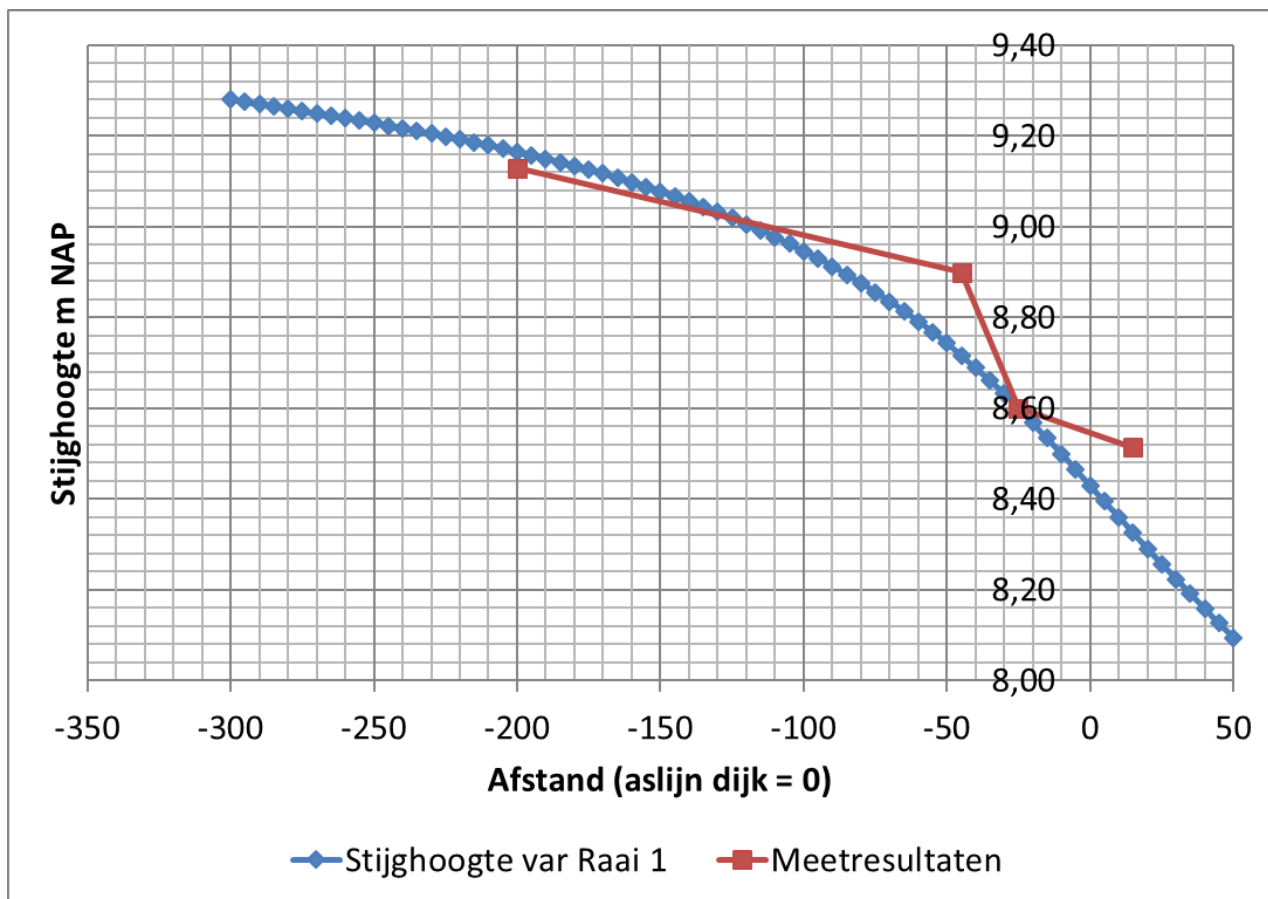
NOTITIE

d1	Dikte deklaag voorland	0,5 m	1,0 m
d3	Dikte deklaag achterland	0,5 m	1,0 m
k1	Doorlatendheid deklaag voorland	Volgt uit Fit [m/dag]	Volgt uit Fit [m/dag]
k3	Doorlatendheid deklaag achterland	Volgt uit Fit [m/dag]	Volgt uit Fit [m/dag]
D	Dikte watervoerend pakket	22m	22m
K	Doorlatendheid watervoerend pakket	39 [m/dag]	39 [m/dag]
L voorland	Lengte tot intredepunt tot as-dijk	Kalibratie op basis van meetdata	Kalibratie op basis van meetdata
L dijk	Breedte dijk (teen tot teen)	30 m	30 m
L achterland	Lengte tot uittredepunt tot as-dijk	50 m	50 m

Er zijn meerdere combinaties mogelijk ter vergelijking zijn er twee fits gemaakt waarbij de deklaagdikte en de doorlatendheid van de toplaag is gevarieerd. Om tot dezelfde fit te komen is er voor een twee keer dikkere deklaag een twee maal hogere doorlatendheid benodigd. Bij een deklaag van 0,5m komt de beste fit naar voren bij een doorlatendheid van 0,04 m/d. Voor een deklaag van 1m is de beste fit bij 0,1 m/d. De fit is grafisch weergegeven in figuur 7-36 en figuur 7-37. In tabel 7-16 zijn de berekende fictieve voorlandlengtes weergegeven.



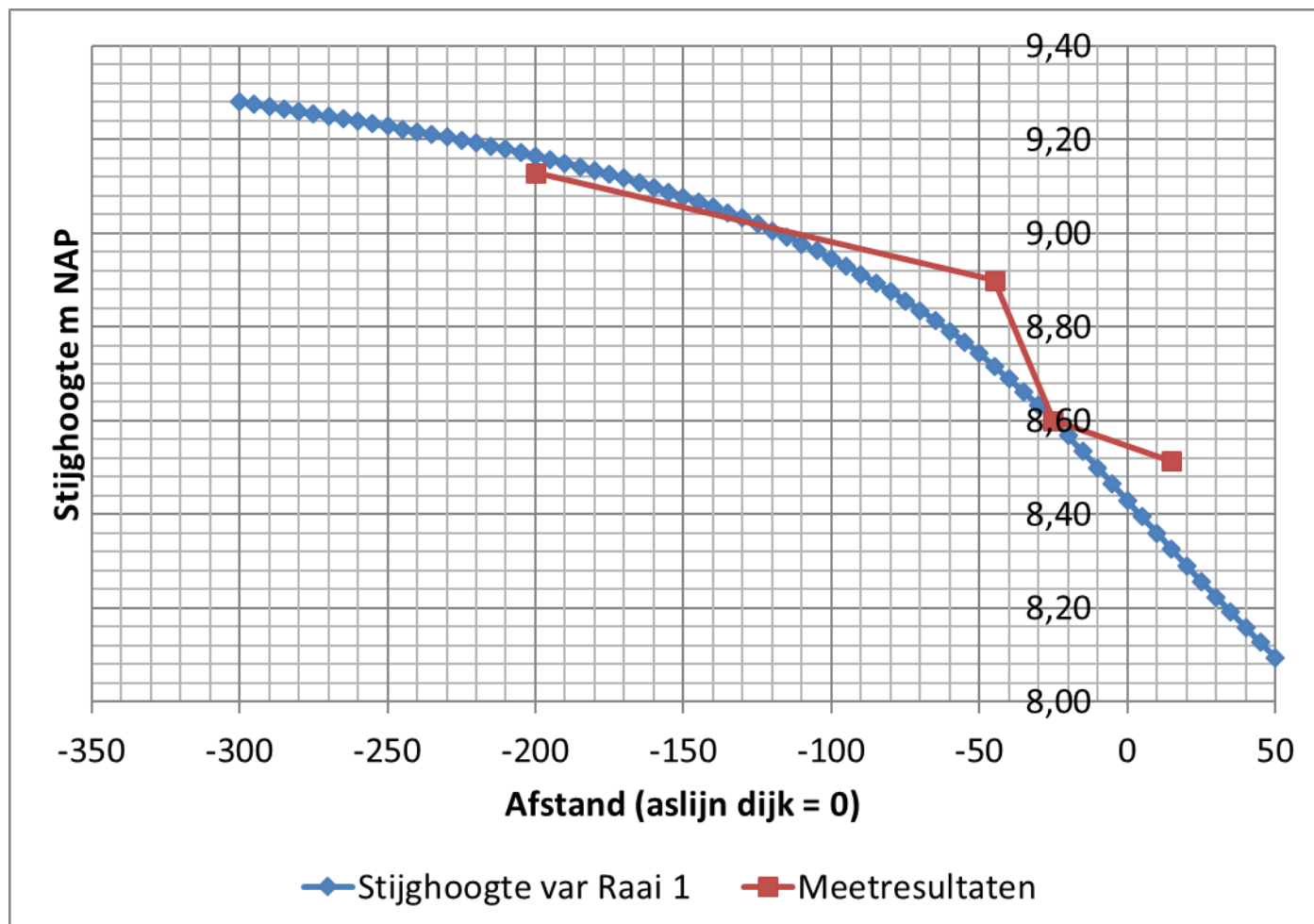
NOTITIE



Figuur 7-26 Resultaten fit 1 op meetresultaten van raai 1 bij deklaagdikte van 0,5m en een doorlatendheid van 0,04 m/d



NOTITIE



Figuur 7-27 Resultaten fit 2 op meetresultaten van raai 1 bij deklaagdikte van 1m en een doorlatendheid van 0,1 m/d



NOTITIE

Bijlage 4 Peilbuis validatie en analyse langdurige meetreeksen



validatie

Voor de langdurige meetreeksen is een selectie gemaakt op basis of de reeks compleet is en of het hoogwater van 2017-2018 aanwezig is. De resultaten hiervan zijn opgenomen in tabel 7-12.

Tabel 7-12 Gevalideerde meetreeksen langdurige peilbuismetingen

Id	Dijkpaal	Naam	Bovenkant peilbuis	opmerkingen
40116	48,5	Grebbedijk Ruinemans halverwege	8,61	Achterland
40117	48,5	Grebbedijk Ruinemans beneden	8,57	Achterland



NOTITIE

40119	40	Grebbedijk W.Rooyen halverwege	9,98	Incompleet
40120	40	Grebbedijk W.Rooyen beneden	9,64	Achterland
40121	23	Grebbedijk Helperich boven	12,26	Hoogwater 2017- 2018 niet aanwezig
40130	4	Grebbedijk Van Lent halverwege	9,05	Achterland
40131	4	Grebbedijk 't Spijk beneden	8,87	Achterland
BP-A1-Pb	44	BP-A1-Pb	7,695	Incompleet
BK-C1-Pb	44	BK-C1-Pb	7,957	Achterland
BP-D1-Pb	44	BP-D1-Pb	7,006	Hoogwater 2017- 2018 niet aanwezig
BP-G1-Pb	6	BP-G1-Pb	8,49	Achterland
BP-G2-Pb	6	BP-G2-Pb	8,507	Achterland
BP-H1-Pb	6	BP-H1-Pb	8,614	Achterland

Bepaling respons stijghoogte

De stijghoogte respons in het achterland is bepaald door het maken van responsgrafieken. Hierbij worden de waterstand en de peilbuismetingen tegen elkaar uitgezet. De raaklijn aan het stijgende deel van de grafiek geeft de responsfactor. Het stijgende gedeelte van de grafiek geeft het stijgen van de waterstand van de Neder-Rijn en het stijgen van de stijghoogte weer. Als de grafiek niet stijgt bij een stijgende waterstand houdt dat in dat de stijghoogte niet toeneemt bij toenemende buitenwaterstand. Voor de Grebbedijk geldt in veel gevallen dat eerst het voorland moet onderlopen en dat gebeurt pas bij een hoge waterstand, daarom loopt het eerste deel van de grafiek in veel gevallen recht.

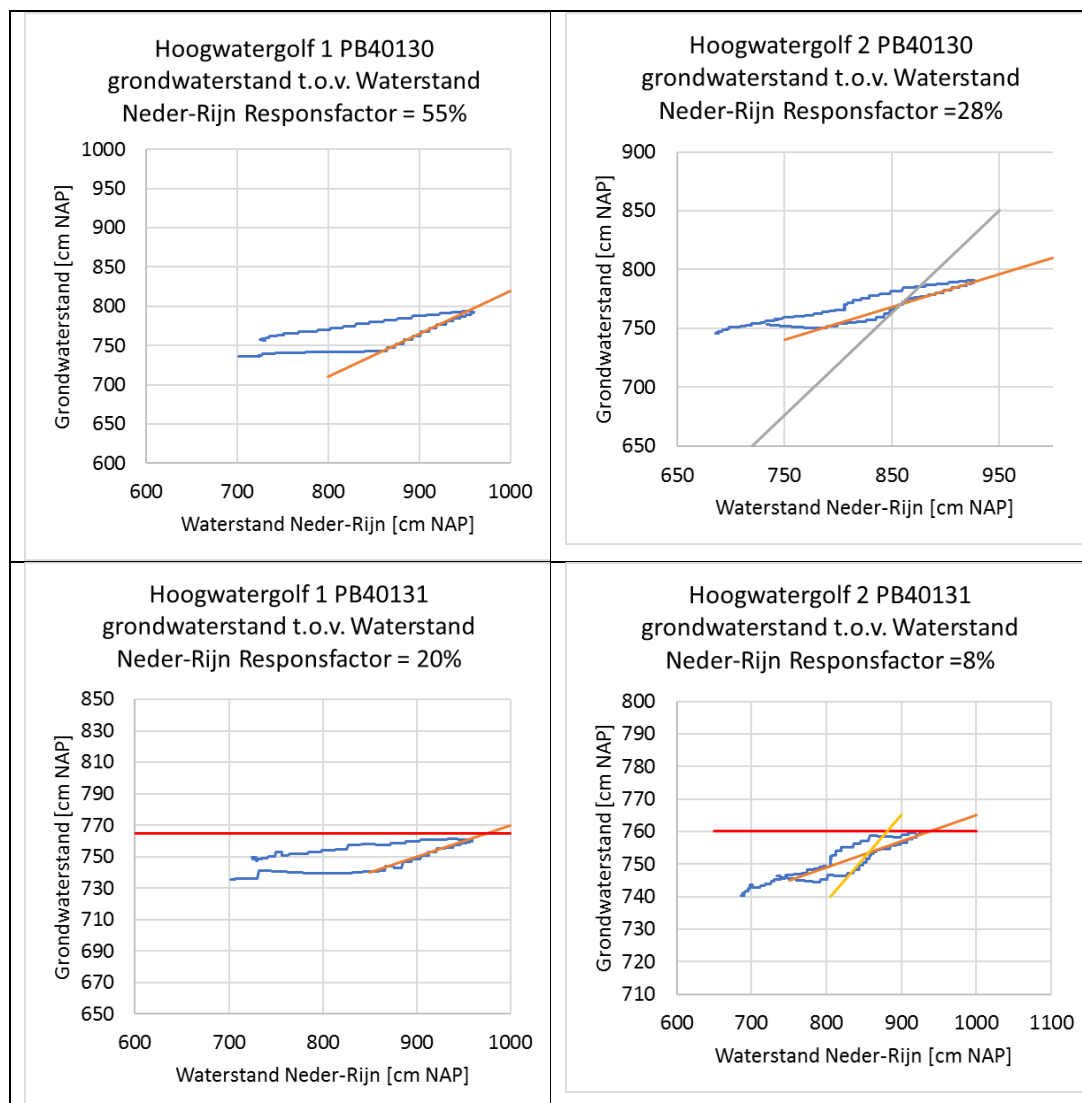
De raaklijn (in oranje aangegeven in de grafieken) wordt getrokken op het gedeelte van de grafiek waar een duidelijke respons op de buitenwaterstand te herkennen is. Deze raaklijn wordt in principe getrokken op basis van het laatste gedeelte van de meetreeks, omdat dit het meest representatieve gedeelte van de responscurve is, omdat deze meetresultaten het dichtst bij de maatgevende condities liggen. Bij het trekken van de raaklijn voor de verschillende peilbuizen zijn ook de meetresultaten van de andere peilbuizen beschouwd om een zo betrouwbaar mogelijk resultaat te verkrijgen. In onderstaande figuren is dat gedaan voor de vier meetraaien voor de 1^e en 2^e hoogwatergolf. In oranje is de raaklijn



NOTITIE

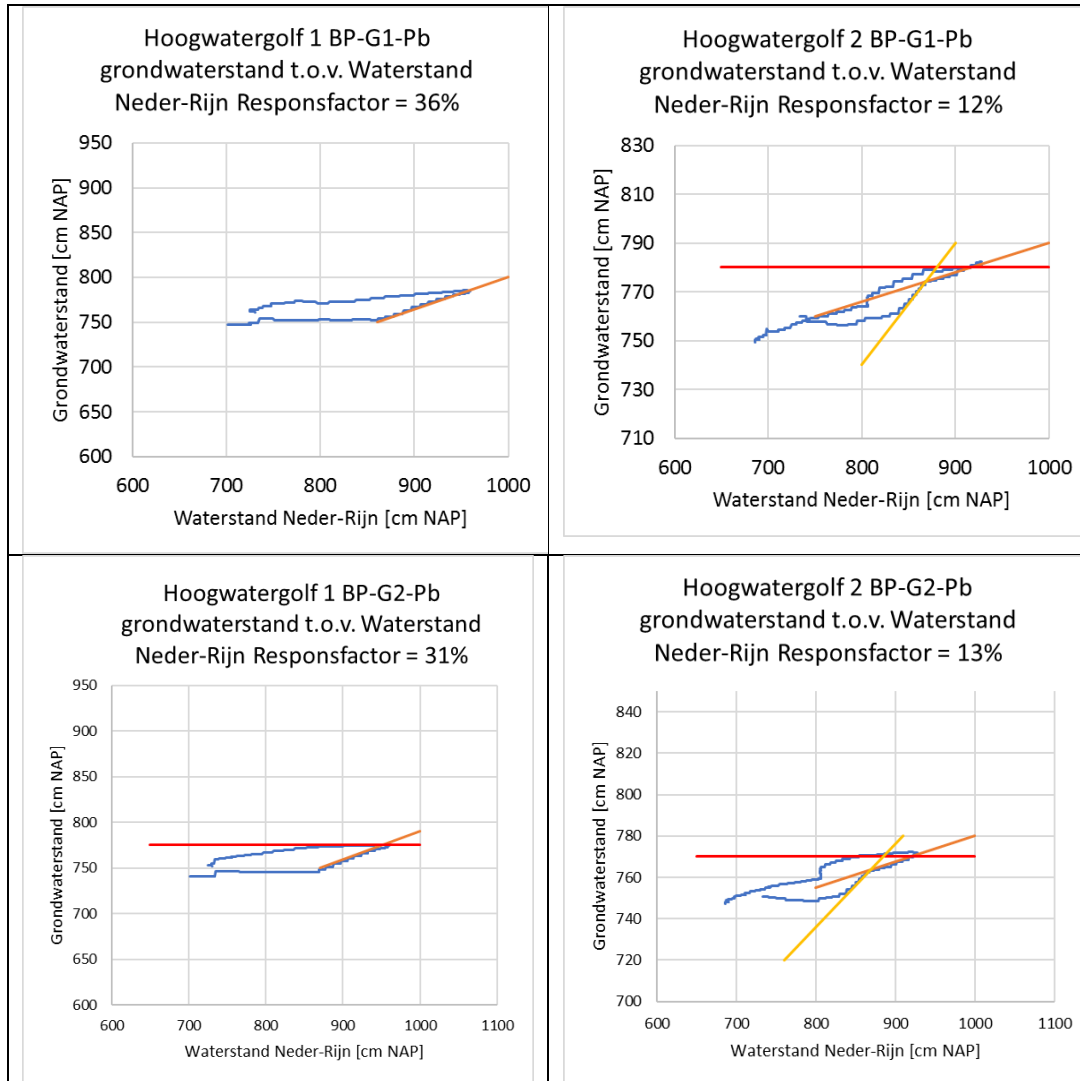
aangegeven die gebruikt is ter bepaling van de respons. Een rode lijn geeft een mogelijk punt van opbarsten aan. Voor sommige gevallen is een 2^e of zelfs 3^e raaklijn aangegeven. Tijdens het stijgen van het grondwater komt er een kantelpunt waardoor waarschijnlijk de sloten sterk gaan draineren, dit effect wordt sterker bij hogere waterstand. Daarom is voor de respons de raaklijn aan het laatst stijgende gedeelte getrokken.

De responsfactor aangegeven in de grafieken is de hellingshoek van de raaklijn. Een responsfactor van 50 % geeft aan dat bij een stijging van de buitenwaterstand met 4 m de stijghoogte met 2 m toeneemt. Door extrapolatie van de raaklijn op basis van de respons wordt de stijghoogte tijdens maatgevende condities bepaald.



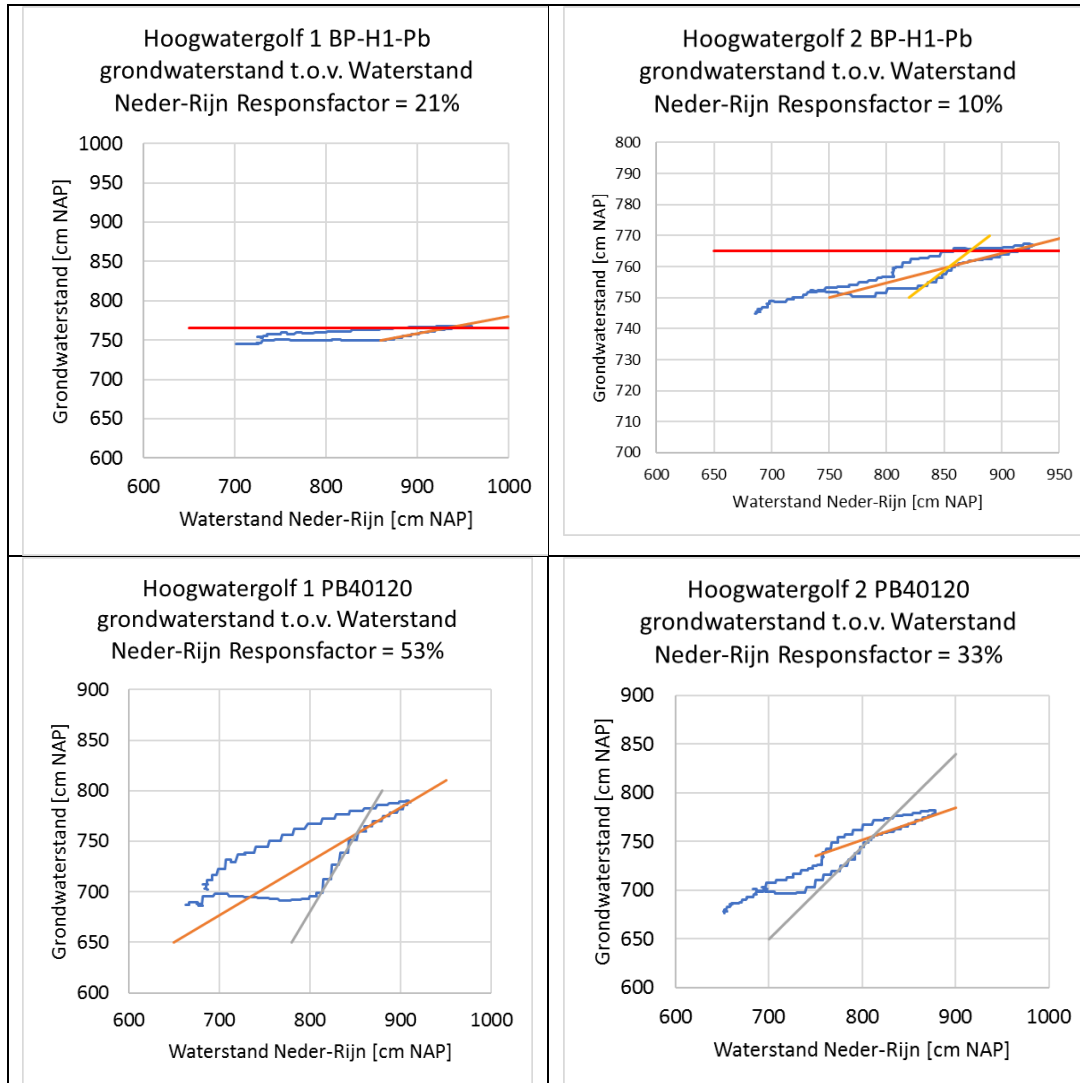


NOTITIE



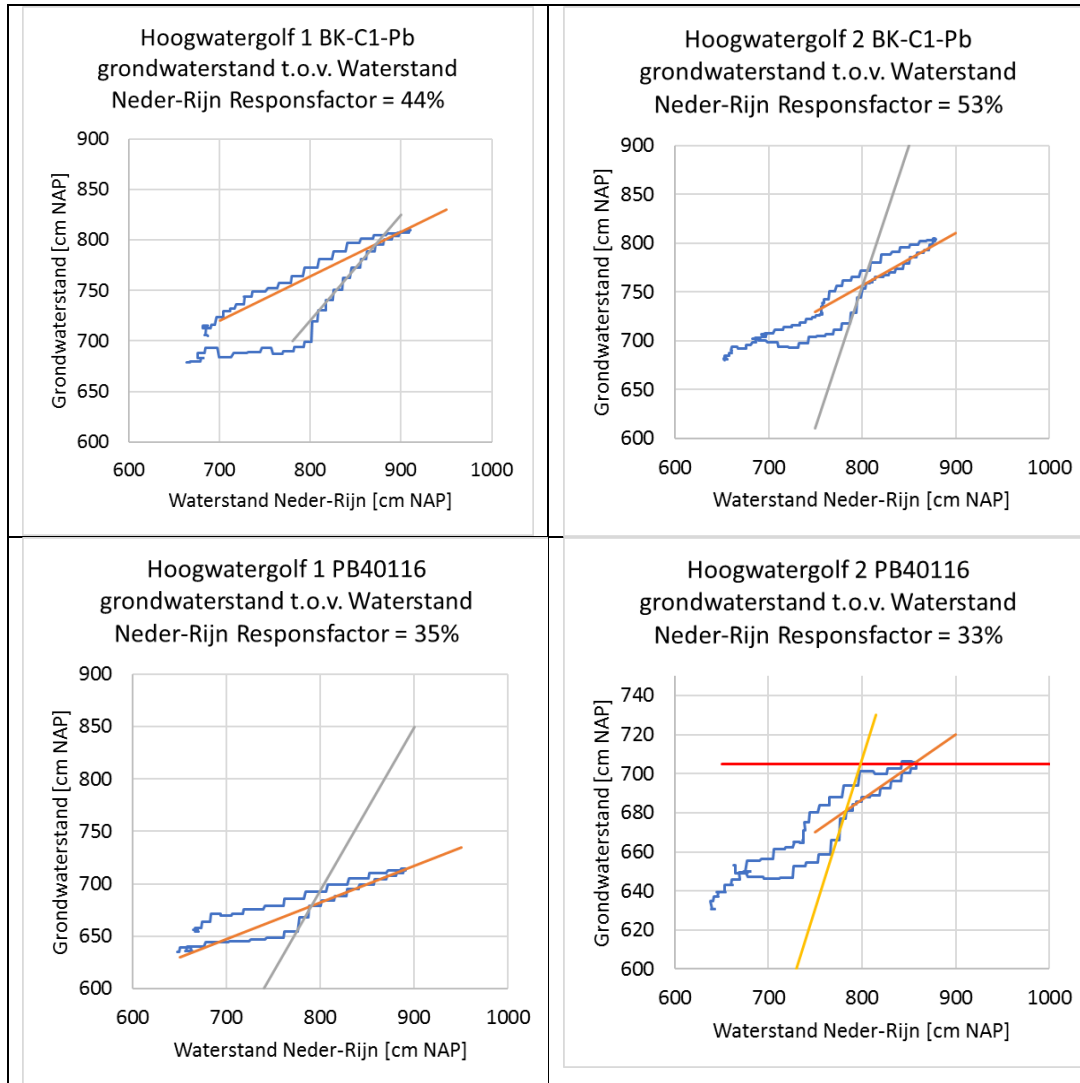


NOTITIE



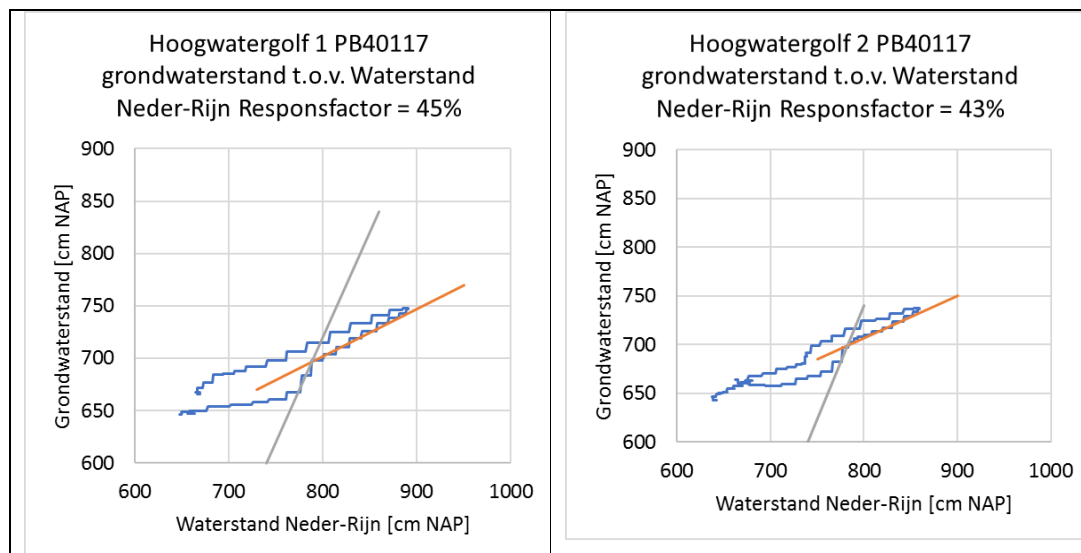


NOTITIE





NOTITIE



Figuur 7-28 Responsgrafieken voor langdurige meetreeksen tijdens 1^e en 2^e hoogwatergolf

De resultaten van de bovenstaande analyse is samengevat in tabel 7-13.

Tabel 7-13 resultaten responsfactor langdurige meetreeksen

Id	Dijk-paal	Respons 1 ^e golf [%]	Respons 2 ^e golf [%]	Max stijghoogte bij WBN (ca. NAP+12,0 m) [m NAP]	Stijghoogte Dagelijkse Omstandigheden [m NAP]
40116	48,5	0,55	0,28	9,3	6
40117	48,5	0,20	0,08	8,1	6,05
40120	40	0,36	0,12	8,7	6,2
40130	4	0,31	0,13	8,5	7,1
40131	4	0,21	0,10	8,2	7,2
BK-C1-Pb	44	0,53	0,33	9,4	6,15
BP-G1-Pb	6	0,44	0,53	9,7	7,2
BP-G2-Pb	6	0,35	0,33	8,2	7,1
BP-H1-Pb	6	0,45	0,43	8,8	7,1



NOTITIE



NOTITIE

Bijlage 5 Waterspanningsmeter validatie en analyse

Validatie meetresultaten

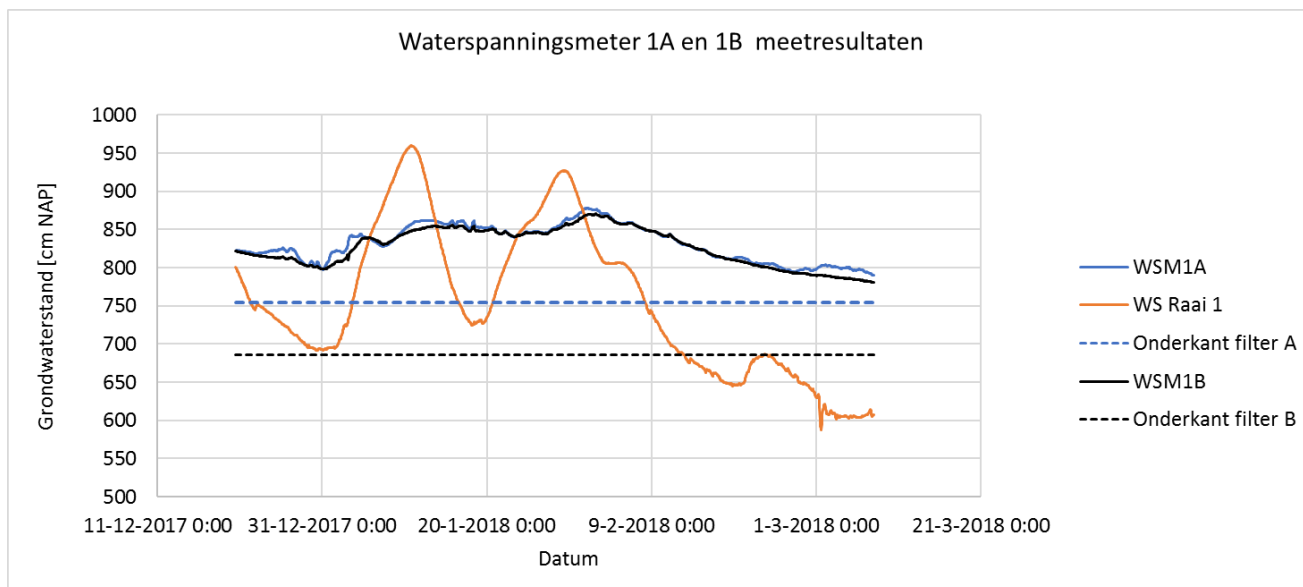
Op vier meetraaien zijn op de binnenkruin en binnenteen van het dijklichaam waterspanningsmeters geplaatst. De plaatsingsgegevens zijn weergegeven in bijlage 2. In onderstaande figuren zijn de meetreeksen t.o.v. de geïnterpoleerde waterstand weergegeven. De stippellijnen geven de onderkant van het filter aan van de desbetreffende meetreeks.

Uit de vergelijking van de meetreeksen en de onderkant filter komt naar voren dat op locaties 2A, 3A, 3B en 4A momenten voorkomen waarop de meetreeks zich op of onder de filterdiepte bevindt. Op deze locaties is het niet duidelijk of de grondwaterstand verder zou zakken indien de filter dieper zou zijn.

De resultaten van meetraai weergegeven in figuur 7-29 laten een trage respons op het hoogwater zien. Er is weinig tot geen verschil tussen locatie A en B. Zodra het hoogwater afneemt daalt de grondwaterstand. De pieken in de grondwaterstand in de dijk vinden later plaats dan de hoogwater pieken. De grondwaterstand komt onder dagelijkse condities uiteindelijk rond NAP +7,5 m uit.

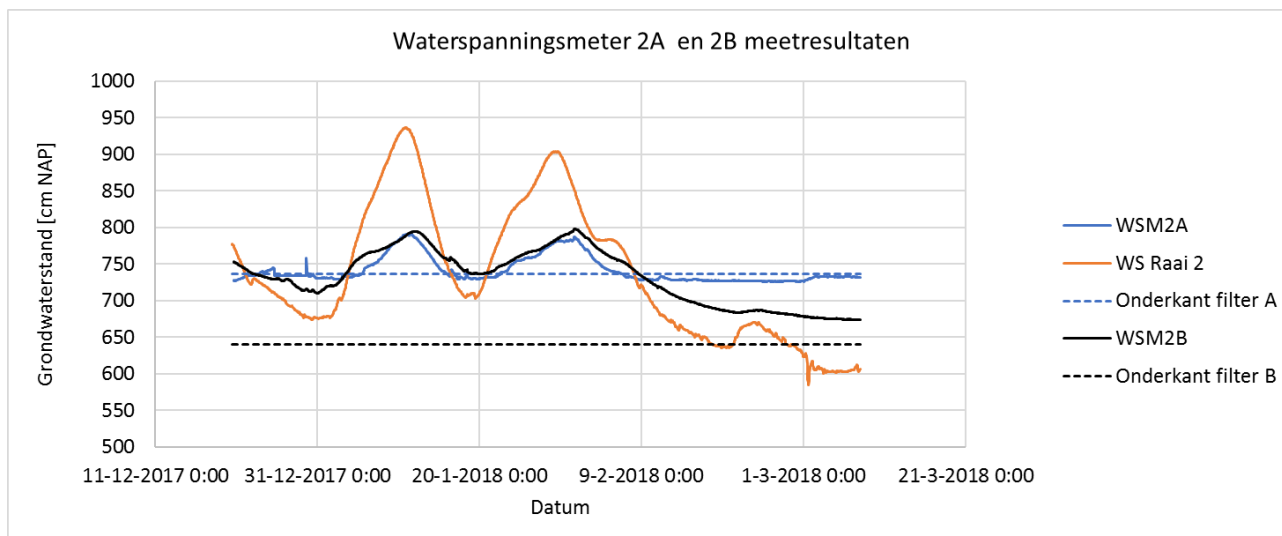


NOTITIE



Figuur 7-29 Meetresultaten WSM1A en WSM1B

De meetresultaten van meetraai 2 zijn weergegeven in figuur 7-30. De grondwaterstand reageert vertraagt op de buitenwaterstand. De meetresultaten van WSM2A liggen onder de onderkant filter. De pieken van de grondwaterstand liggen voor beide hoogwatergolven even hoog.

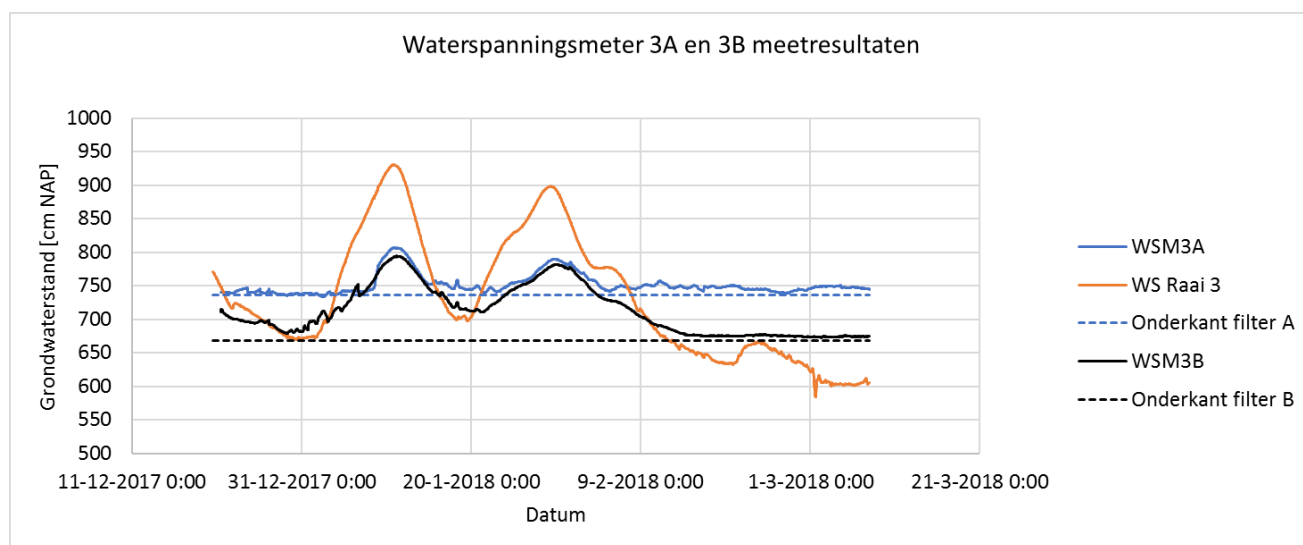


Figuur 7-30 Meetresultaten WSM2A en WSM2B



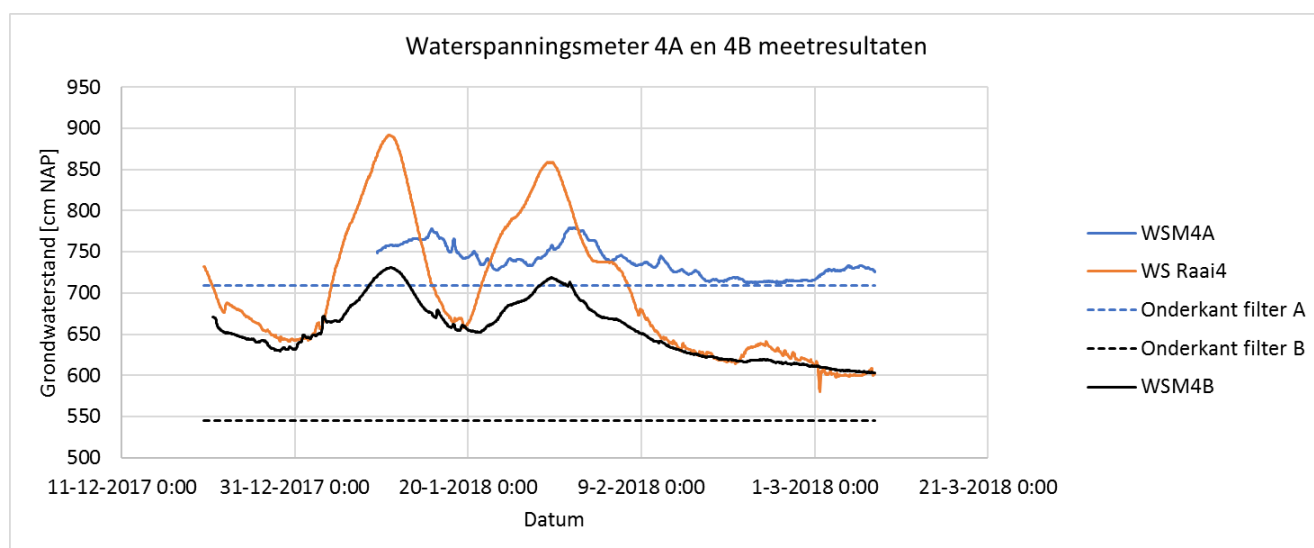
NOTITIE

Figuur 7-31 geeft de meetresultaten van raai 3 weer. Op beide locaties ligt de meetreeks bijna op onderkant filter na het hoogwater. Dit kan er op duiden dat dit de grondwaterstand is of dat de grondwater verder gedaald is.



Figuur 7-31 Meetresultaten WSM3A en WSM3B

De meetresultaten van raai 4 zijn weergegeven in figuur 7-32. De grondwaterstand op locatie WSM4A ligt hoger dan 4B. De meetreeks van WSM4A ligt na het hoogwater in de buurt van onderkant filter. Hieruit is niet op te maken of de grondwaterstand verder daalt.





NOTITIE

Figuur 7-32 Meetresultaten WSM4A en WSM4B

Bepaling respons grondwaterstand

De respons van het grondwater in het dijklichaam is bepaald door een raaklijn aan de responsgrafiek te trekken.

De respons van de grondwaterstand in het dijklichaam is bepaald door het maken van responsgrafieken. Hierbij worden de waterstand en de waterspanningsmetingen tegen elkaar uitgezet. De raaklijn aan het stijgende deel van de grafiek geeft de responsfactor. Het stijgende gedeelte van de grafiek geeft het stijgen van de waterstand van de Neder-Rijn en het stijgen van de grondwaterstand weer. Als de grafiek niet stijgt bij een stijgende waterstand houdt dat in dat de grondwaterstand in het dijklichaam niet toeneemt bij toenemende buitenwaterstand. Voor de Grebbedijk geldt in veel gevallen dat eerst het voorland moet onderlopen en dat gebeurt pas bij een hoge waterstand, daarom loopt het eerste deel van de grafiek in veel gevallen recht.

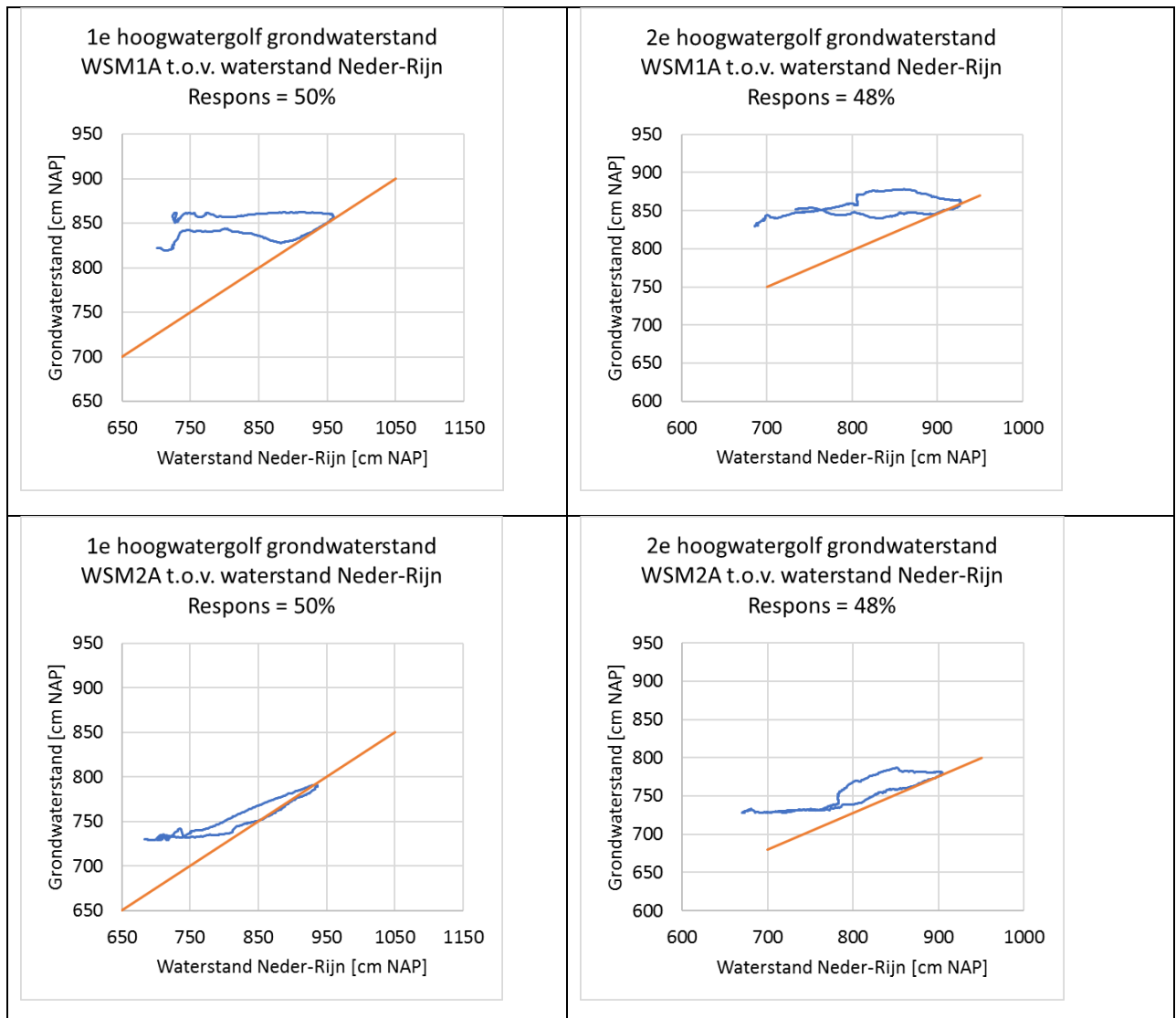
De raaklijn (in oranje aangegeven in de grafieken) wordt getrokken op het gedeelte van de grafiek waar een duidelijke respons op de buitenwaterstand te herkennen is. Deze raaklijn wordt in principe getrokken op basis van het laatste gedeelte van de meetreeks, omdat dit het meest representatieve gedeelte van de responscurve is, omdat deze meetresultaten het dichtst bij de maatgevende condities liggen. Bij het trekken van de raaklijn voor de verschillende peilbuizen zijn ook de meetresultaten van de andere peilbuizen beschouwd om een zo betrouwbaar mogelijk resultaat te verkrijgen. In onderstaande figuren is dat gedaan voor de vier meettraaien voor de 1^e en 2^e hoogwatergolf. In oranje is de raaklijn aangegeven die gebruikt is ter bepaling van de respons.

De responsfactor aangegeven in de grafieken is de hellingshoek van de raaklijn. Een responsfactor van 50 % geeft aan dat bij een stijging van de buitenwaterstand bijv. met 4m de grondwaterstand in het dijklichaam met 2 m toeneemt. Door extrapolatie van de raaklijn op basis van de respons wordt de grondwaterstand tijdens maatgevende condities bepaald.



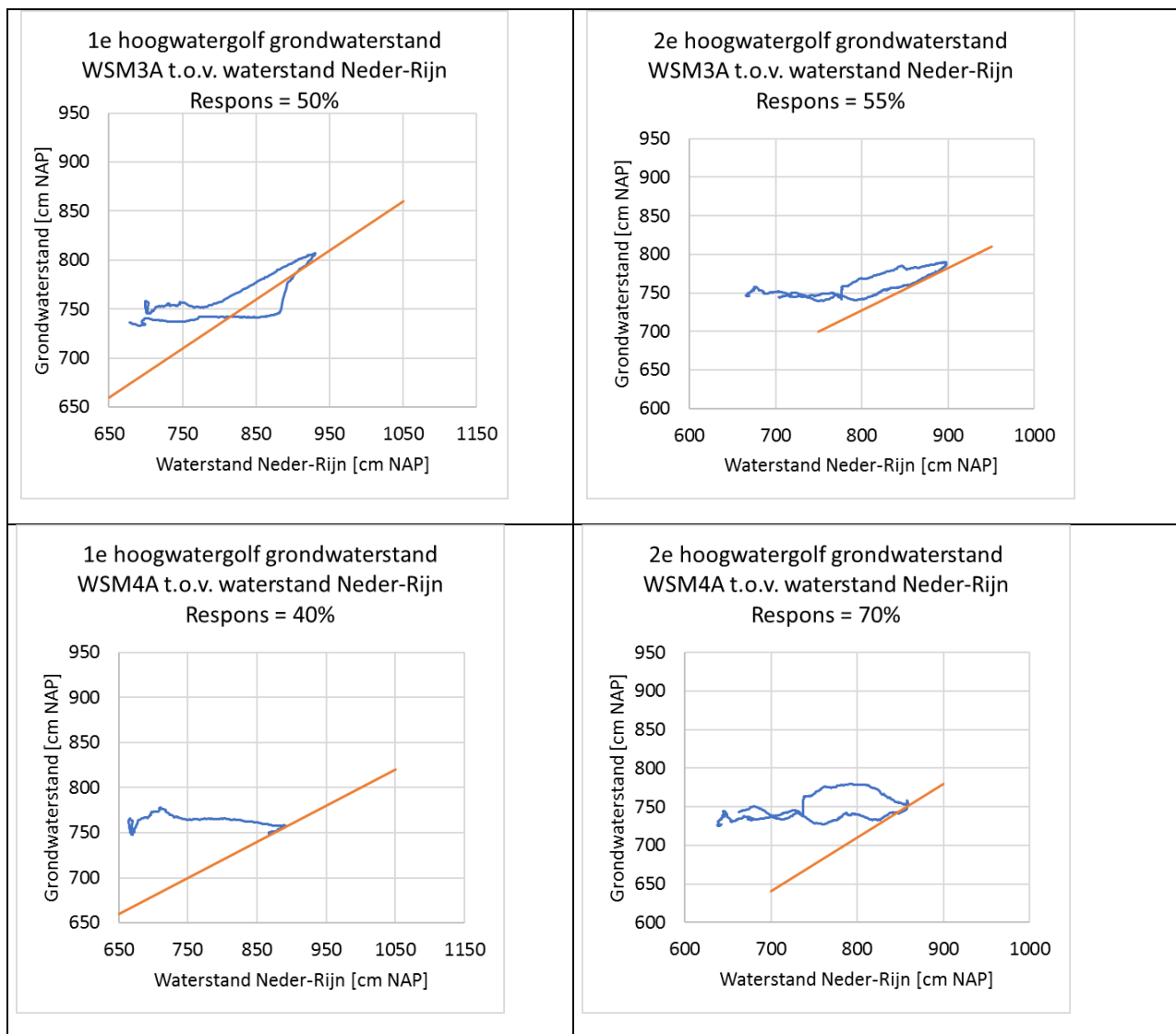
NOTITIE

Responsgrafieken voor de binnenkruinlijn





NOTITIE

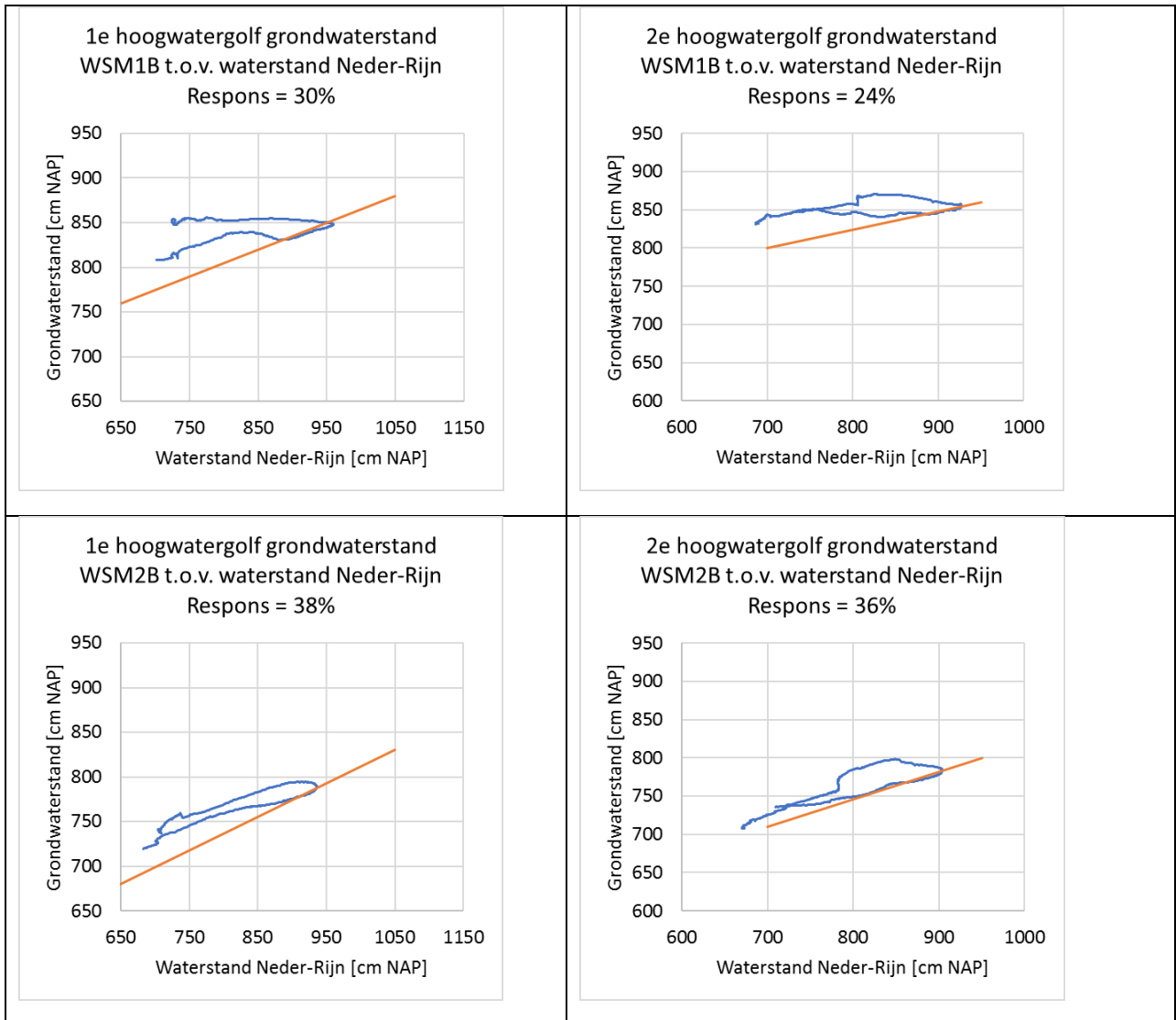


Figuur 7-33 responsgrafieken grondwaterstand binnenkruinlijn



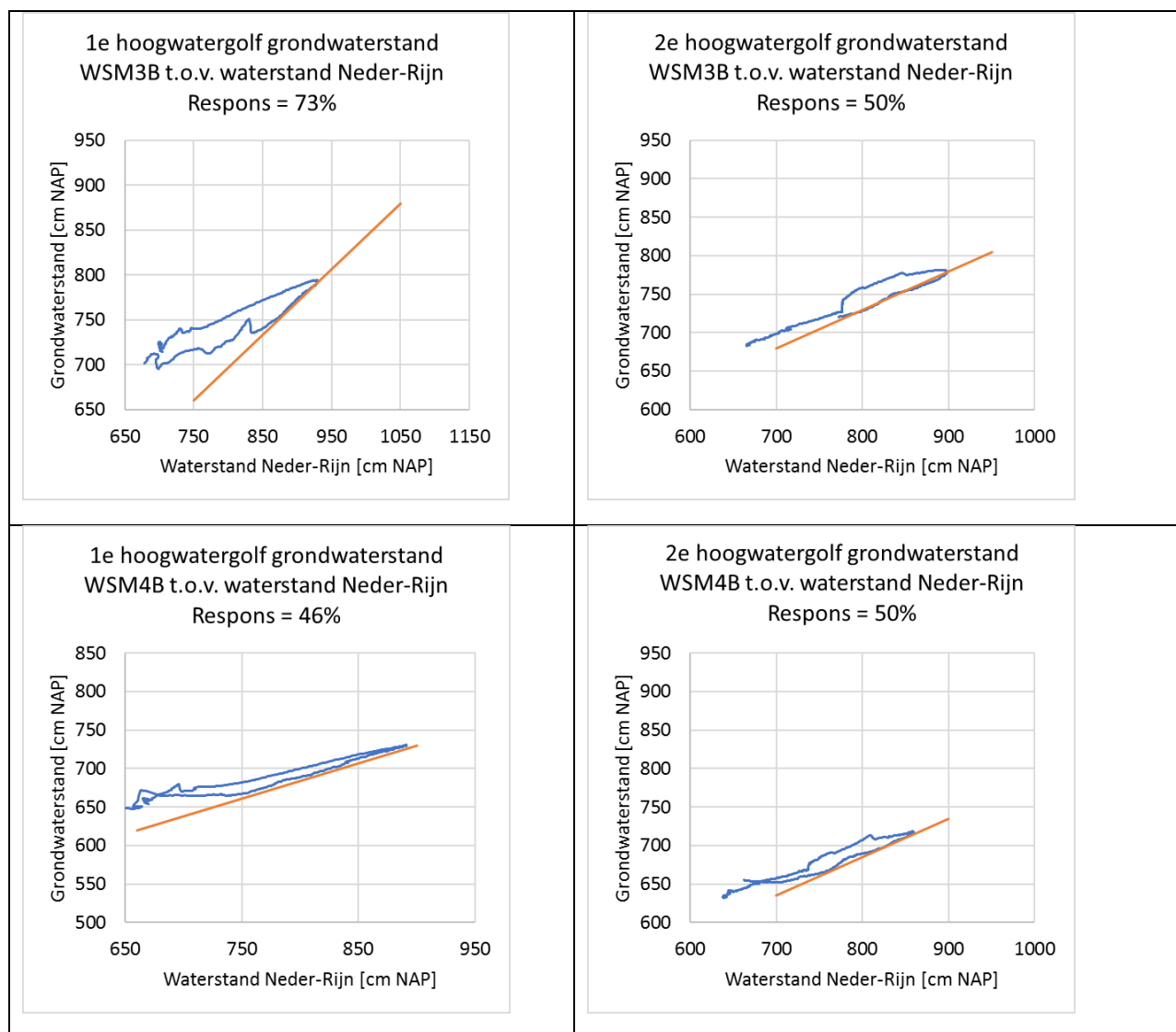
NOTITIE

Responsgrafieken voor de binnenteen





NOTITIE



Figuur 7-34 Responsgrafieken grondwaterstand binnenteen

Tabel 7-14 Responsfactoren grondwaterstand

Id WSM	Dijkpaal	Responsfactor 1 ^e hoogwater golf [%]	Responsfactor 2 ^e hoogwater golf [%]	Maximale Grondwaterstand tijdens WBN (ca. NAP +12,0 m) [m NAP]	Stijghoogte Dagelijkse Omstandigheden [m NAP]
1A	2	0,50	0,48	9,9	Ca. <8m (lijkt leeg te lopen)



NOTITIE

1B	2	0,30	0,24	9,3	Ca. <8m, (lijkt leeg te lopen)
2A	22	0,50	0,48	9,3	Ca. 7,3
2B	22	0,38	0,36	8,9	Ca. 6,8
3A	29	0,50	0,55	9,5	Ca. 7,4
3B	29	0,73	0,50	9,9	Ca. 6,8
4A	51	0,40	0,70	9,9	Ca. 7,1
4B	51	0,46	0,50	8,9	Ca. 6,0

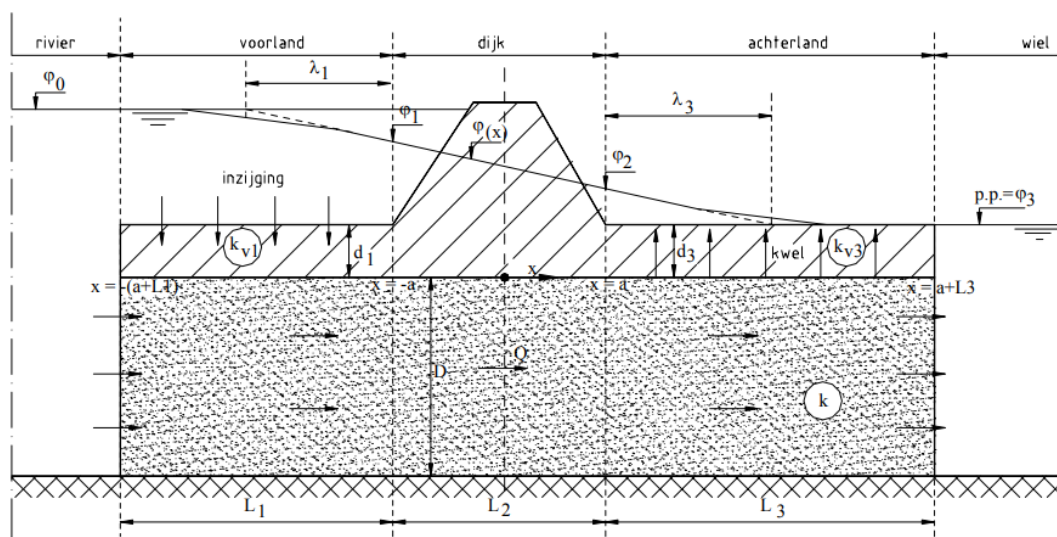
NOTITIE

Bijlage 6 Fit meetresultaten

Bepaling doorlatendheden

De bepaling van de doorlatendheden van het voor en achterland wordt gedaan door een fit op de meetresultaten met behulp van de analytische formules uit [TR2004] en schematisatie volgens figuur 7-35. Deze analyse is uitgevoerd in Excel.

Voor een goede fit zijn zoveel mogelijk meetpunten op een lijn nodig in het voor en achterland. Meetraai 1 en 3 hebben meetresultaten in het voor en achterland. Uit de validatie van de meetdata blijkt dat de resultaten van meetraai 3 niet betrouwbaar zijn, hier wordt geen analyse op uitgevoerd. De fit wordt gemaakt op de meetresultaten van meetraai 1.



Figuur 7-35 Schematisering van grondwaterstroming ter plaatse van een kleidijk [TR 2004]

Voor de fit zijn de invoerparameters gebruikt zoals weergegeven in tabel 7-15, waarbij opgemerkt moet worden dat de parameter polderpeil een aanname is. Op deze locatie is geen peilbeheer.

Tabel 7-15 Parameters fit voor meetraai 1 dijkpaal 2

Parameters	Omschrijving	Waarde fit 1	Waarde fit 2
Buitenpeil	Waterstand Neder-Rijn	9,28 m	9,28 m



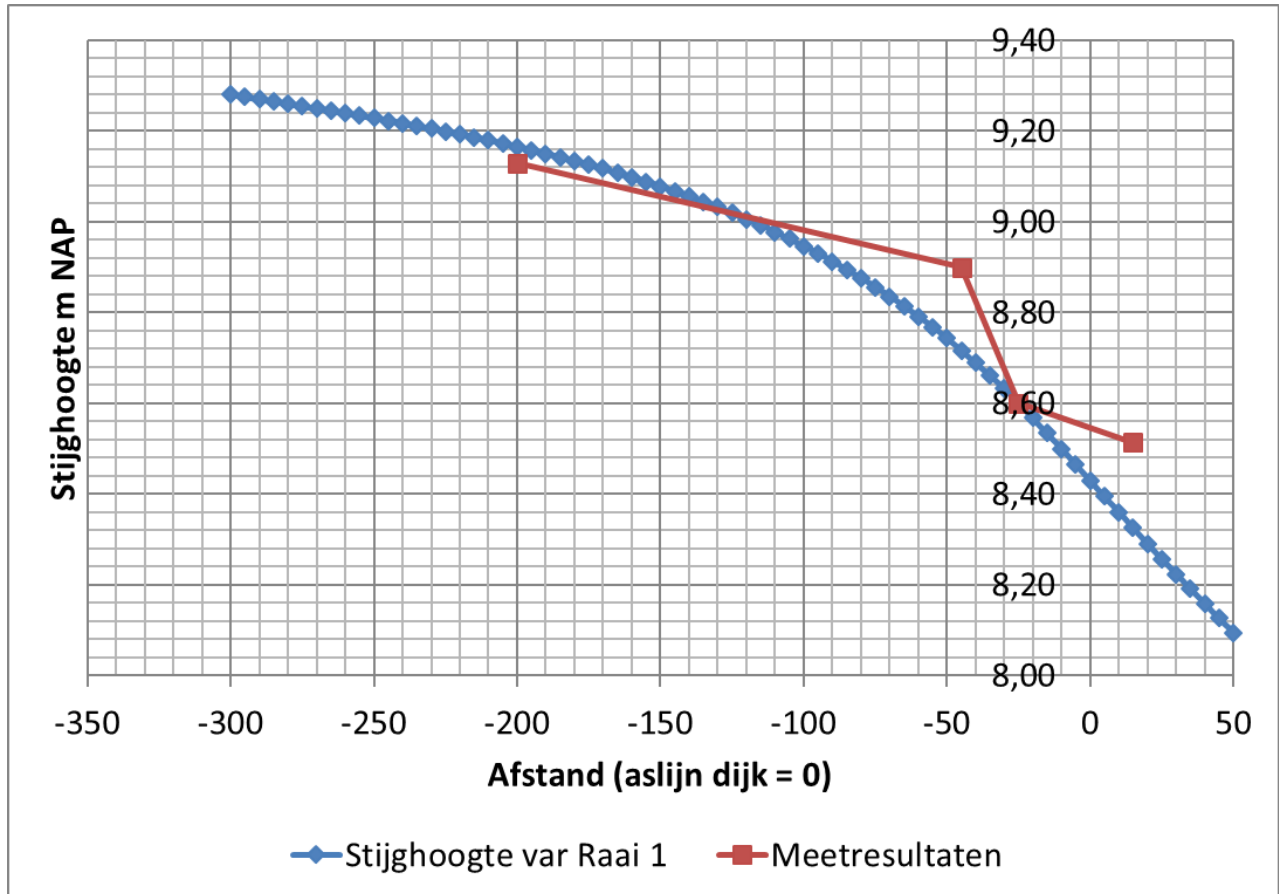
NOTITIE

Polderpeil	Waterstand in achterland	8,00 m	8,00 m
d1	Dikte deklaag voorland	0,5 m	1,0 m
d3	Dikte deklaag achterland	0,5 m	1,0 m
k1	Doorlatendheid deklaag voorland	Volgt uit Fit [m/dag]	Volgt uit Fit [m/dag]
k3	Doorlatendheid deklaag achterland	Volgt uit Fit [m/dag]	Volgt uit Fit [m/dag]
D	Dikte watervoerend pakket	22m	22m
K	Doorlatendheid watervoerend pakket	39 [m/dag]	39 [m/dag]
L voorland	Lengte tot intredepunt tot as-dijk	Kalibratie op basis van meetdata	Kalibratie op basis van meetdata
L dijk	Breedte dijk (teen tot teen)	30 m	30 m
L achterland	Lengte tot uittredepunt tot as-dijk	50 m	50 m

Er zijn meerdere combinaties mogelijk, ter vergelijking zijn er twee fits gemaakt waarbij de deklaagdikte en de doorlatendheid van de toplaag is gevarieerd. De deklaagdikte in het voorland en achterland varieert sterk. tot dezelfde fit te komen is er voor een twee keer dikkere deklaag een twee maal hogere doorlatendheid benodigd. Bij een deklaag van 0,5m komt de beste fit naar voren bij een doorlatendheid van 0,04 m/d. Voor een deklaag van 1m is de beste fit bij 0,1 m/d. De fit is grafisch weergegeven in figuur 7-36 en figuur 7-37. In tabel 7-16 zijn de berekende fictieve voorlandlengtes weergegeven voor de meetraaien. De respons in het achterland is niet goed te modelleren wegens onzekerheden in het achterland. Waarschijnlijk zorgt de regionale kwelstroom ervoor dat de respons in het achterland hoog is.



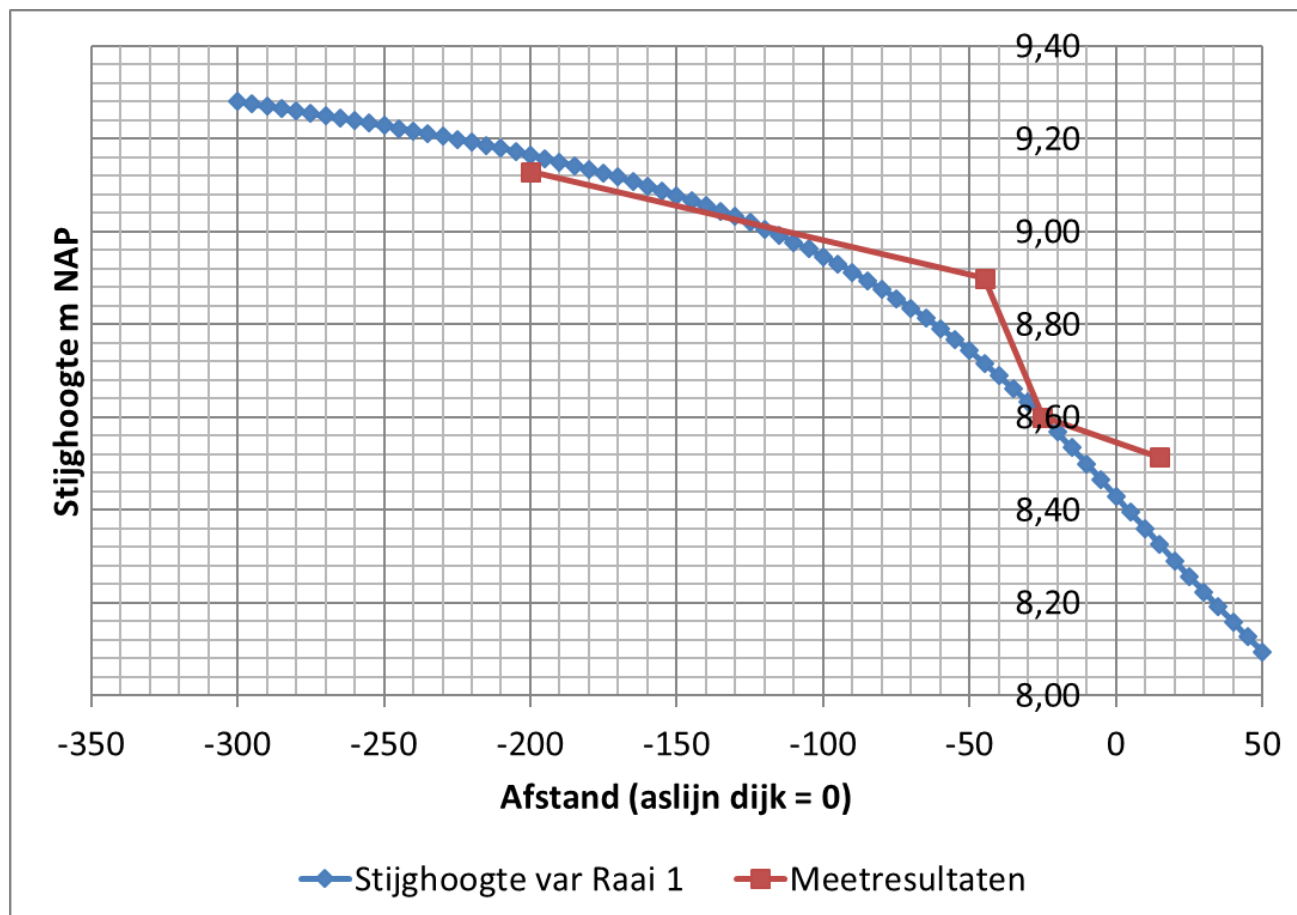
NOTITIE



Figuur 7-36 Resultaten fit 1 op meetresultaten van raai 1 bij deklaagdikte van 1m en een doorlatendheid van 0,04 m/d



NOTITIE



Figuur 7-37 Resultaten fit 2 op meetresultaten van raai 1 bij deklaagdikte van 1m en een doorlatendheid van 0,1 m/d



NOTITIE

Tabel 7-16 Fictieve voorlandlengtes

	DP 2	DP 22	DP 29	DP 51	
Parameters	Raai 1	Raai 2	Raai 3	Raai 4	
Buitenpeil	12,0	12,0	12,0	12,0	m NAP
Polderpeil	8,0	7,0	7,4	6,8	m NAP
d1	1,0	1,0	2,5	1,5	m
d3	1,0	2,5	3,0	2,5	m
k1	0,05	0,05	0,05	0,05	m/d
k3	0,05	0,05	0,05	0,05	m/d
D	30	25	25	50	m
K	41	41	41	47	m/d
Lvoorland	285	55	48	75	m
Ldijk	30	30	30	30	m
Lachterland	50	300	500	500	m
Tussenresultaten					
c1	20	20	50	30	d
c3	20	50	60	50	d
Labda1	157	143	226	266	m
Labda3	157	226	248	343	m
w1	0,12	0,05	0,05	0,03	d
w2	0,02	0,03	0,03	0,01	d
w3	0,04	0,19	0,23	0,13	d
a	15	15	15	15	m
fictieve lengte voorland	149	52	47	73	m



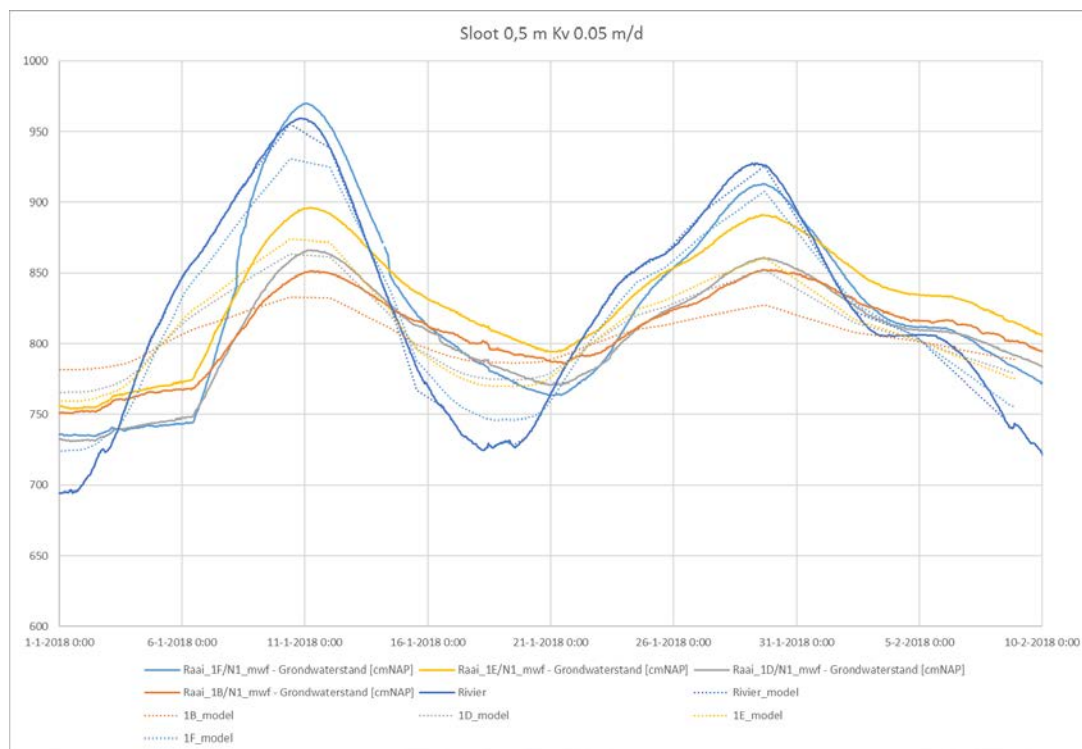
NOTITIE

Bijlage 7 Plaxis analyse

In de hieronder weergegeven figuren zijn de resultaten van de numerieke analyse met Plaxis gepresenteerd. Hierbij is gevarieerd in de doorlatendheid van de deklaag, en de dikte van de deklaag van de sloot. Waarbij de variaties zijn weergegeven in tabel 7-17.

Tabel 7-17 Variaties numerieke analyse Plaxis

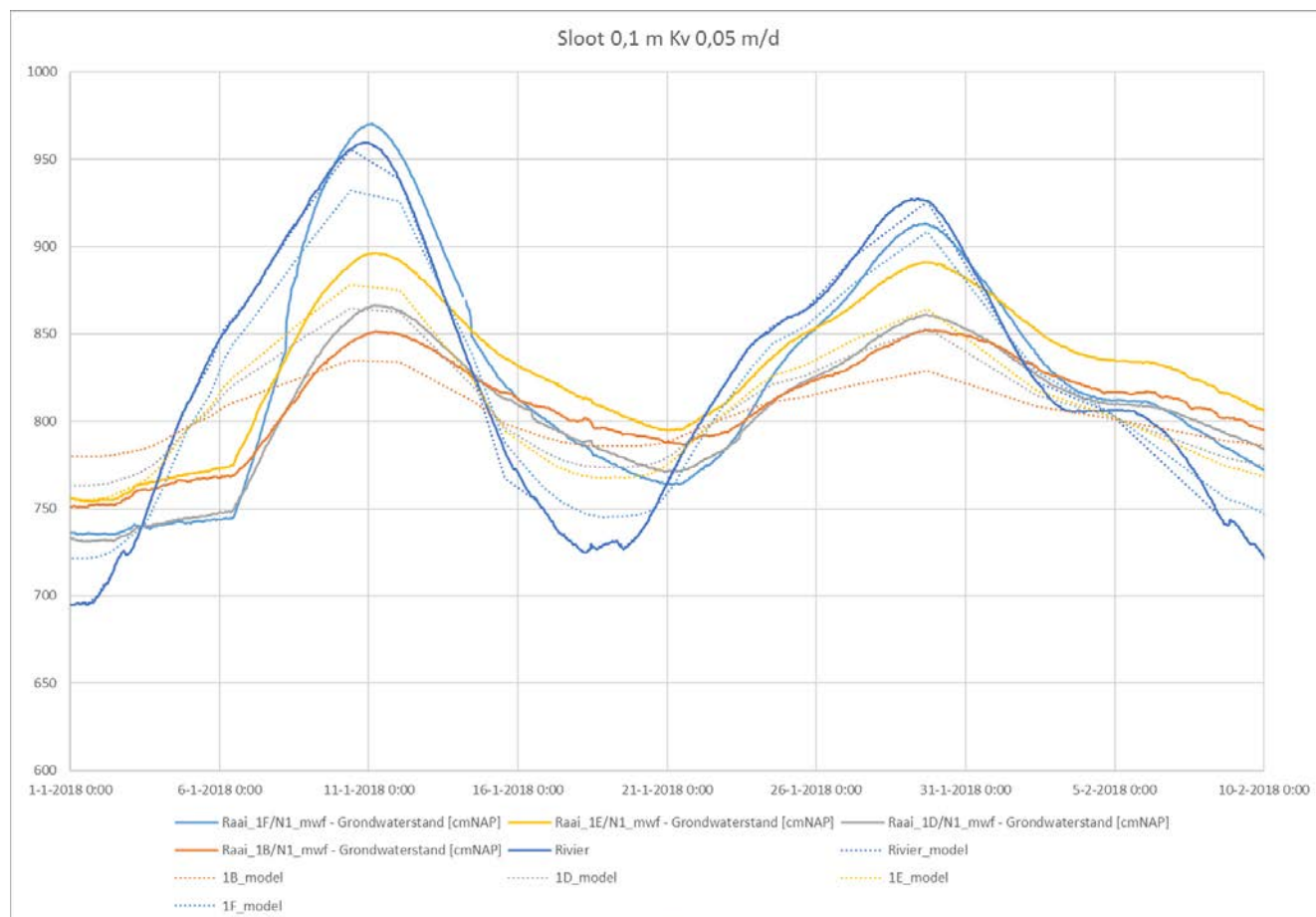
	Doorlatendheid [m/d]	Dikte deklaag sloot [m]
Var 1	0,05	0,5
Var 2	0,05	0,1
Var 3	0,05	0,0
Var 4	0,03	0,0
Var 5	0,01	0,0
Var 6	0,001	0,0



Figuur 7-38 Sloot 0,5 m kv 0,05 m/d



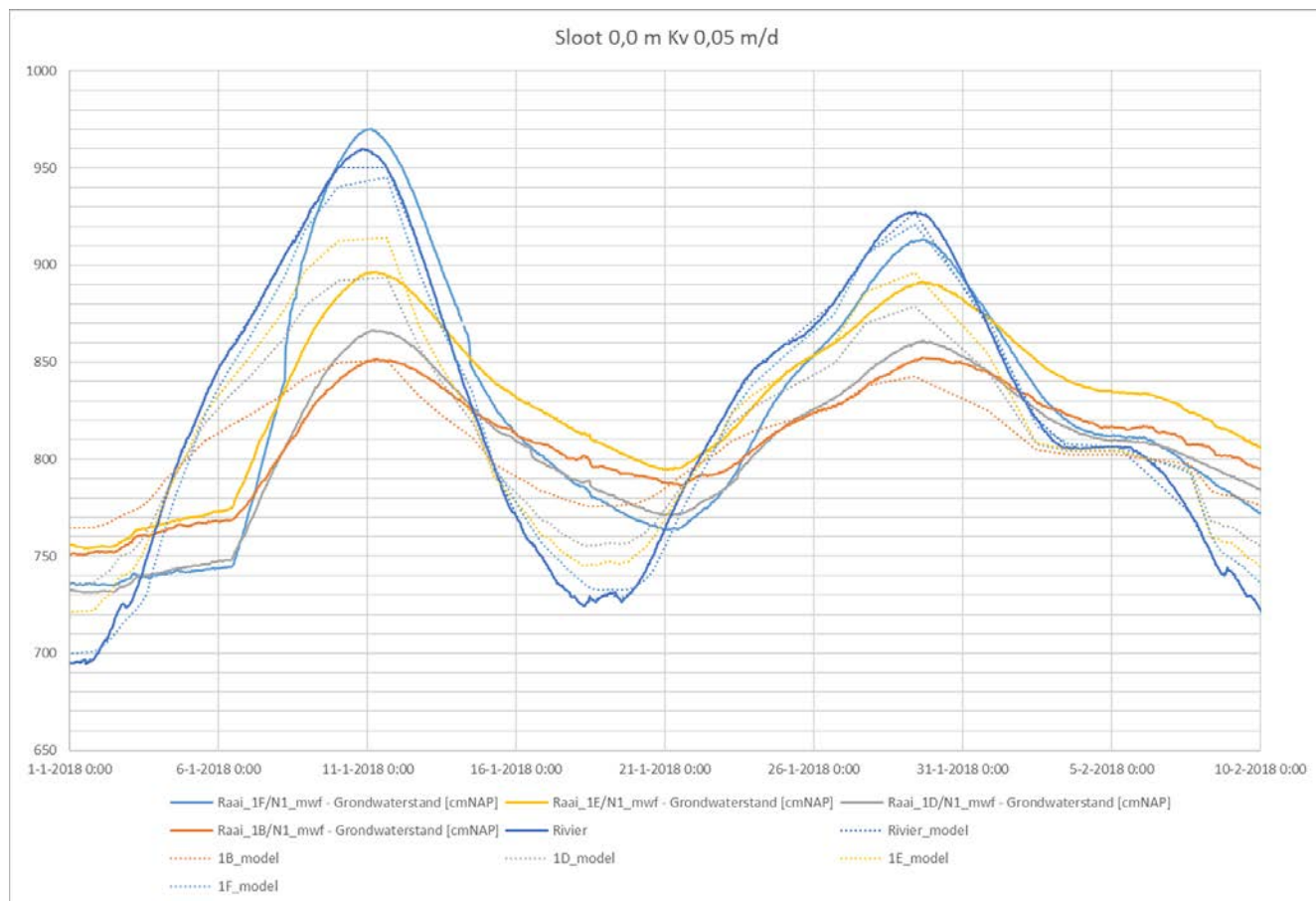
NOTITIE



Figuur 7-39 Sloot 0,1 m kv 0,05 m/d



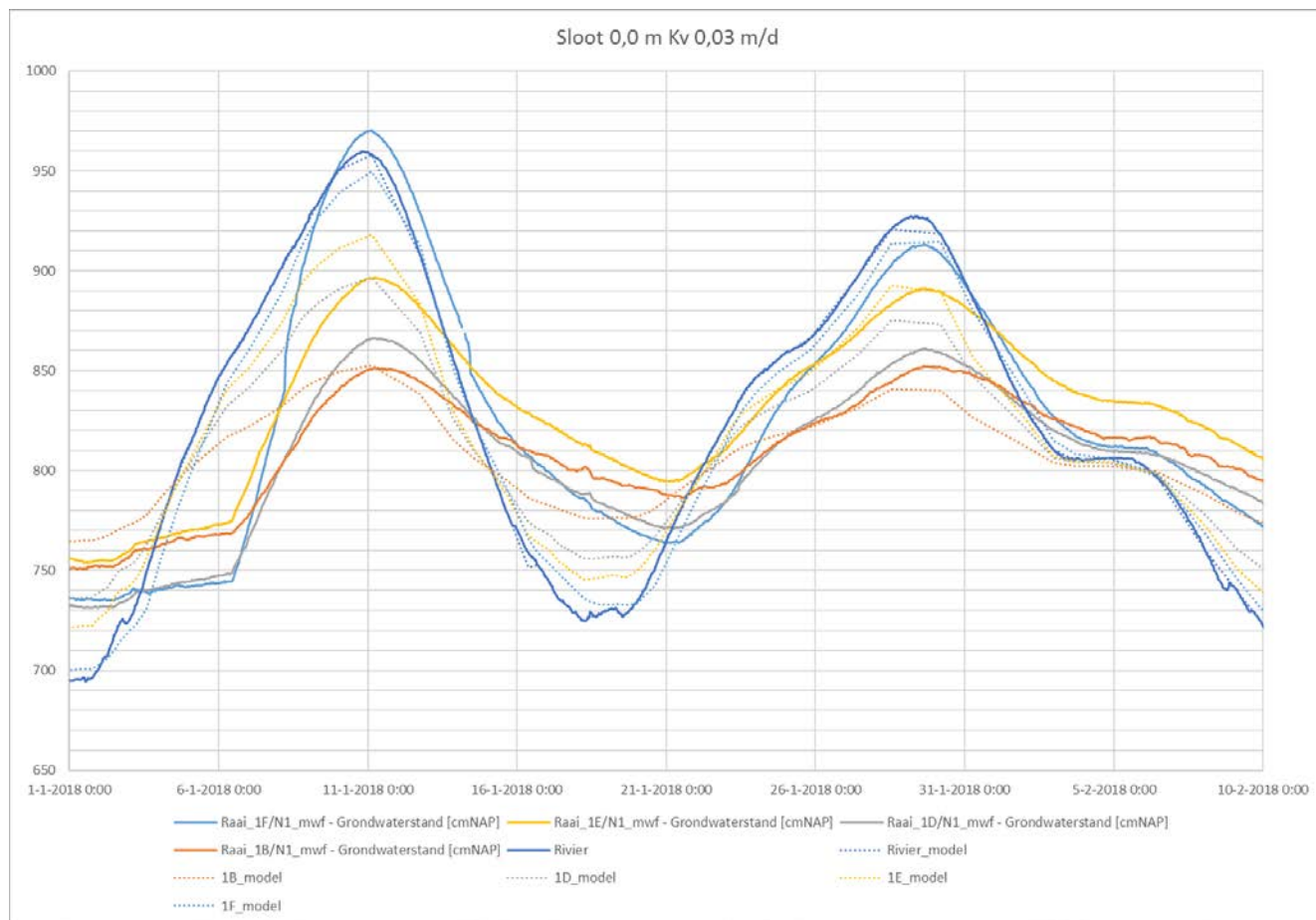
NOTITIE



Figuur 7-40 Sloot 0,0m kv 0,05 m/d



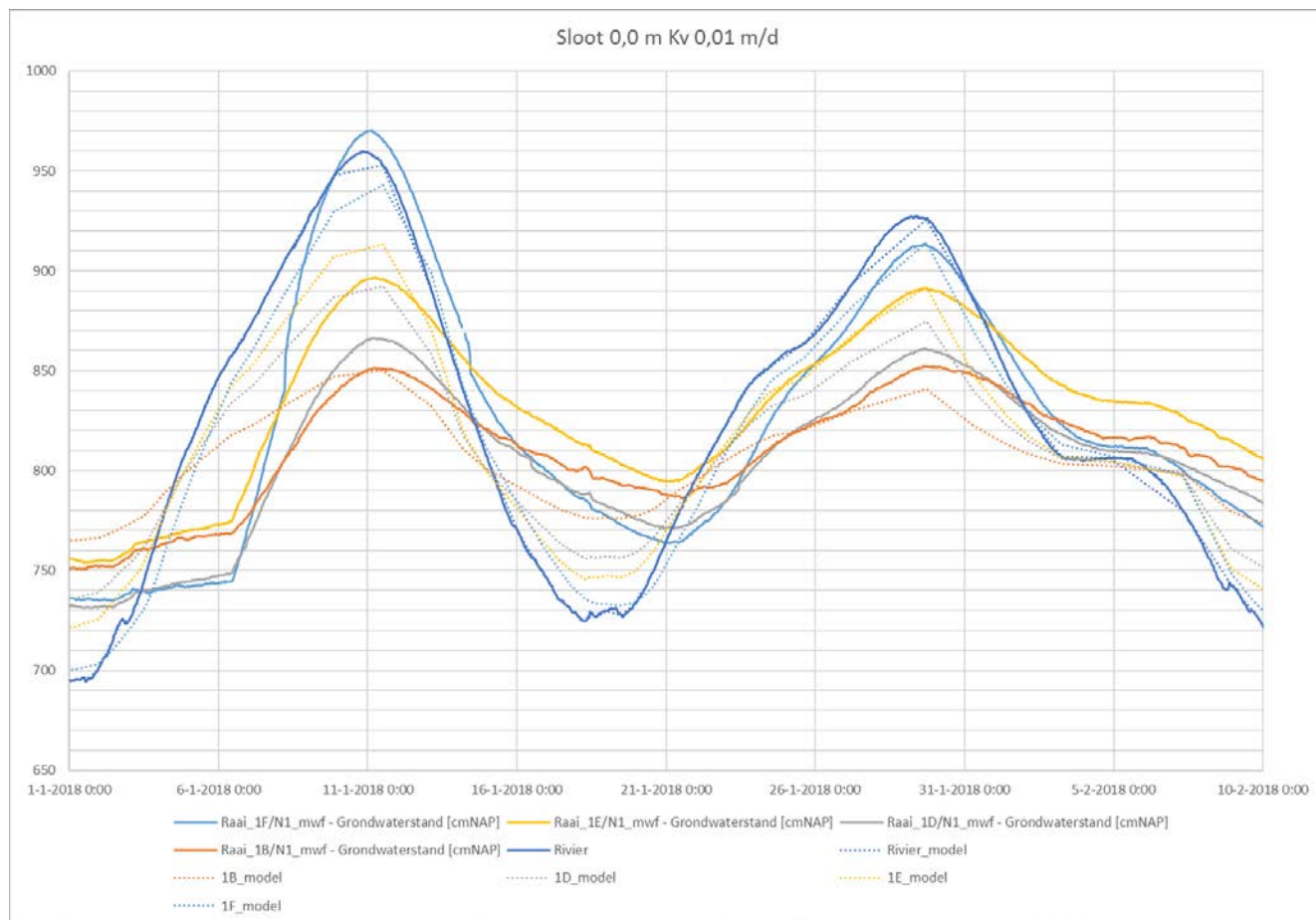
NOTITIE



Figuur 7-41 Sloot 0m kv 0,03 m/d



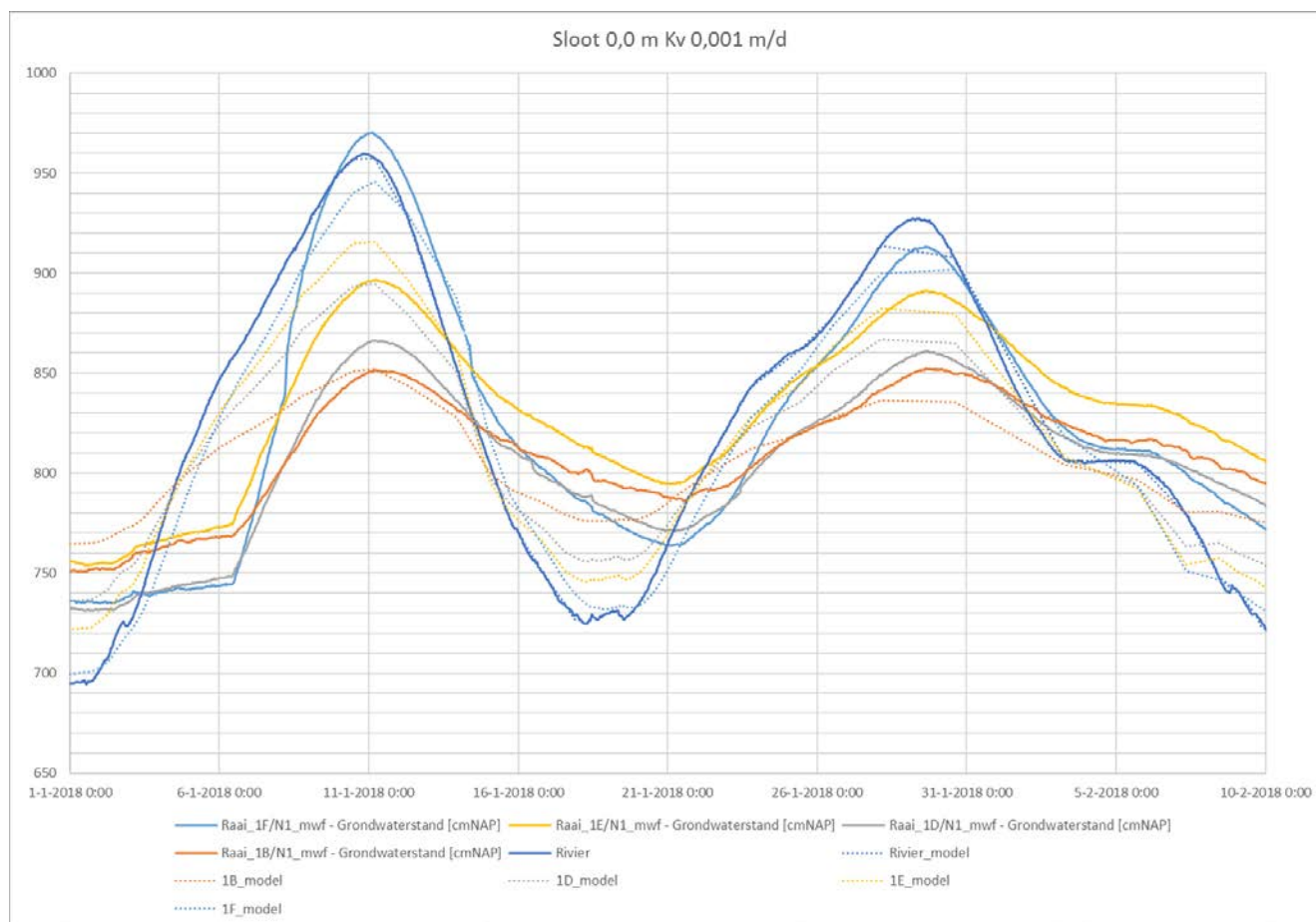
NOTITIE



Figuur 7-42 Sloot 0 m kv 0,01 m/d



NOTITIE



Figuur 7-43 Sloot 0 m kv 0,001 m/d



NOTITIE

Bijlage 8 Bepaling fictieve voorlandlengte

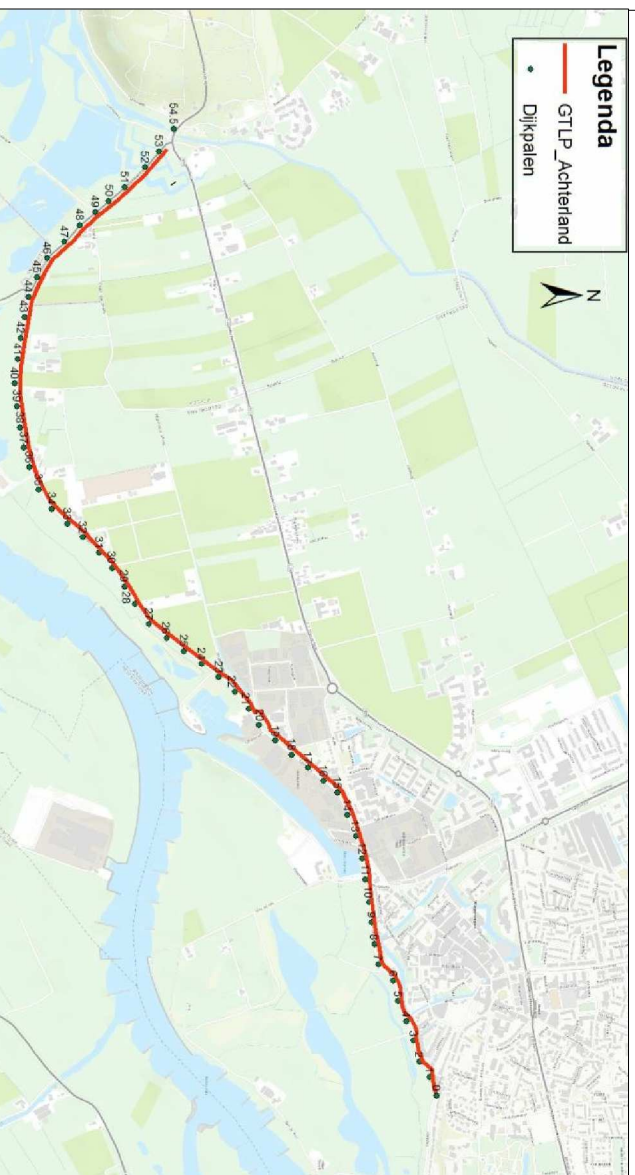
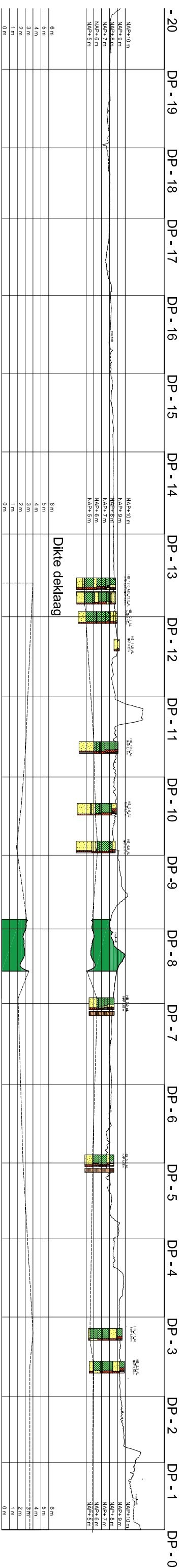
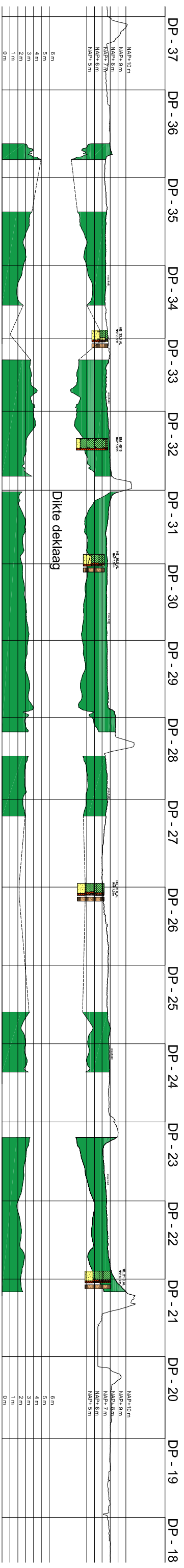
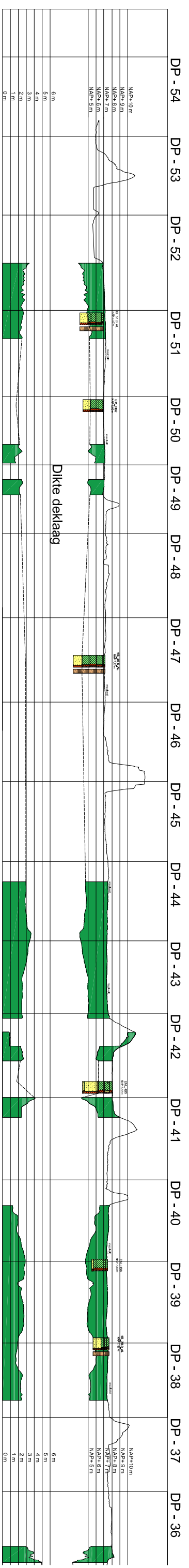
Met behulp van de berekende doorlatendheid van 0,05 m/s voor de deklaag is de fictieve voorlandlengte bepaald voor 13 locaties langs het dijktraject. Deze zijn op basis van de analytische formules beschreven in [TR 2004] uitgevoerd. Op basis van de resultaten weergegeven in tabel 7-18 kan geconcludeerd worden dat in bijna alle gevallen de ingevoerde lengte van het voorland ook de fictieve voorland lengte is.

Tabel 7-18 Fictieve voorlandlengtes

Parameters	DP 2	DP 5	DP 10	DP 12	DP 17	DP 22	DP 23	DP 25	DP 32	DP 38	DP40	DO 48	DP 52	
Buitenpeil	12,121	12,111	12,101	12,001	12	11,991	11,991	11,97	11,95	11,84	11,84	11,73	11,72	m NAP
Polderpeil	9,2	7,6	8,6	8,4	8	7	7,5	7,4	6,8	7,2	7	6,9	6,6	m NAP
d1	1	1,5	2	3	1	1	1	3	3	1,7	1,5	1,8	0,5	m
d3	1	2,5	2	2	1	2,5	2,5	2,5	1,7	1	2	2	2	m
k1	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	m/d
k3	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	m/d
D	30	30	25	25	25	25	25	25	25	50	50	50	50	m
K	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00	47,00	47,00	47,00	47,00	m/d
Lvoorland	30,000	25,000	100,000	5,000	120,000	50,000	60,000	15,000	80,000	46,000	60,000	60,000	5,000	m
Ldijk	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	m
Lachterland	100,000	25,000	150,000	500,000	150,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	500,000	m
Tussenresultaten														
c1	20,00	30,00	40,00	60,00	20,00	20,00	20,00	60,00	60,00	34,00	30,00	36,00	10,00	d
c3	20,00	50,00	40,00	40,00	20,00	50,00	50,00	50,00	34,00	20,00	40,00	40,00	40,00	d
Labda1	156,84	192,09	202,48	247,99	143,18	143,18	143,18	247,99	247,99	282,67	265,52	290,86	153,30	m
Labda3	156,84	247,99	202,48	202,48	143,18	226,38	226,38	226,38	186,68	216,79	306,59	306,59	306,59	m
w1	0,02	0,02	0,09	0,00	0,10	0,05	0,06	0,01	0,08	0,02	0,03	0,03	0,00	d
w2	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	d
w3	0,07	0,02	0,12	0,19	0,11	0,22	0,22	0,22	0,18	0,09	0,12	0,12	0,12	d
a	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	m
fictieve lengte voorland	30	25	93	5	98	48	57	15	77	46	59	59	5	m



Bijlage 3 Geotechnisch lengteprofiel



Deklaagdikte achterland

- Legenda
- Deklaag klei o.b.v. geofysisch onderzoek op ca. 5 m uit binnenteen
 - Geïnterpoleerde deklaag klei

Fugro GeoServices B.V.
 Kantoor Utrecht
 Blaauwlaan 60A
 3528 AD Utrecht
 OMSCHRIJVING

Tel: 030-6028189
 Fax: -
 www.fugro.com

LENGTENPROFIEL-DEKLAAGDIKTE-ACHTERLAND-GREBBEDIJK

Geïnterpoleerd MHO

Datum 1-9-2018

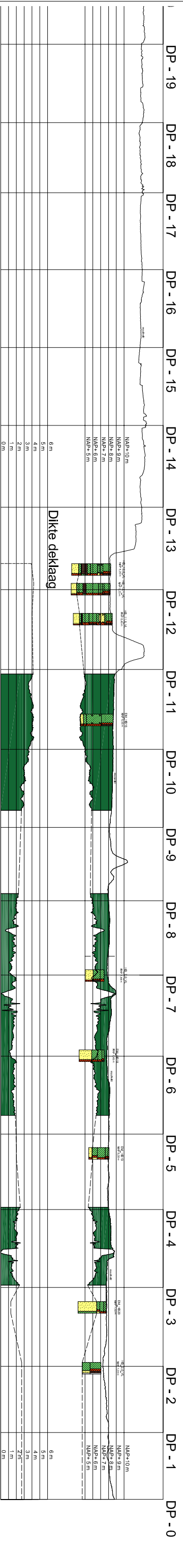
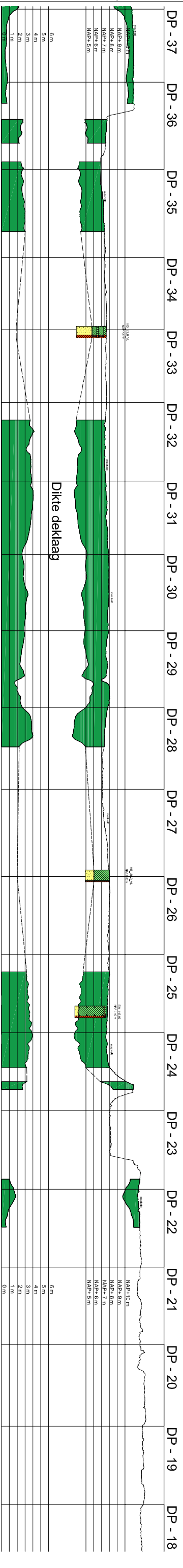
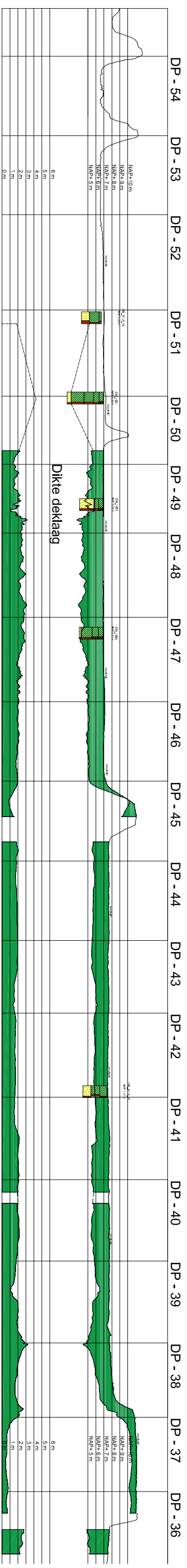
Status CONCEPT

Projectnummer 1217-0035-000

Formaat A3

Revisie -

Schaal -



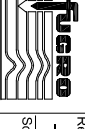
Deklaagdikte voorland

- Legenda**
- Deklaag klei o.b.v. geofysisch onderzoek op ca. 5 m uit buitenteen
 - Geïnterpoleerde deklaag klei

Fugro GeoServices B.V.

Kanoor Utrecht
Blaeuilaan 60A
3528 AD Utrecht

Tel: 030-6026189
Fax: -
www.fugro.com



Revisie

Schaal

OMSCHRIJVING
LENGTEPROFIEL-DEKLAAGDIKTE-VOORLAND-GREBBEDIJK

Formaat
A3

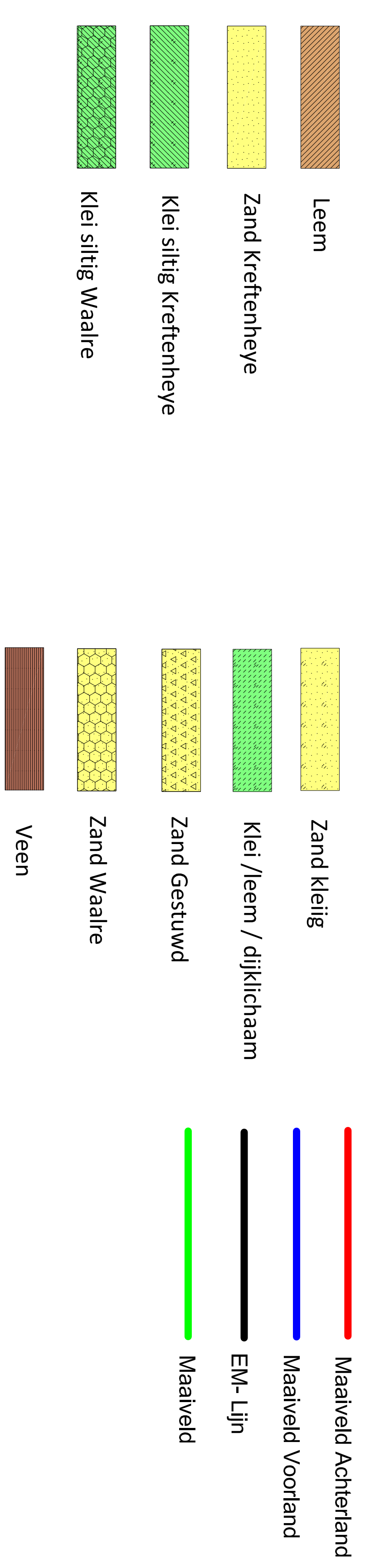
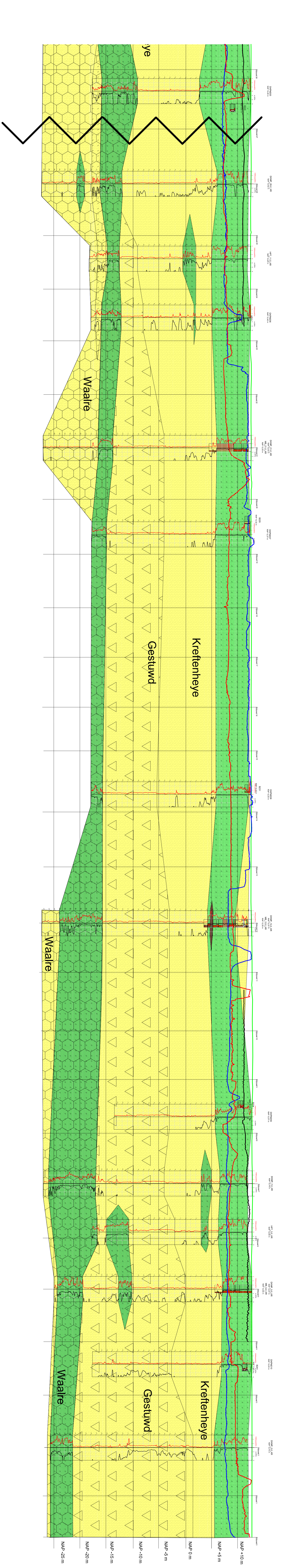
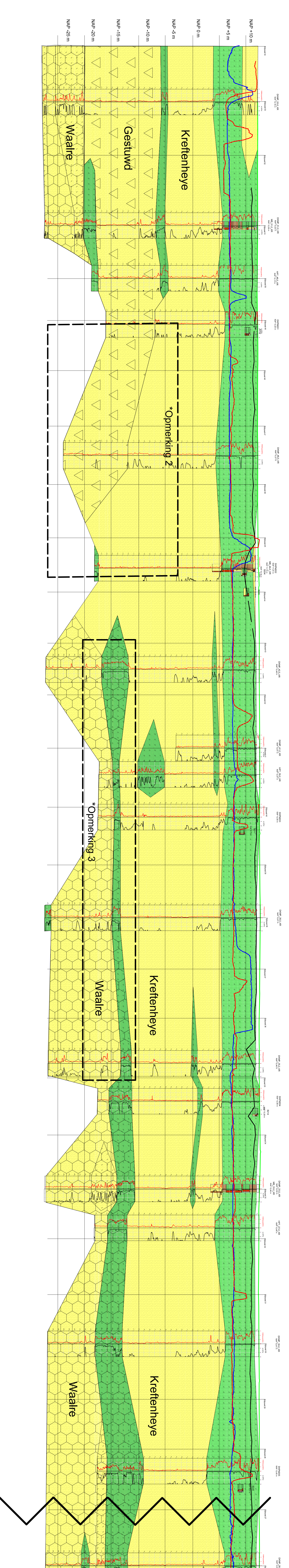
Gaiekend
MHO

Datum
1-8-2018

Status
CONCEPT

Projectnummer
1217-0035-000

Bijlage
-



Opmerkingen
 1 De deklaag en dijklichaam bestaan uit klei /leem het is niet duidelijk waar precies de scheiding ligt tussen dijklichaam en ondergrond.
 2 De overgang naar een gestuwde formatie tussen dijkspaal 46-50 is een inschatting
 3 Het doorlopen van de de kleilaag tussen dijkspaal 36-43 op een diepte van NAP+15m is een inschatting
 4 EM lijn geeft onderkant zandcunet weg aan

Datum: 9-4-2018

Opgesteld: M.Hop



Bijlage 4 Geotechnische sterkteparameters



Project : Verkenning Grebbedijk
Onderwerp : Grondparameters
Datum : 22 juni 2018
Projectnr LCSO/Fugro : 17M3041_Verkenning_Grebbedijk
Opgesteld door : ir. B. Rijnveld
Gecontroleerd door : ir. W.R. Halter
Vrijgegeven : ir. B. Rijnveld
Versie : 03

1. Doel en aanleiding

Doel van deze memo is het afleiden van de sterkteparameters van de grond voor de verkenningsfase van de dijkversterking van de Grebbedijk. Hierbij is gebruik gemaakt van [LCF 2018] en [WP 2017].

Bij de opzet van deze memo is zoveel mogelijk aangesloten op de opzet van [SHM 2016] wat betreft beschouwde grondparameters en de afleiding hiervan. Waar afgeweken wordt, wordt dit expliciet vermeld.

2. Beschikbare informatie

[LCF 2018] Geotechnisch onderzoek Verkenning Grebbedijk, LievensenseCSO-Fugro rapport 17M3041-R-004-V01, 02 maart 2018
[SHM 2016] Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 1 december 2016
[WP 2017] Geotechnisch onderzoek – Veiligheidsanalyse Grebbedijk te Wageningen, Wiertsema & Partners rapport VN-66452-1, 31 januari 2017
[TEUN 2016] Wrijving in sterkteberekeningen, H. Teunissen, vakblad geotechniek, juli 2016

3. Bodemopbouw

Voor het vaststellen van de bodemopbouw is gebruik gemaakt van [LCF 2018] en [WP 2017]. De globale bodemgesteldheid is weergegeven in Tabel 1 **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** en geeft een indruk van de bodemopbouw bij de Grebbedijk.

Tabel 1: Globale bodemopbouw Grebbedijk

Grondsoort	Locatie	Diepte [m NAP]	Dikte [m]
ZAND, antropogeen, wegcunet	KR	m.v. tot ca. NAP +9,0m	0,5-2m



NOTITIE

Grondsoort	Locatie	Diepte	Dikte
		[m NAP]	[m]
KLEI, siltig, deklaag	VL+AL	m.v. tot ca. NAP +4,0m	0,5-4m
KLEI, siltig, dijksmateriaal en deklaag ¹⁾	KR	m.v. tot ca. NAP +4,0m	5-8m
VEEN ²⁾	KR	NAP +5,5m	0,5m
ZAND, Kreftenheye/Waalre/gestuwde afzettingen	VL+AL+K R	NAP+7,0m tot maximaal verkende diepte	10- 50 m

KR = Kruin, VL = Voorland, AL = Achterland

¹⁾ De scheiding tussen het dijksmateriaal en de natuurlijke deklaag is nauwelijks uit het grondonderzoek te onderscheiden. Ook blijken de eigenschappen nauwelijks van elkaar te verschillen, zodat geen onderscheid is gemaakt tussen het dijksmateriaal en de deklaag

²⁾ Alleen aangetroffen bij dijkspaal 12

Uit de resultaten van het grondonderzoek blijkt dat er nauwelijks verschil tussen het dijksmateriaal en de natuurlijke deklaag. Dit betreft zowel de gemeten conusweerstand, het volumiek gewicht (zie hoofdstuk 5) en de sterkte-eigenschappen (zie hoofdstuk 6). Daarom is geen onderscheid tussen de eigenschappen van deze lagen gemaakt.

Uit het onderzoek blijkt wel een verschil in volumiek gewicht (zie hoofdstuk 5) en de sterkte-eigenschappen (zie hoofdstuk 6) tussen de grond ter plaatse van de kruin en in het voor- en achterland. Hier is daarom wel onderscheid tussen gemaakt.

4. Afweging gedraineerde of ongedraineerde sterkteparameters

Uit de classificaties blijkt dat het dijksmateriaal en de deklaag bestaan uit (sterk) siltige klei. Of dit materiaal tijdens afschuiven gedraineerd of ongedraineerd gedrag vertoont, is niet eenduidig vast te stellen. Merk op dat in de samendrukkingsproeven wel een relatief lage doorlatendheidswaarden gevonden, welke duiden op cohesief materiaal, wat met ongedraineerde parameters gemodelleerd kan worden. Echter, op basis van de volgende overwegingen wordt in het ontwerp uitgegaan van gedraineerde sterkteparameters:

- In de sonderingen is de genormaliseerde waterspanning voor de siltige kleilaag B_q klein ($<0,1$). Dit duidt erop dat tijdens het bezwijken van de grond nauwelijks waterover- of onderspanningen optreden en het grondgedrag dus vrijwel gedraineerd kan worden verondersteld.
- Op de proeven, die bij in-situ spanning zijn uitgevoerd, treedt bij grote rekken in vrijwel alle gevallen een wateronderspanning op. Dit betekent dat de ongedraineerde sterkte hoger is dan de gedraineerde sterkte. In par. 7.5 van [SHM 2016] wordt geadviseerd om voor siltige klei met sterk dilatant gedrag tijdens het afschuiven de sterkte niet hoger te nemen dan de gedraineerde schuifsterkte op basis van de hoek van inwendige wrijving.



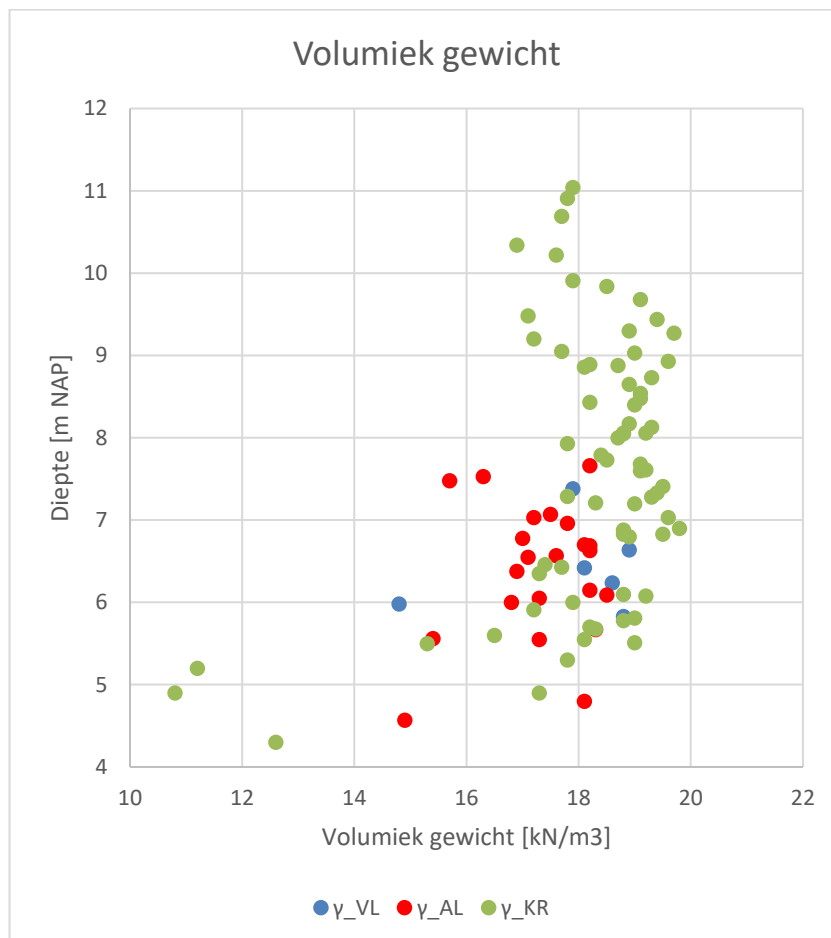
NOTITIE

- In de meeste proeven is het lastig om de 'critical state' te bepalen. In veel gevallen wordt bij grote rekken geen constante waarde voor de deviatorspanning en water(over)spanning bereikt. Dit leidt tot een grote spreiding in de ongedraineerde schuifsterkteparameters. De spreiding in gedraineerde sterkteparameters is aanzienlijk lager.

In bijlage A zijn ter informatie op basis van het uitgevoerde grondonderzoek de ongedraineerde parameters afgeleid. Deze worden, met uitzondering voor de incidenteel aangetroffen veenlaag, echter niet toegepast in het ontwerp.

5. Volumiek gewicht

Op de ongeroerde monsters zijn een groot aantal volumiek gewicht (γ) bepalingen uitgevoerd [LCF 2018]. De resultaten voor de kleilagen zijn weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Resultaten volumiek gewicht bepalingen klei



NOTITIE

Op basis van de in het laboratorium bepaalde volumiek gewichten is het gemiddelde volumiek gewicht bepaald. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 2. Hierbij is ter plaatse van de kruin onderscheid gemaakt in de laag boven en onder ca. NAP +7,5m. Dit is ongeveer de ligging van de freatische grondwaterstand in de dijk (ca. NAP +7m) en het naast gelegen maaiveld.

Tabel 2: Bepaling gemiddeld volumiek gewicht klei [kN/m³]

Locatie	#	m_v	$m_{v;sat}$	$m_{v;dr}$
VL	6	17,9	18,2	13,0
AL	22	17,3	17,8	12,8
VL+AL	28	17,4	17,9	12,9
KR <NAP +7,5m ¹⁾	29	18,4	18,7	14,2
KR >NAP +7,5m ¹⁾	37	18,6	19,0	14,7
KR totaal ¹⁾	66	18,5	18,8	14,5

¹⁾ De drie veenmonsters ter plaatse van MB12.OKR zijn niet meegenomen

KR = Kruin, VL = Voorland, AL = Achterland

m = steekproef gemiddelde

Uit Tabel 2 blijkt, dat er nauwelijks verschil is tussen het volumiek gewicht van de kleilagen in de kruin. Derhalve wordt hier geen onderscheid in gemaakt.

Voor het ontwerp met betrekking tot het mechanisme opbarsten is een laagkarakteristieke waarde van het verzadigde volumiek gewicht benodigd. Bij het bepalen van deze laagkarakteristieke waarde wordt uitgegaan van uitmiddeling van de spreiding in verticale richting. De spreiding in horizontale richting wordt niet uitgemiddeld. Bij de statistische analyse is daarom uitgegaan van een lognormale verdeling en een regionale proevenverzameling, ofwel een variantie reductiefactor van $\Gamma = 0,5$.

Tabel 3: Bepaling karakteristieke waarde volumiek gewicht deklaag

Locatie	#	$m_{v;sat}$	$s_{v;sat}$	$VC_{v;sat}$	$\gamma_{sat;kar}$
VL+AL	28	17,9	1,1	0,06	16,9

VL = Voorland, AL = Achterland

m = steekproef gemiddelde

s = standaarddeviatie van de steekproef

VC = variatiecoëfficiënt van de steekproef

6. Critical state hoek van inwendige wrijving

In totaal zijn voor dit project 45 CAU (anisotroop geconsolideerde ongedraineerde) triaxiaalproeven tot ca. 25% axiale rek uitgevoerd. Dit betreft zowel proeven die bij



NOTITIE

(ongeveer) de in situ effectieve spanning zijn uitgevoerd, als proeven die bij ca. 3 maal de in situ effectieve spanning zijn uitgevoerd. De proeven die bij ca. 3 maal de in situ effectieve spanning zijn uitgevoerd, kunnen, op basis van de uitgevoerde samendrukkingsproeven [WP 2017], als 'normaal' geconsolideerd worden gezien. Bij de statistische analyse is uitgegaan van een lognormale verdeling en een regionale proevenverzameling, ofwel een variantie reductiefactor van $\Gamma = 0,5$.

Voor het bepalen van de critical state hoek van inwendige wrijving ϕ_{cs} kan gebruik worden gemaakt van al deze proeven, omdat overconsolidatie theoretisch geen effect op deze parameter heeft [SHM 2016].

In Tabel 4 is de statistische analyse weergegeven. Hierbij is ϕ_{cs} conform [SHM 2016] bepaald bij de eindrek in de proef (ca. 25% axiale rek).

Tabel 4: Bepaling ϕ_{cs} bij 25% axiale rek

Locatie	#	$m_{\phi;cs}$	$s_{\phi;cs}$	$VC_{\phi;cs}$	ϕ_{kar}
VL+AL	15	34,9	3,2	0,09	31,8
KR	30	31,8	4,1	0,13	28,0
Alle	45	32,8	4,1	0,13	29,3

KR = Kruin, VL = Voorland, AL = Achterland

m = steekproef gemiddelde

s = standaarddeviatie van de steekproef

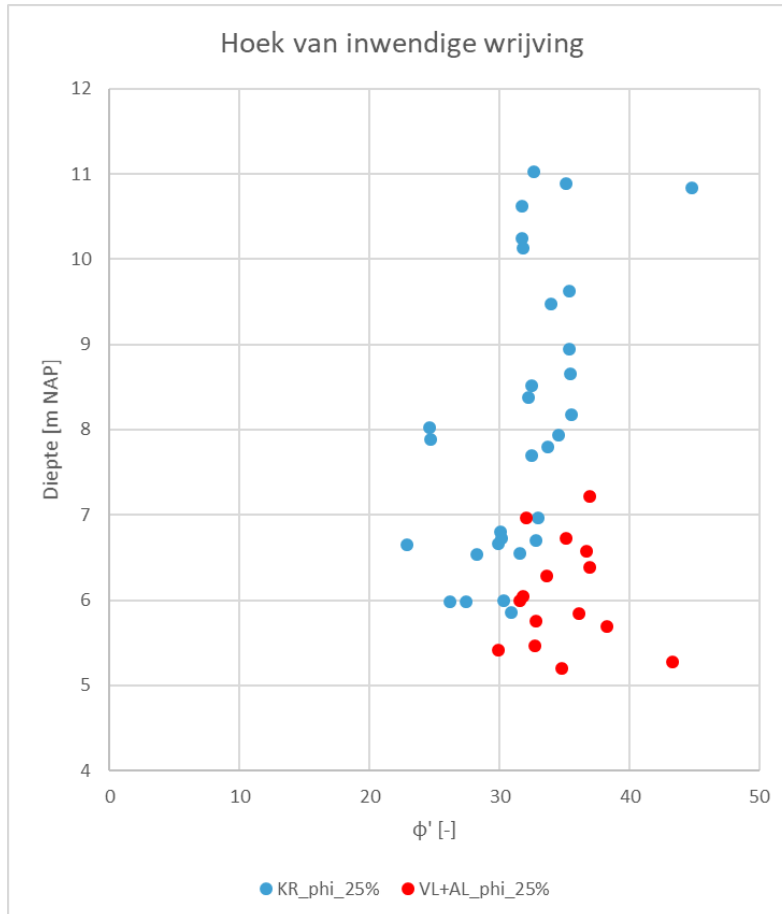
VC = variatiecoëfficiënt van de steekproef

Het bepalen van de ongedraineerde critical state sterkte uit de laboratoriumproeven is niet eenduidig. In theorie zou in de critical state zowel de sterkte (of toegepaste deviatorspanning q) als de waterspanning constant moeten zijn. Dit treedt echter in vrijwel geen enkele proef op. De hoek van inwendige wrijving blijkt echter slechts beperkt afhankelijk te zijn van het gekozen rekpercentage. Derhalve wordt uitgegaan van de sterkte bij 25% axiale rek.

In Figuur 2 zijn de resultaten van de gevonden ϕ_{cs} per proef uitgezet tegen de diepte.



NOTITIE



Figuur 2: ϕ_{cs} uitgezet tegen de diepte

Opvallend is dat er op basis van beide analysemethoden een verschil tussen de ϕ_{cs} van de klei ter plaatse van de kruin en naast de dijk wordt gevonden, maar dat er op basis van Figuur 2 geen duidelijke afhankelijkheid van de diepte wordt geconstateerd.

Op basis van bovenstaande analyse wordt een karakteristieke waarde voor de $\phi_{cs} = 28,0$ graden ter plaatse van de kruin en $\phi_{cs} = 31,8$ graden voor de deklaag in het voor- en achterland gevonden.

Op basis van [TEUN 2016] zou in de critical state een dilatantiehoek van $\psi=0^\circ$ in combinatie met een correctiefactor van $9/8^{ste}$ op de hoek van inwendige wrijving om de resultaten van triaxiaalcompressie (in de proeven) naar plane strain condities (in het veld) moeten worden gehanteerd. In overleg met Deltares is gekozen om wel uit te gaan van een dilatantiehoek van $\psi=0^\circ$, maar de correctiefactor van $9/8^{ste}$ niet toe te passen. Dit is,



NOTITIE

omdat de correctiefactor $9/8^{\text{ste}}$ in de kalibratiestudies voor het afleiden van de partiële factoren ook niet is toegepast. Op dit moment is er nog wel discussie of het hanteren van een dilatantiehoek $\psi=0^\circ$ in analytische glijvlakmodellen hetzelfde effect heeft (ca. 10-15% lagere sterkte) als in EEM berekeningen. In de kalibratiestudies is ook niet gerekend met een dilatantiehoek $\psi=0^\circ$. Door Deltares is aangegeven, dat in de toekomst vermoedelijk voor de gedetailleerde toets een analytisch model wordt voorgeschreven en de resultaten hiervan in een toets op maat geoptimaliseerd kunnen worden met een EEM berekening.

In bovenstaande aanpak is gekozen voor het bepalen van de karakteristieke waarden door statistische analyse van de afzonderlijke proefresultaten. Hierbij wordt cohesie 'automatisch' op 0 (nul) gesteld. Een alternatief is om lineaire regressie toe te passen. Op die wijze kan mogelijk wel enige cohesie worden bepaald en meegenomen. Dit zal echter leiden tot een wat lagere hoek van inwendige wrijving. Vooral nog wordt aangesloten bij [SHM 2016] en wordt geen cohesie in rekening gebracht. Als uit de resultaten van de ontwerpberekeningen blijkt dat deze aanname tot onrealistische resultaten leidt kan voor zeef 2 opnieuw overwogen worden om toch (onderbouwd) enige cohesie in rekening te brengen.

7. Samenvatting

In Tabel 5 is een samenvatting van de hierboven afgeleide grondparameters gegeven. Incidenteel is een veenlaag aangetroffen. Op deze laag zijn geen sterkteproeven uitgevoerd. Daarom zijn de sterkteparameters voor deze laag bepaald op basis van de ondergrenswaarden uit [SHM 2016].

Tabel 5: Samenvatting grondparameters

Grondsoort	Locatie	$\gamma/\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m ³]	$\gamma_{\text{sat};\text{kar}}^{5)}$ [-]	S_{kar} [-]	m_{kar} [kPa]	POP_{kar} [kPa]	$\varphi'_{\text{cs};\text{kar}}$ [°]	ψ [°]
ZAND, antropogeen, wegcunet	KR	18/20	-	-	-	-	31,3 ³⁾	0
KLEI, ophoogmateriaal	-	17,0/17,0	16,5	-	-	-	27,0 ⁴⁾	0
KLEI, siltig, deklaag	VL+AL	17,4/17,9	16,9	-	-	-	31,8	0
KLEI, siltig, dijksmateriaal en deklaag ¹⁾	KR	18,5/18,8	-	-	-	-	28,0	0
VEEN ²⁾	VL+AL+KR	11/11	-	0,28 ⁵⁾	0,8 ⁵⁾	1 ⁵⁾	-	-
ZAND, Kreftenheye/Waalre/gestuwde afzettingen	VL+AL+KR	18/20	-	-	-	-	31,3 ³⁾	0

KR = Kruin, VL = Voorland, AL = Achterland



NOTITIE

¹⁾ De scheiding tussen het dijksmateriaal en de natuurlijke deklaag is nauwelijks uit het grondonderzoek te onderscheiden. Ook blijken de eigenschappen nauwelijks van elkaar te verschillen, zodat geen onderscheid is gemaakt tussen het dijksmateriaal en de deklaag

²⁾ Alleen aangetroffen bij dijkpaal 12

³⁾ Gebaseerd op een verwachtingswaarde van 34°, een variatiecoëfficiënt van 0,05 en een lognormale verdeling conform [SHM 2016]

⁴⁾ Gebaseerd op een verwachtingswaarde van 32°, een variatiecoëfficiënt van 0,1 en een lognormale verdeling conform [SHM 2016]

⁴⁾ Gebaseerd op de generieke waarde uit [SHM 2016]

⁵⁾ Alleen bepaald voor de lagen die relevant zijn voor opbarsten

8. Aanbevelingen

In de afleiding van de gedraineerde sterkteparameters zijn een aantal conservatieve keuzes gemaakt. Met name het effect van het hanteren van een dilatantiehoek van $\psi=0^\circ$ in analytische glijvlakmodellen (zoals DGeoStability) is mogelijk erg conservatief. Dit leidt namelijk tot een ca. 10-15% lagere sterkte dan de aanname $\psi=\phi$.

Geadviseerd wordt om voor één doorsnede te verifiëren welke keuze van de dilatantiehoek in de analytische modellen verstandig is, door een verificatieberekening met een EEM model uit te voeren voor de volgende belastingsituaties:

- Macrostabieliteit buitenwaarts (val na HW)
- Macrostabieliteit binnenwaarts onder dagelijkse condities (geen opbarsten)
- Macrostabieliteit binnenwaarts onder maatgevende condities (uitgangspunt: net geen opbarsten, om numerieke problemen in Plaxis te voorkomen)



NOTITIE

Bijlage A: Afleiding ongedraineerde parameters

Ongedraineerde schuifspanningsratio

Voor het bepalen van de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifspanningsratio S wordt gebruik gemaakt van de normaal geconsolideerde monsters. Bij de statistische analyse is uitgegaan van een lognormale verdeling en een regionale proevenverzameling, ofwel een variantiereductiefactor van $\Gamma = 0,5$.

In Tabel 6 is de statistische analyse weergegeven. Hierbij is S conform [SHM 2016] bepaald bij de eindrek in de proef (ca. 25% axiale rek).

Tabel 6: Bepaling S bij 25% axiale rek

Locatie	#	m_s	s_s	VC_s	S_{kar}
VL+AL	12	0,59	0,20	0,33	0,41
KR	12	0,47	0,15	0,32	0,33
Alle	24	0,53	0,18	0,34	0,38

Uit Tabel 6 blijkt dat een zeer grote spreiding in de resultaten wordt gevonden, veel groter dan op basis van [SHM 2016] verwacht zou worden. Dit wordt wellicht veroorzaakt doordat het materiaalgedrag niet goed met ongedraineerde sterkteparameters beschreven kan worden.

Sterktetoename-exponent m

In [RHDHV 2018] is de sterkte-toename-exponent m bepaald op basis van de generieke waarden uit [SHM 2016] en onderbouwd met een 5-tal samendrukkingsproeven. Op basis hiervan zijn een gemiddelde en karakteristieke waarde voor m van respectievelijk 0,84 en 0,80 afgeleid. Deze waarden worden ook voor de verkenningsfase gehanteerd.

Conusfactor N_{kt}

Voor het afleiden van de conusfactor is de q_{net} bepaald uit de sonderingen en uitgezet tegen de in het laboratorium bepaalde s_u . Hierbij zijn een aantal varianten beschouwd, waarvan de resultaten zijn samengevat in Tabel 7.

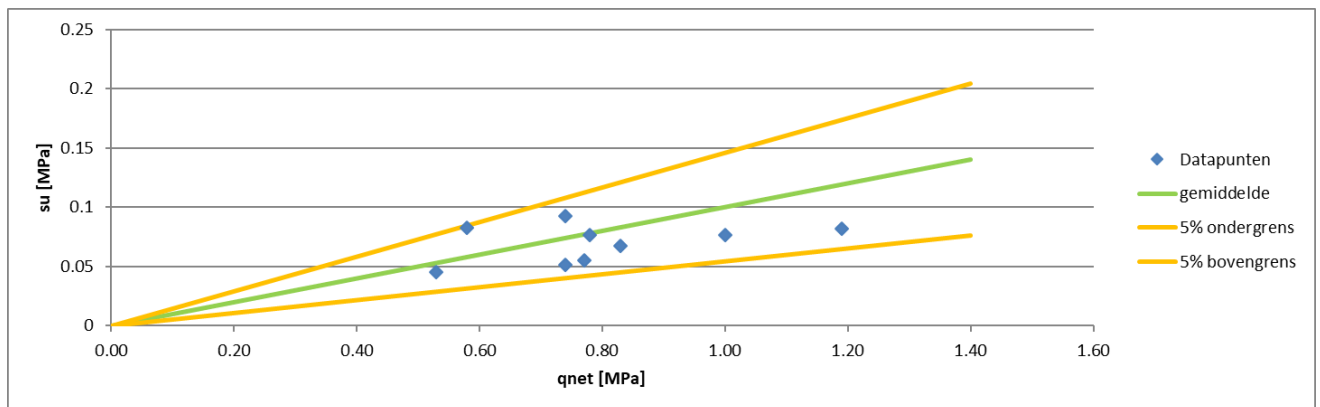
Tabel 7: Samenvatting bepaling N_{kt}

Beschouwde proeven	Methode	#	N_{kt}	$VC_{N_{kt}}$
		[-]	[-]	[-]
Alle	s_u bij 25% rek	18	12	0,38
Alleen onder gws	s_u bij 25% rek	9	10	0,28



NOTITIE

De resultaten voor de proeven onder de grondwaterstand bij 25% zijn grafisch weergegeven in Figuur 3.



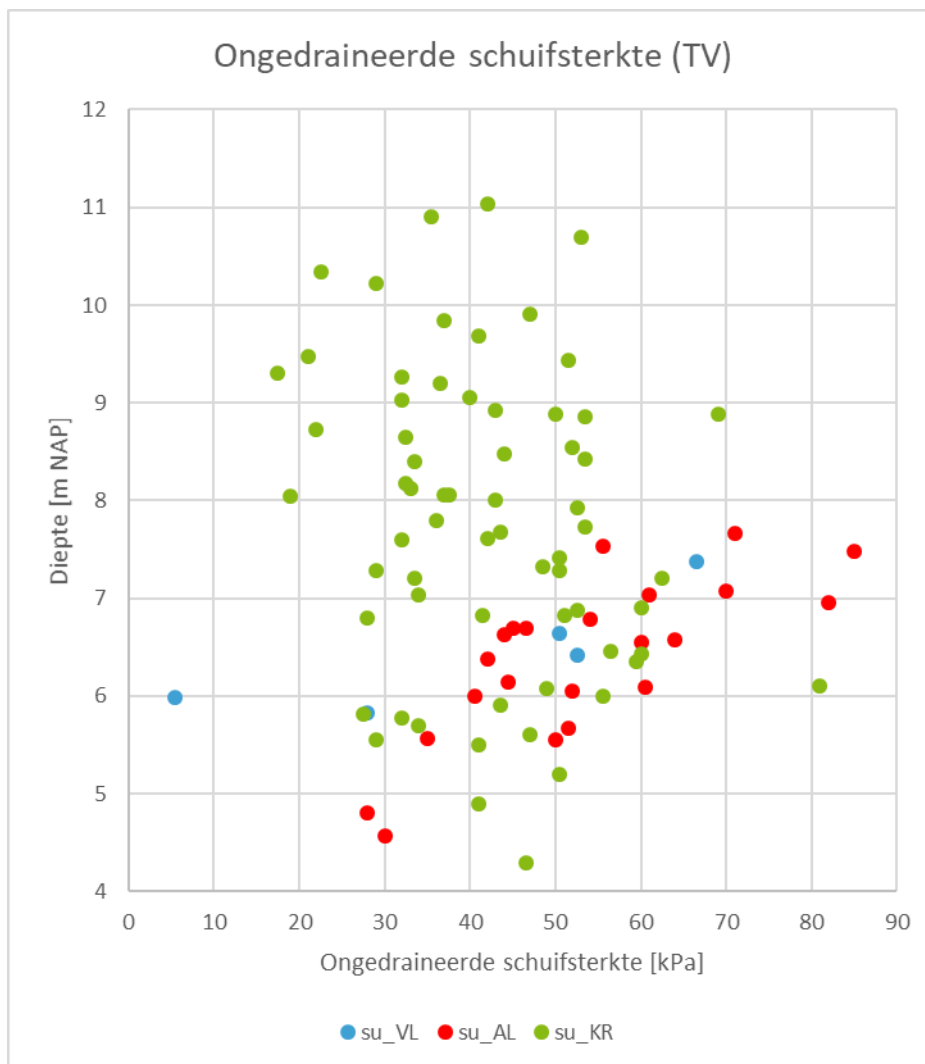
Figuur 3: Relatie q_{net} en s_u (alleen onder gws, bij 25% rek)

De gevonden waarde van $N_{kt} = 10$ met een variatiecoëfficiënt van 0,28 wijkt af van wat verwacht zou worden op basis van [SHM 2016]. De N_{kt} is erg laag en de variatiecoëfficiënt erg hoog. Op basis van Figuur 3 kan gesteld worden dat de ongedraineerde schuifsterkte in dit geval niet sterk afhankelijk is van de netto conusweerstand.

Ter informatie zijn in Figuur 4 en Figuur 5 de resultaten van respectievelijk de handtorvane testen en de triaxiaalproeven uitgezet tegen de diepte.



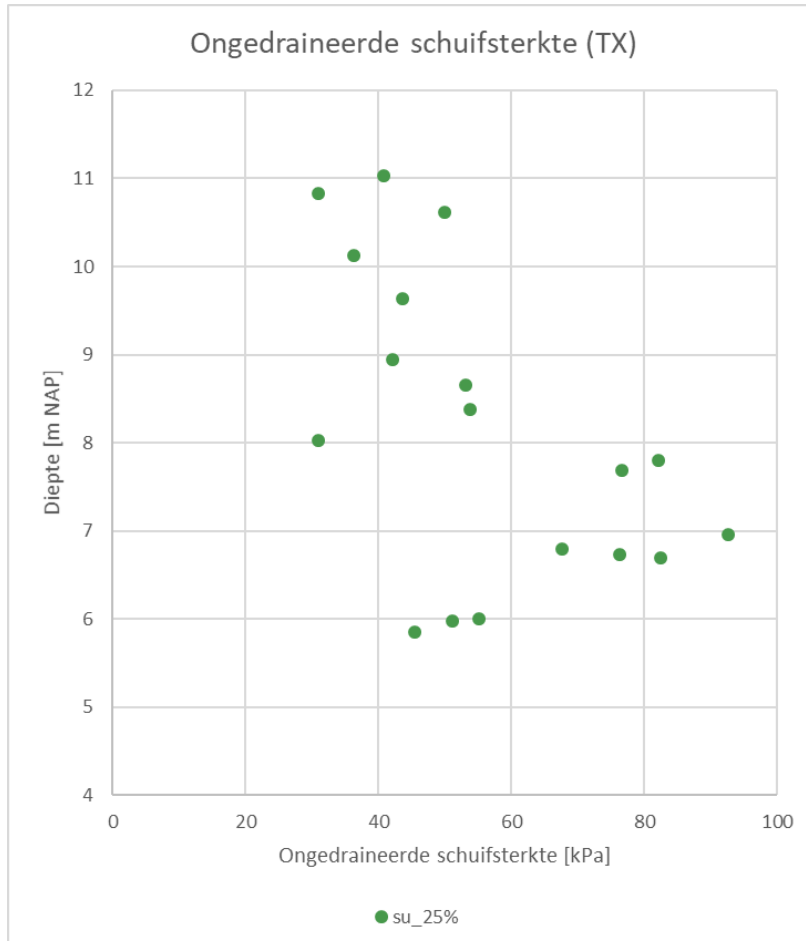
NOTITIE



Figuur 4: s_u uit de handtorvane testen uitgezet tegen de diepte



NOTITIE



Figuur 5: s_u uit de triaxiaalproeven bij in situ spanning uitgezet tegen de diepte

Uit Figuur 4 blijkt dat ter plaatse van de kruin de ongedraineerde schuifsterkte uit de handtorvane testen iets lijkt toe te nemen met de diepte. Voor het voor- en achterland lijkt het omgekeerde het geval te zijn. Uit Figuur 5 kan worden opgemaakt dat er wel een toename van de ongedraineerde schuifsterkte met de diepte wordt gevonden, maar dat de spreiding erg groot is.

Overconsolidatieratio/preoverburden pressure/grensspanning (OCR/POP/ σ'_{vy})

In [RHDHV 2018] is voor de POP van de deklaag uitgegaan van een karakteristieke waarde van 10kPa, welke globaal is onderbouwd met een 5-tal samendrukkingsproeven. In het aanvullend uitgevoerde grondonderzoek voor de verkenning is geen verder onderzoek naar deze parameter uitgevoerd en wordt derhalve van dezelfde waarde uitgegaan.



NOTITIE

Voor de POP van het materiaal in de kruin van de dijk is in [RHDHV 2018] de POP bepaald met behulp van de standaardwaarde van $N_{kt} = 20$ uit de sonderingen. Als de sterkte bij 25% rek wordt bepaald, volgt hieruit een projectspecifieke $N_{kt} = 10$. Op basis van een gemiddelde waarde voor de S van 0,47 en voor m van 0,84 is hieruit de OCR en POP bepaald voor het gedeelte van de sondering onder de dagelijkse grondwaterstand. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 8. Hierbij is eveneens per sondering de karakteristieke waarde van de OCR en POP bepaald op basis van een variatiecoëfficiënt voor de OCR gelijk aan de variatiecoëfficiënt voor de N_{kt} . Er is uitgegaan van een lognormale verdeling met een 'shift' van 1,0 om fysisch onmogelijke waarden te voorkomen.

Tabel 8: Bepaling OCR en POP uit sonderingen ($N_{kt} = 10$)

Sondering	DP	GWS [m NAP]	O.k. deklaag [m NAP]	m_{qnet} [-]	m_{OCR} [-]	m_{POP} [kPa]	OCR_{kar} [-]	POP_{kar} [kPa]
DKMP5.OKR	5	+7,69	+7,5	0,74	1,9	84	1,31	28
DKMP12.OKR	12	+7,85	+5,5 ¹⁾	0,55	1,27 ²⁾	33 ²⁾	1,03	3
DKMP21.OKR	21	+7,23	+6,0	0,85	1,96	100	1,34	31
DKMP33.OKR	33	+7,26	+5,8	0,70	1,58	60	1,15	14
DKMPM202	44	+6,65	+5,7	0,76	1,96	96	1,34	31
DKMP51.OKR	51	+6,98	+6,0	0,81	1,81	82	1,26	24

1) De veenlaag is niet meegenomen

2) Lokaal komen ook fysisch niet mogelijke waarden kleiner dan 1,0 (OCR) of 0 (POP) voor

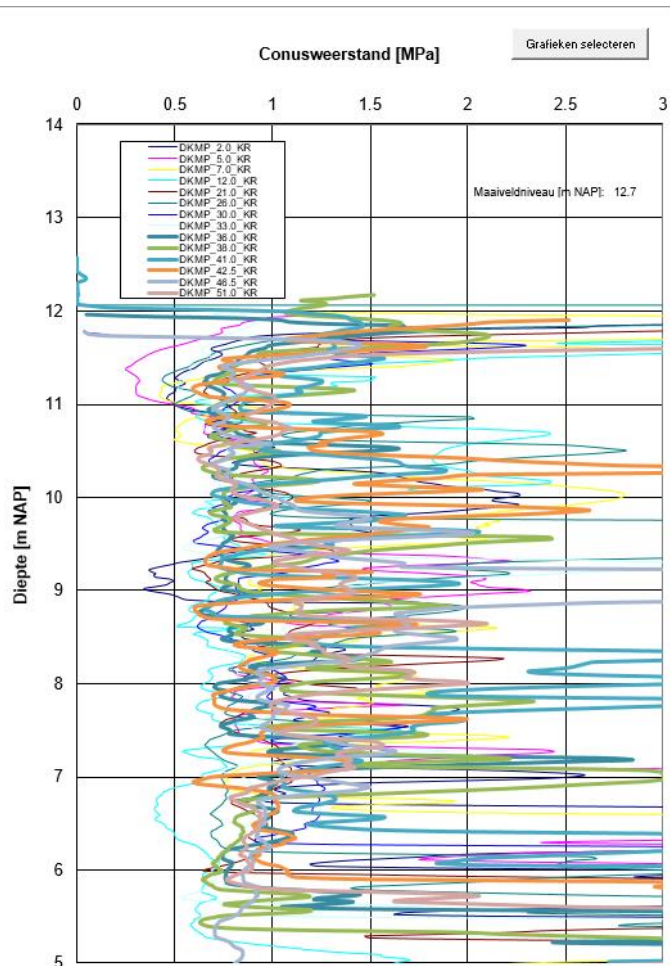
3) Berekend uit de karakteristieke waarde van de OCR en een verticaal effectief spanningsniveau van 90kPa

Uit Tabel 8 blijkt dat incidenteel OCR-waarden kleiner dan 1,0 worden berekend, ook al is het gemiddelde per sondering wel hoger dan 1,0. De karakteristieke waarde voor de POP varieert tussen de 3 en 31kPa.

In Figuur 6 zijn de sondeerresultaten van de kruinsonderingen weergegeven. Te zien is dat er nauwelijks afhankelijkheid van de diepte is.



NOTITIE



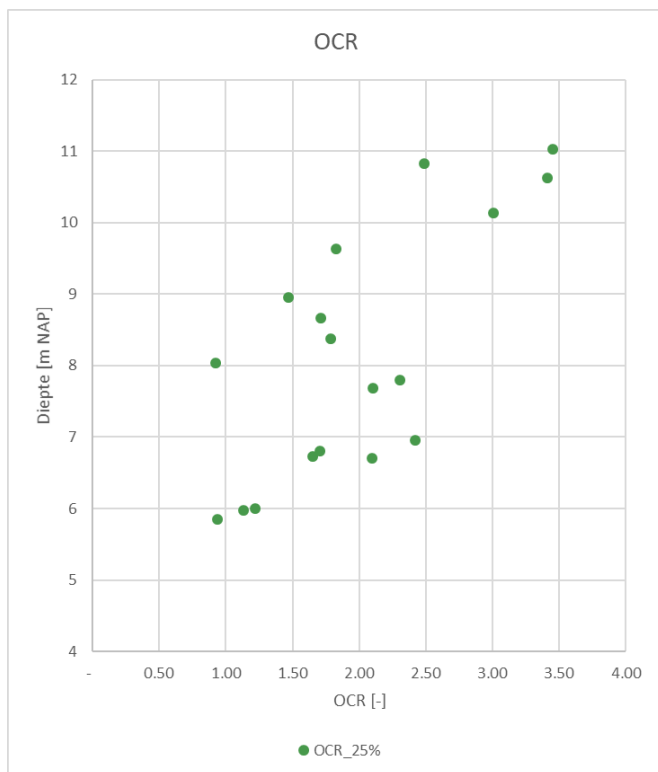
Figuur 6: Sondeerresultaten [LCF 2018]

Omdat de relatie tussen conusweerstand en ongedraineerde schuifsterkte in dit geval niet duidelijk lijkt te zijn, is er een alternatieve wijze gevolgd om de OCR/POP te bepalen.

Hierbij is per proef bij in situ spanning de OCR bepaald op basis van de s_u bij 25% rek en de gemiddelde S en m. Hierbij is S bepaald op de normaal geconsolideerde monsters bij 25% axiale rek. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 7.



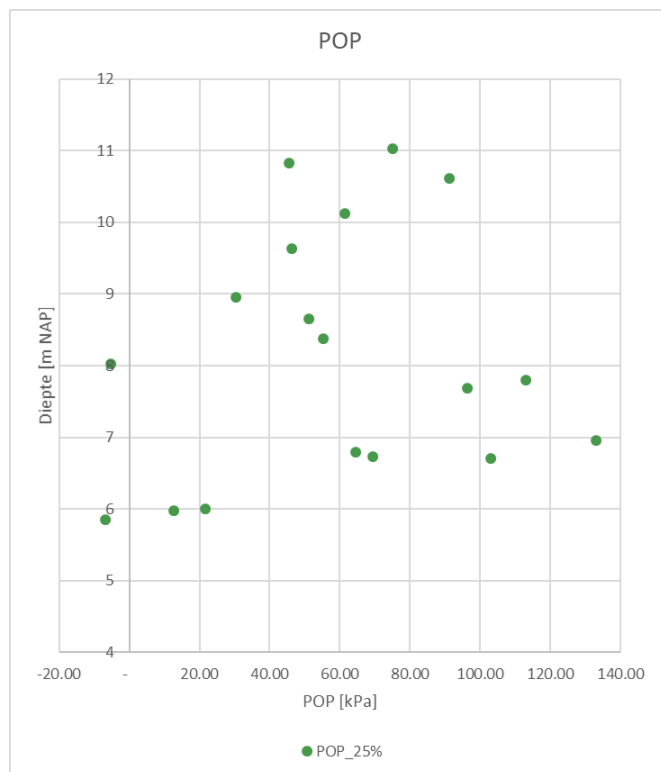
NOTITIE



Figuur 7: OCR per proefresultaat



NOTITIE



Figuur 8: POP per proefresultaat

Uit Figuur 7 en Figuur 8 blijkt er twee fysisch onmogelijke waarden voor de OCR en POP zijn bepaald. Duidelijk te zien is dat in dit geval de POP redelijk constant met de diepte lijkt te zijn en dat de OCR met de diepte lijkt af te nemen.

Op basis van deze individuele proefresultaten zijn de OCR en POP bepaald op basis van statistische analyse. Hierbij is uitgegaan van een lognormale verdeling en een variantie-reductiefactor van $\Gamma = 0,5$. Voor de OCR is een lognormale verdeling met een shift van 1,0 toegepast om fysisch onmogelijke waarden te voorkomen.

Tabel 9: Statistische analyse OCR en POP

Locatie	Methode	#	m_{OCR}	VC_{OCR}	OCR_{kar}	m_{POP}	VC_{POP}	POP_{kar}
		[-]	[-]	[-]	[-]	[kPa]	[-]	[-]
VL+AL	s_u bij 25% rek	3	1,94	0,53	- ¹⁾	32	1,19	- ¹⁾
KR	s_u bij 25% rek ²⁾	18	1,98	0,39	1,44	58,7	0,67	29,5
KR onder gws	s_u bij 25% rek ³⁾	9	1,73	0,31	1,30	67,7	0,72	28,7

¹⁾ Niet bepaald i.v.m. kleine aantal proefnemingen.



NOTITIE

²⁾ Er zijn bij 2 proeven fysisch onmogelijke waarden berekend ($OCR < 1,0 / POP < 0 \text{ kPa}$)

³⁾ Er is 1 waarde kleiner dan 1,0 berekend. Dit is fysisch niet mogelijk.

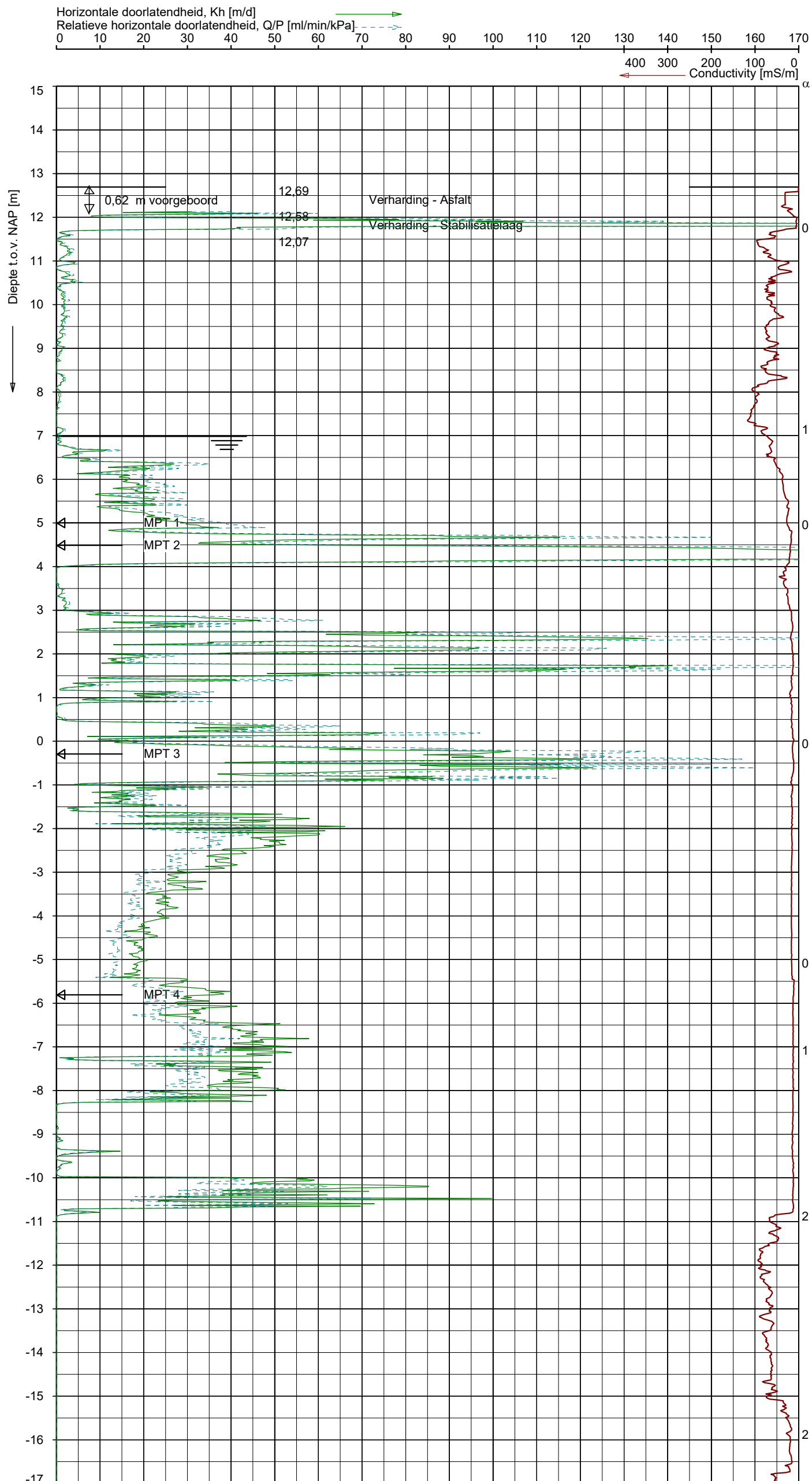
Uit Figuur 7, Figuur 8 en Tabel 9 blijkt dat door de ongedraineerde schuifsterkte bij 25% rek te bepalen een relatief hoge OCR/POP wordt bepaald, maar de spreiding ook erg groot is.

De methode om de OCR/POP uit de triaxiaalproeven bij in situ spanning te bepalen heeft als voordeel dat sterkteproeven in het laboratorium worden gebruikt voor het bepalen van de sterkteparameters. Dit in plaats van het gebruik van samendrukkingsproeven, of de in dit geval relatief onbetrouwbare relatie tussen conusweerstand en ongedraineerde schuifsterkte.

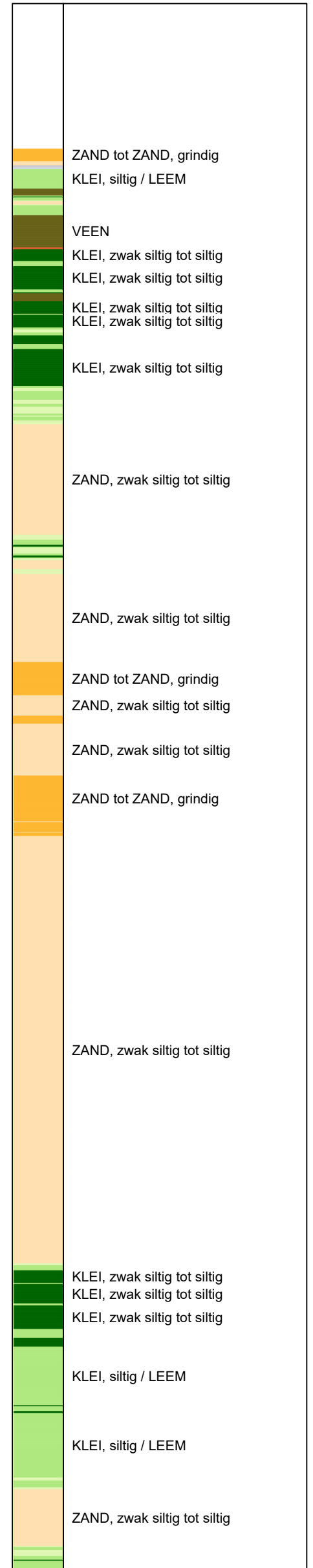
Uitgaande van een bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte bij het bereiken van de critical state wordt een karakteristieke waarde van de POP van ca. 30 kPa berekend ter plaatse van de kruin. Deze waarde is relatief hoog. Verwacht wordt dat het toepassen van gedraineerde parameters tot conservatieve resultaten zal leiden. Ter plaatse van het voorland en achterland zijn onvoldoende proeven beschikbaar om conclusies te kunnen trekken op basis van deze methode.



Bijlage 5 Doorlatendheidsprofielen



Indicatieve bodembeschrijving
 Automatisch gegenereerd uit data van de sondering, geldig onder grondwaterpeil (Robertson 1990, NL corr.)



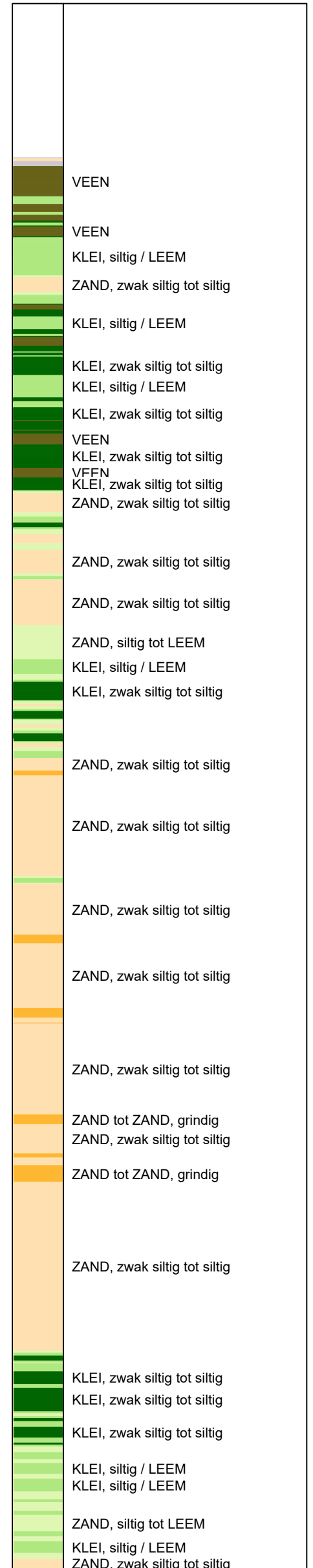
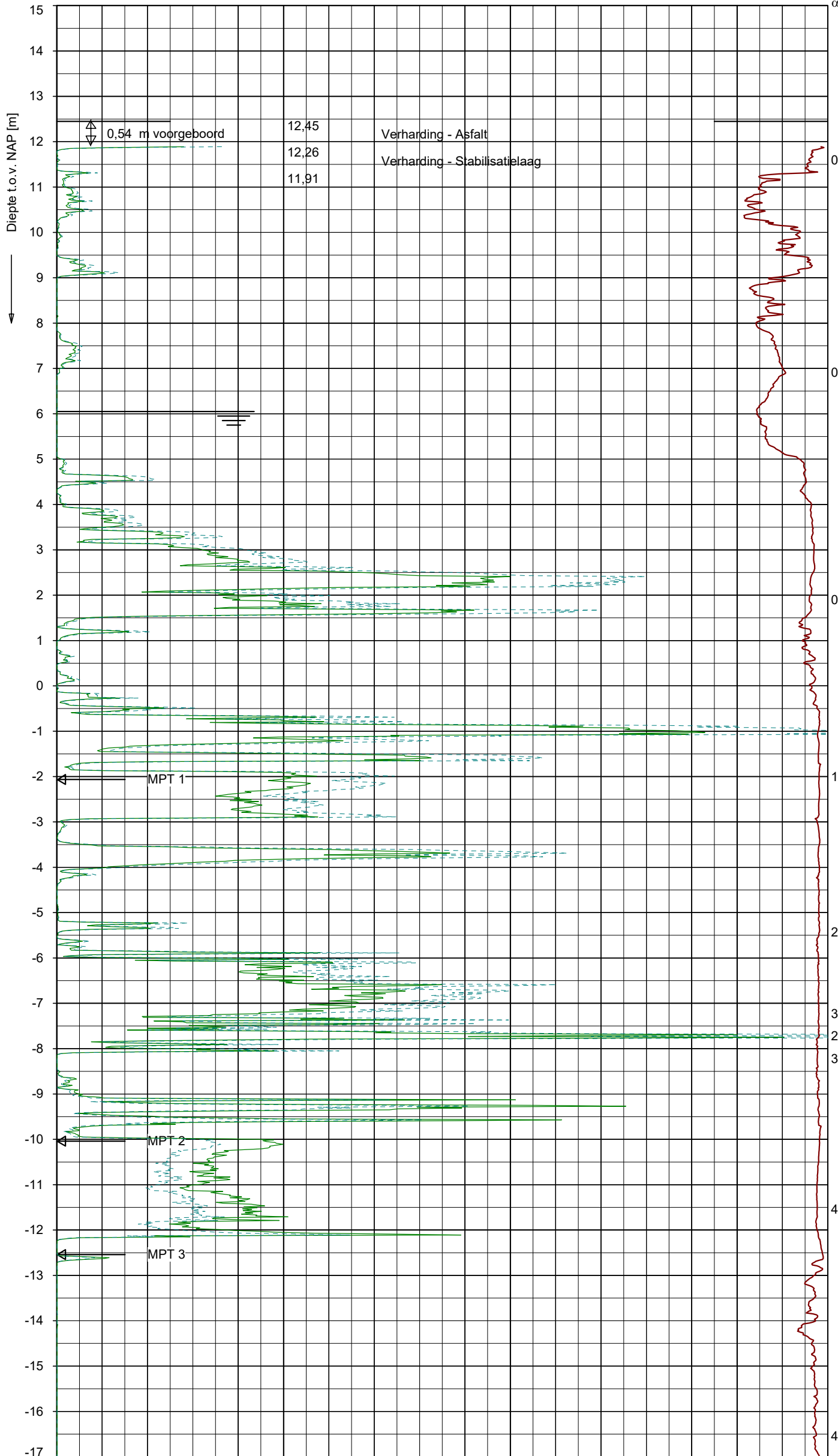
Opg. : AT/ d.d. 15-nov-2017 Coord.: X= 174128.7 m Y= 441698.8 m Systeem: RD
 Get. : R.VANTILBORG d.d. 01-aug-2018 Conus: CP15-CF75PA1SN2 1701-2567

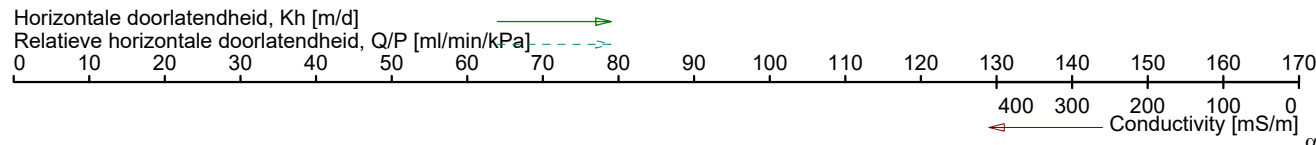
HPT SONDERING
 VERKENNING GREBBEDIJK

Opdr. 1217-0035-231
 Sond. HPT_3.0_KR

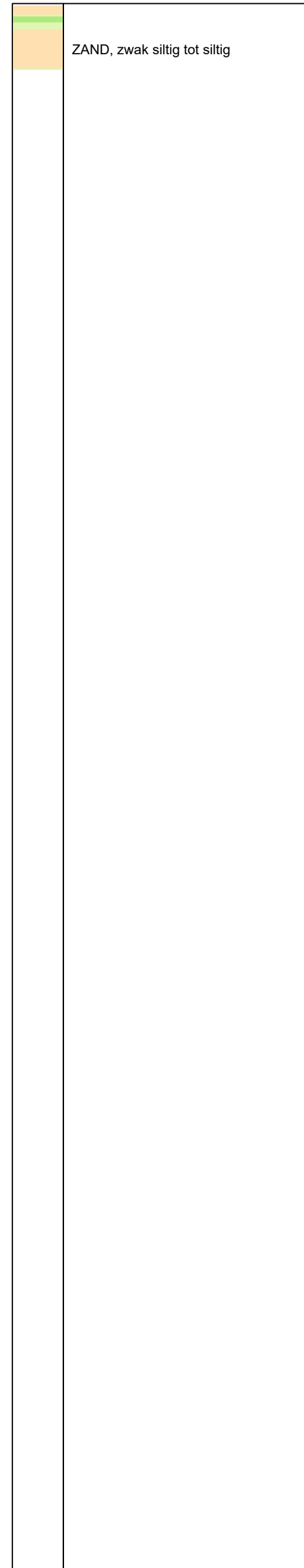
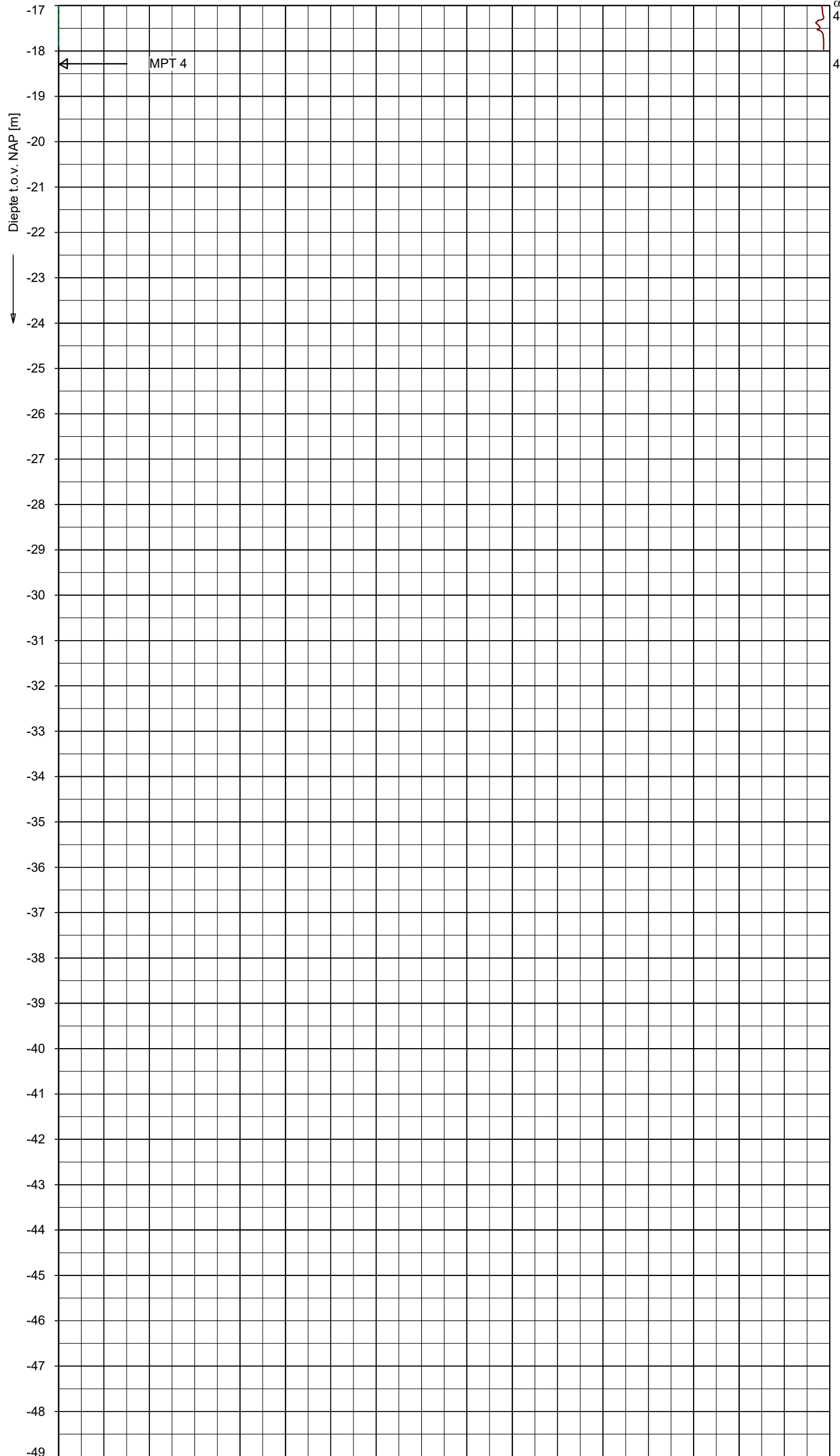
Horizontale doorlatendheid, Kh [m/d] →
 Relatieve horizontale doorlatendheid, Q/P [ml/min/kPa] →
 Conductivity [mS/m] ←

Indicatieve bodembeschrijving
 Automatisch gegenereerd uit data
 van de sondering, geldig onder
 grondwaterpeil (Robertson 1990, NL corr.)





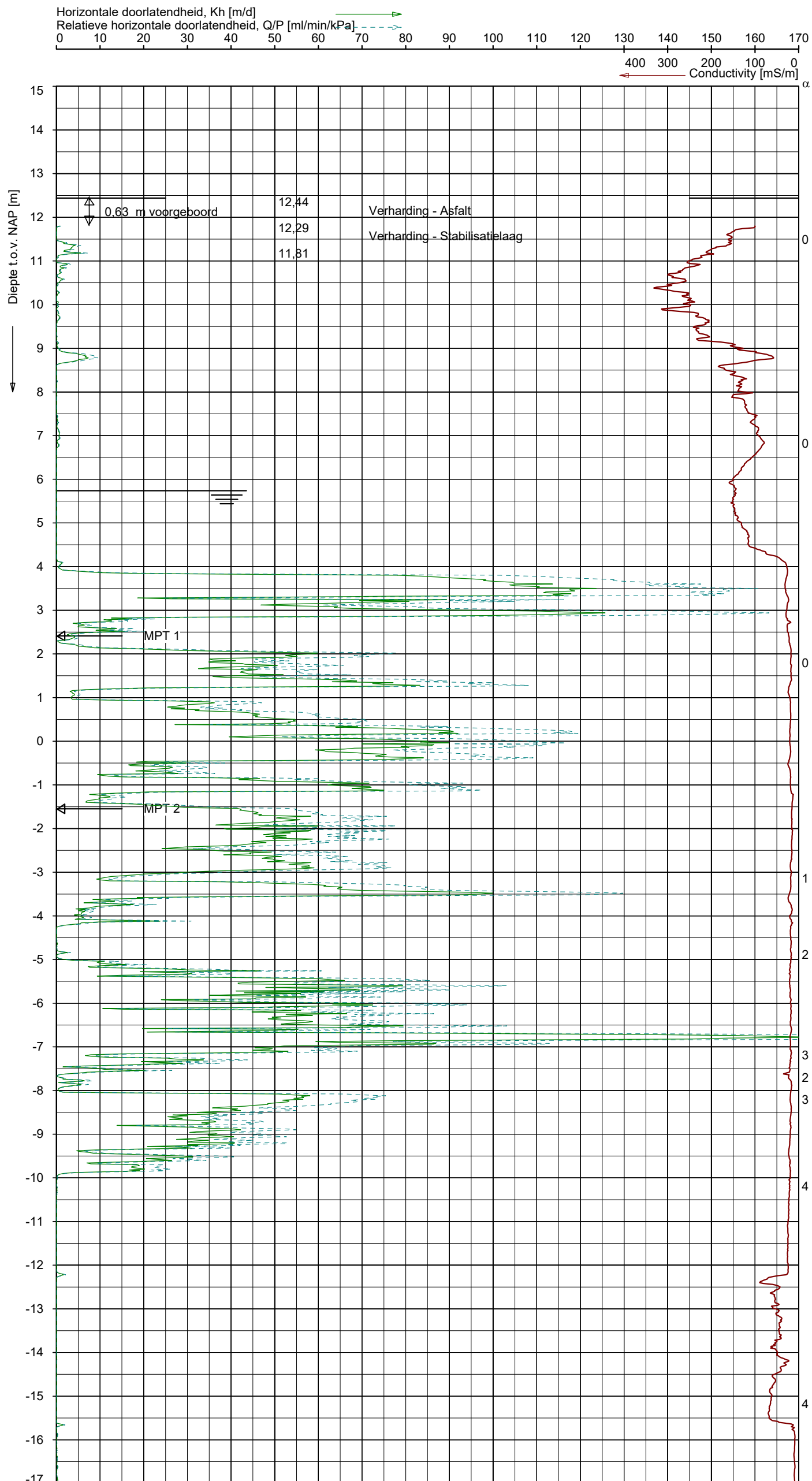
Indicatieve bodembeschrijving
 Automatisch gegenereerd uit data
 van de sondering, geldig onder
 grondwaterpeil (Robertson 1990, NL corr.)



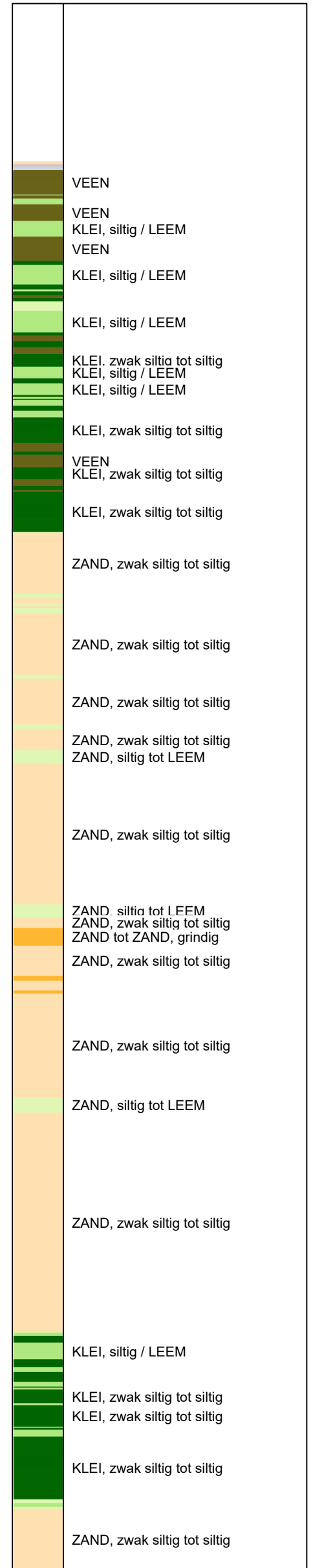
Opg. : AT/ d.d. 14-nov-2017 Coord.: X= 172643.6 m Y= 440773.7 m Systeem: RD
 Get. : R.VANTILBORG d.d. 01-aug-2018 Conus: CP15-CF75PA1SN2 1701-2567

HPT SONDERING
 VERKENNING GREBBEDIJK

Opdr. 1217-0035-231
 Sond. HPT_11.0_KR



Indicatieve bodembeschrijving
 Automatisch gegenereerd uit data van de sondering, geldig onder grondwaterpeil (Robertson 1990, NL corr.)

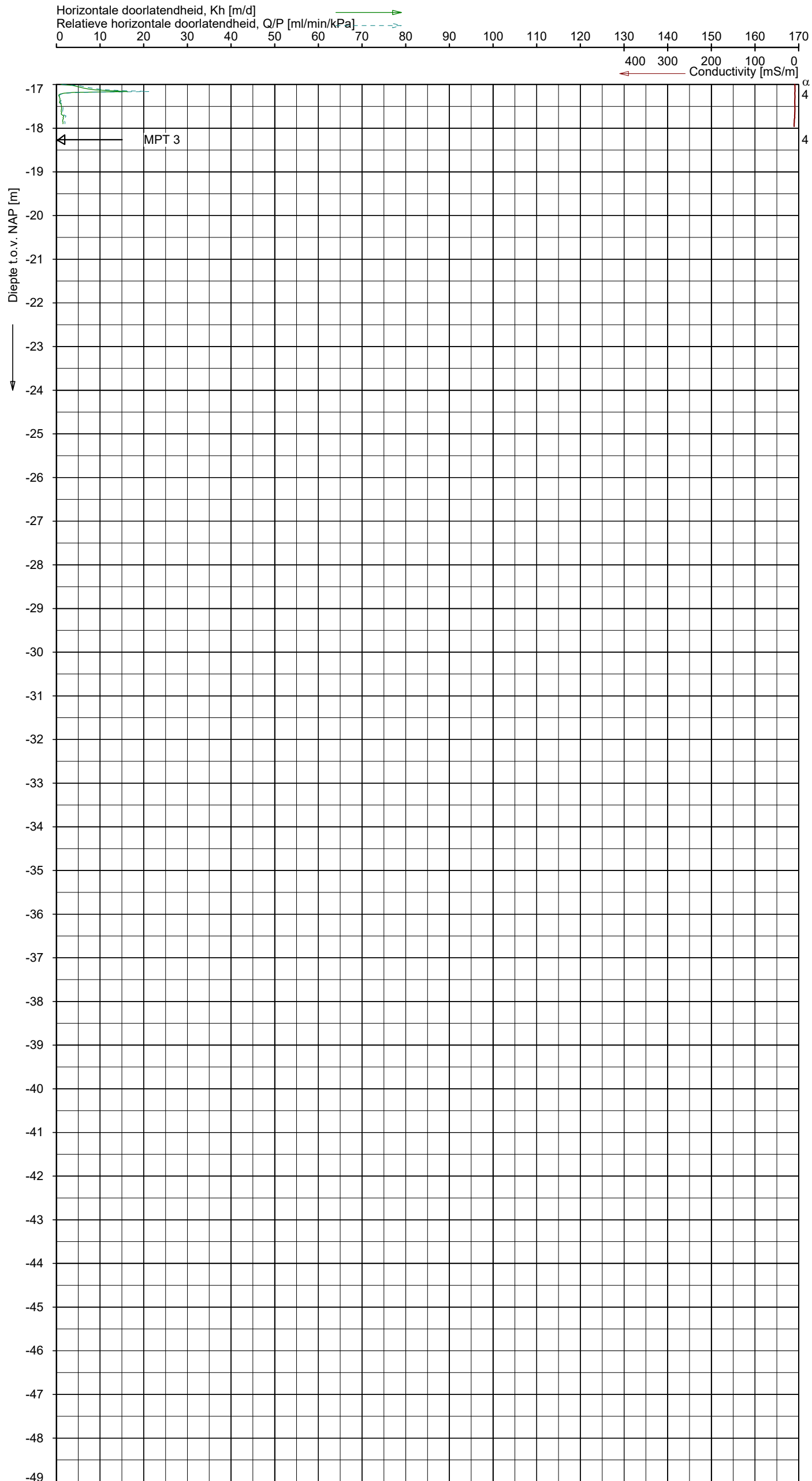


Opg. : AT/ d.d. 14-nov-2017 Coord.: X=172081.9m Y=440258.3m Systeem: RD
 Get. : R.VANTILBORG d.d. 01-aug-2018 Conus: CP15-CF75PA1SN2 1701-2567

HPT SONDERING

VERKENNING GREBBEDIJK

Opdr. 1217-0035-231
 Sond. HPT_27.0_KR



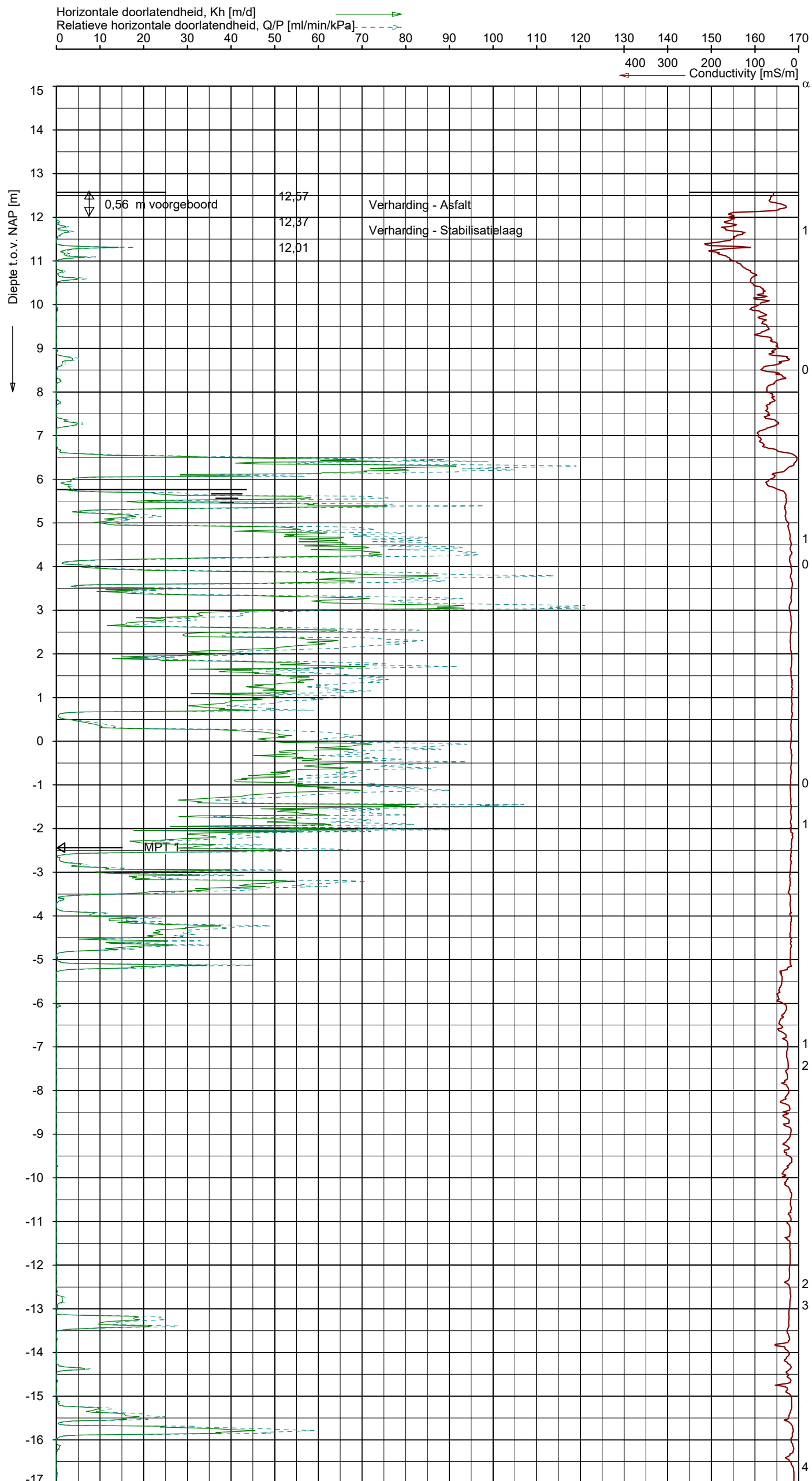
Indicatieve bodembeschrijving
 Automatisch gegenereerd uit data van de sondering, geldig onder grondwaterpeil (Robertson 1990, NL corr.)

	ZAND, zwak siltig tot siltig

Opg. : AT/ d.d. 14-nov-2017 Coord.: X=172081.9m Y=440258.3m Systeem: RD
 Get. : R.VANTILBORG d.d. 01-aug-2018 Conus: CP15-CF75PA1SN2 1701-2567

HPT SONDERING
 VERKENNING GREBBEDIJK

Opdr. 1217-0035-231
 Sond. HPT_27.0_KR



Indicatieve bodembeschrijving
 Automatisch gegenereerd uit data van de sondering, geldig onder grondwaterpeil (Robertson 1990, NL corr.)

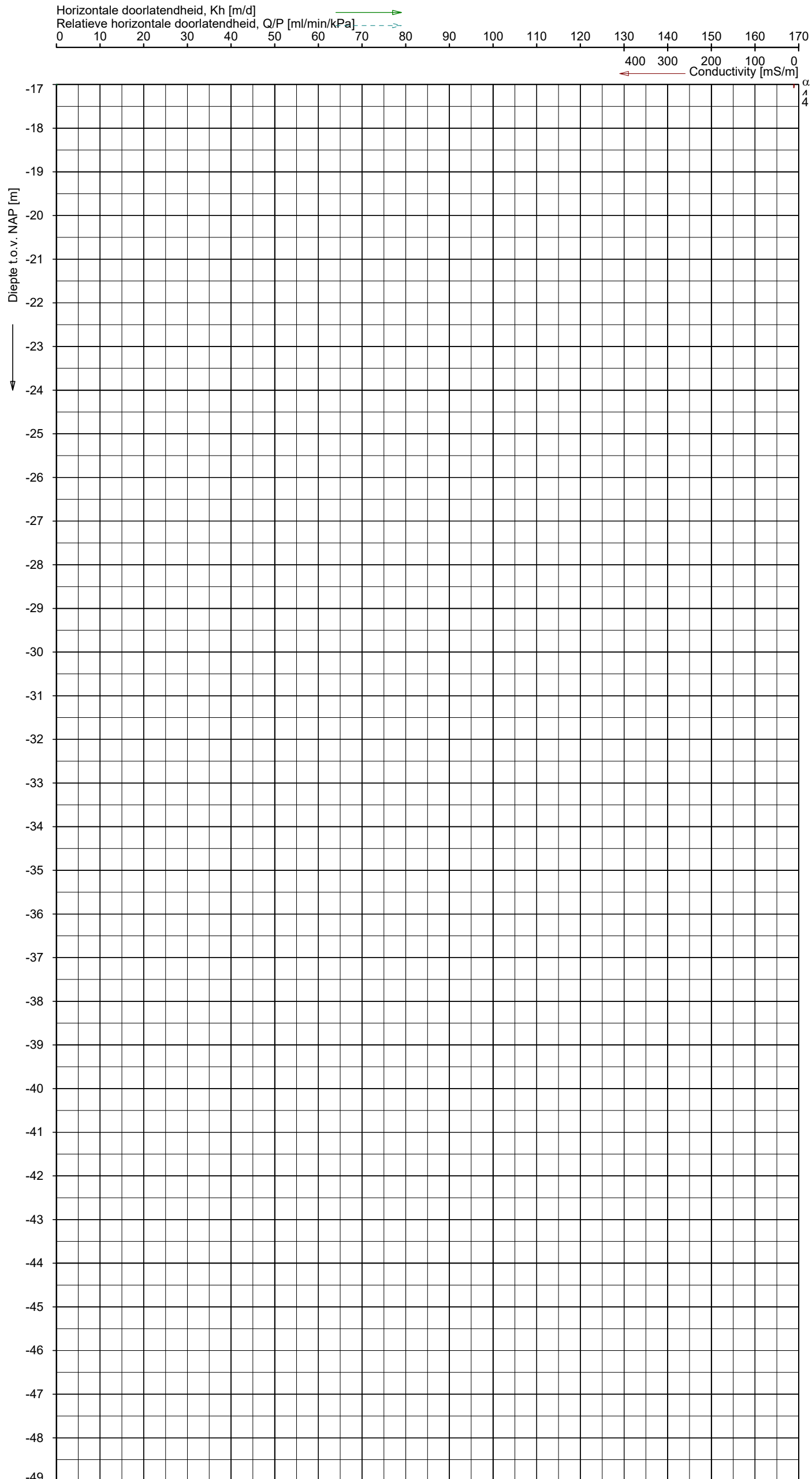


Opg. : AT/ d.d. 13-nov-2017 Coord.: X= 171326.7 m Y= 439967.8 m Systeem: RD
 Get. : R.VANTILBORG d.d. 01-aug-2018 Conus: CP15-CF75PA1SN2 1701-2567

HPT SONDERING

VERKENNING GREBBEDIJK

Opdr. 1217-0035-231
 Sond. HPT_39.0_KR



Indicatieve bodembeschrijving
 Automatisch gegenereerd uit data van de sondering, geldig onder grondwaterpeil (Robertson 1990, NL corr.)

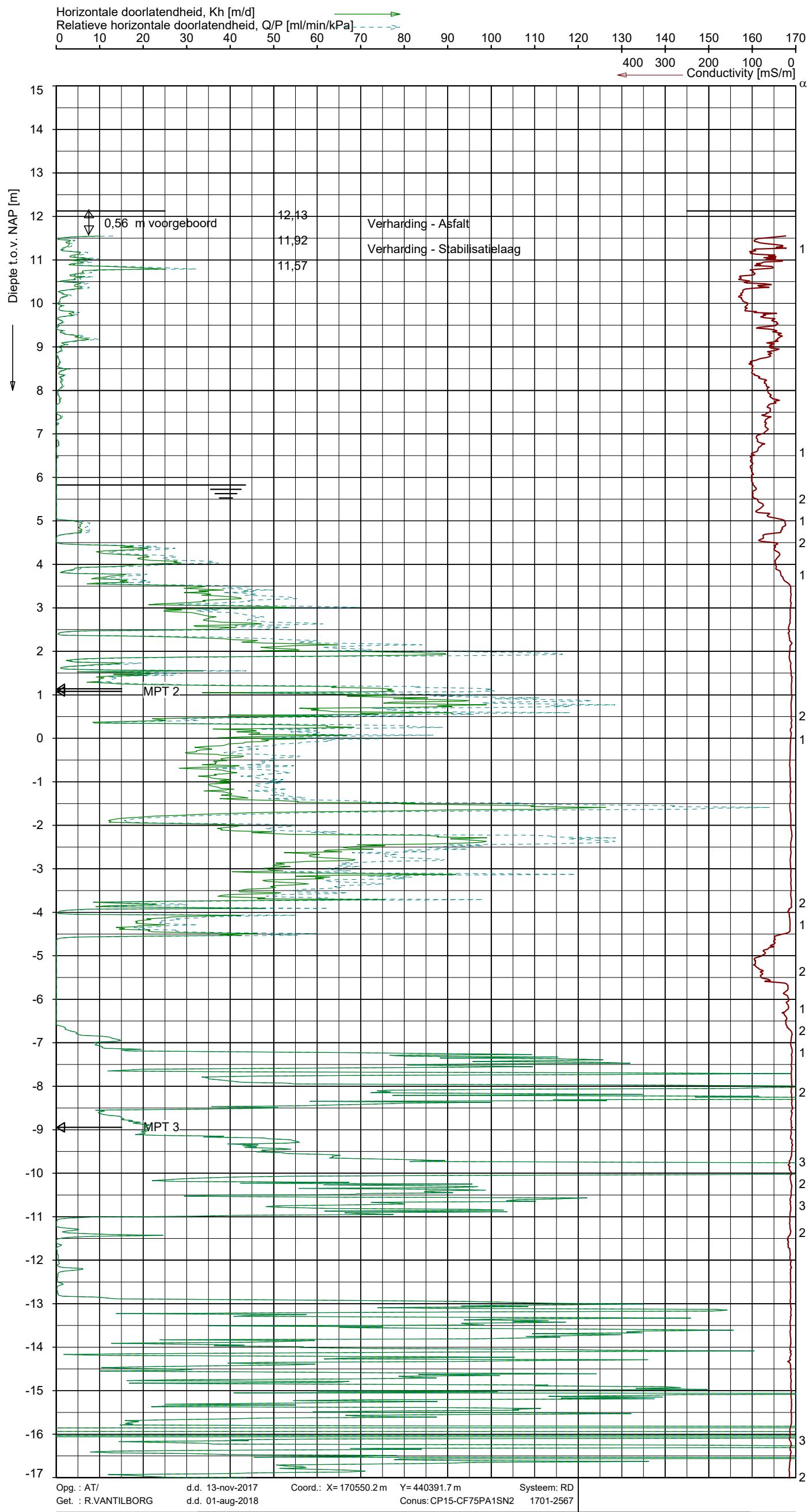
	ZAND, zwak siltig tot siltig
--	------------------------------

Opg. : AT/ d.d. 13-nov-2017 Coord.: X= 171326.7 m Y= 439967.8 m Systeem: RD
 Get. : R.VANTILBORG d.d. 01-aug-2018 Conus: CP15-CF75PA1SN2 1701-2567

HPT SONDERING

VERKENNING GREBBEDIJK

Opdr. 1217-0035-231
 Sond. HPT_39.0_KR



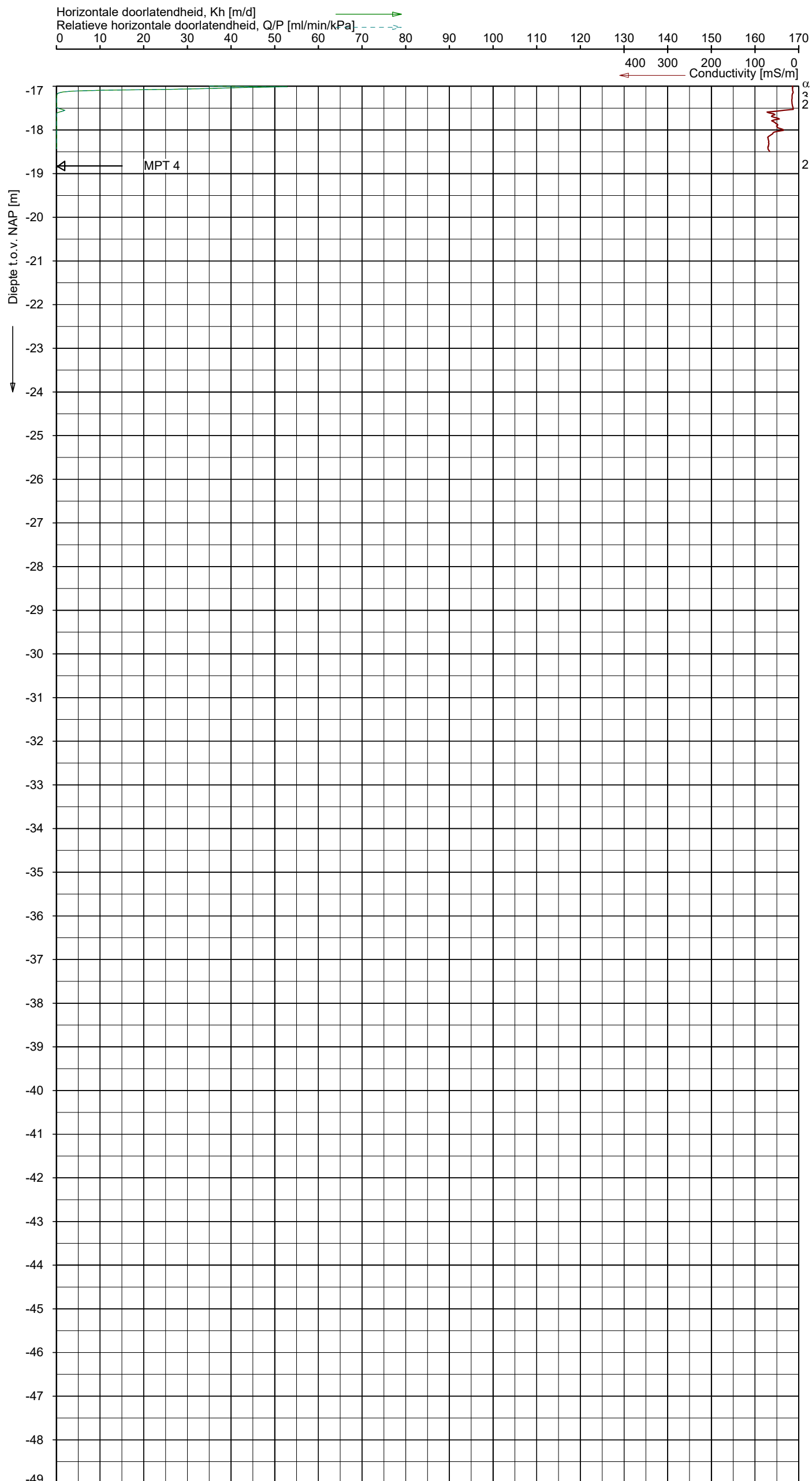
Indicatieve bodembeschrijving
 Automatisch gegenereerd uit data van de sondering, geldig onder grondwaterpeil (Robertson 1990, NL corr.)



Opg. : AT/ d.d. 13-nov-2017 Coord.: X=170550.2 m Y=440391.7 m Systeem: RD
 Get. : R.VANTILBORG d.d. 01-aug-2018 Conus: CP15-CF75PA1SN2 1701-2567

HPT SONDERING
 VERKENNING GREBBEDIJK

Opdr. 1217-0035-231
 Sond. HPT_48.0_KR



Indicatieve bodembeschrijving
 Automatisch gegenereerd uit data van de sondering, geldig onder grondwaterpeil (Robertson 1990, NL corr.)

	ZAND, zwak siltig tot siltig
	KLEI, siltig / LEEM

Opg. : AT/ d.d. 13-nov-2017 Coord.: X=170550.2 m Y=440391.7 m Systeem: RD
 Get. : R.VANTILBORG d.d. 01-aug-2018 Conus: CP15-CF75PA1SN2 1701-2567

HPT SONDERING
 VERKENNING GREBBEDIJK

Opdr. 1217-0035-231
 Sond. HPT_48.0_KR



Bijlage 6 Bepaling autonome bodemdaling



Project	: Verkenning Grebbedijk
Onderwerp	: Autonome bodemdaling
Datum	: 22 juni 2018
Projectnr LCSO/Fugro	: 17M3041_Verkenning_Grebbedijk
Opgesteld door	: ir. M. Hop
Gecontroleerd door	: ir. W.J. Leeuwdrant
Vrijgegeven	: ir. B. Rijneveld

1 Doel en aanleiding

In de Nadere Veiligheidsanalyse [RHDHV 2017] is opgemerkt dat de in rekening te brengen autonome bodemdaling van de Grebbedijk nader bepaald moet worden. In de laatste toetsronde [DHV 2010] is rekening gehouden met een autonome bodemdaling van 1cm/jaar. Deze waarde lijkt erg hoog voor dit gebied, het gebied wordt in principe niet als erg zakkingsgevoelig gezien. Daarnaast is de impact op het ontwerp mogelijk groot. Uitgaande van de bodemdaling van 1 cm/jaar zou voor een planperiode van 50-100 jaar in het ontwerp rekening moeten worden gehouden met een compensatie van bodemdaling van 0,5-1,0m.

Doel van deze memo is het bepalen van een realistische autonome bodemdaling waar in de Verkenningfase rekening mee kan worden gehouden. Hiertoe is in 2018 een aanvullende inmeting van de kruin uitgevoerd [LCF 2018]. De autonome bodemdaling wordt bepaald door deze te vergelijken met in het verleden uitgevoerde hoogtemetingen. Om de conclusies te valideren is er een analyse op basis van satellietdata uitgevoerd. Ook zijn reeksen aan dwarsprofielen beschouwd om conclusies ten aanzien van verschilzakkingen tussen de as van de dijk en de buitenkruin te valideren.

In hoofdstuk 2 wordt uiteengezet welke hoogtedata beschikbaar is. Hoofdstuk 3 geeft de resultaten van de analyse van de hoogtedata weer. In hoofdstuk 4 geeft een analyse op basis van satelliet weer. De conclusies en aanbevelingen worden gepresenteerd in hoofdstuk 5.

2 Gebruikte informatie

Voor dit document is gebruik gemaakt van de volgende informatie:

[RHDHV 2017] Dijkversterking Grebbedijk Nadere Veiligheidsanalyse, Royal HaskoningDHV, WATBE8333R002F006, 13-4-2017



NOTITIE

- [DHV 2010] Veiligheidstoetsing Grebbedijk (Dijkkring 45) Dijklichaam 3^e Toetsronde (2006-2011) Waterschap Vallei & Eem, rapport DHV, registratienummer WA-HW20090304, september 2010
- [LCF 2018] Geotechnisch onderzoek Verkenning Grebbedijk, LievensenseCSO-Fugro rapportnr. 17M3041-R-004-V01, 2 maart 2018
- [Excel WSVV] Excel tabel met daarin hoogte informatie van de jaren 1926, 1995, 1997, 2004 en 2009, WSVV
- [SKYG 2018] Deformatiekaart op basis van satellietdata SkyGeo, https://fugro_grebbedijk.portal.skygeo.com/portal/fugro_grebbedijk/grebbedijk/viewers/basic/
- [AHN2 2010] AHN2 hoogtekaart n39fz1, inwinjaar 2010

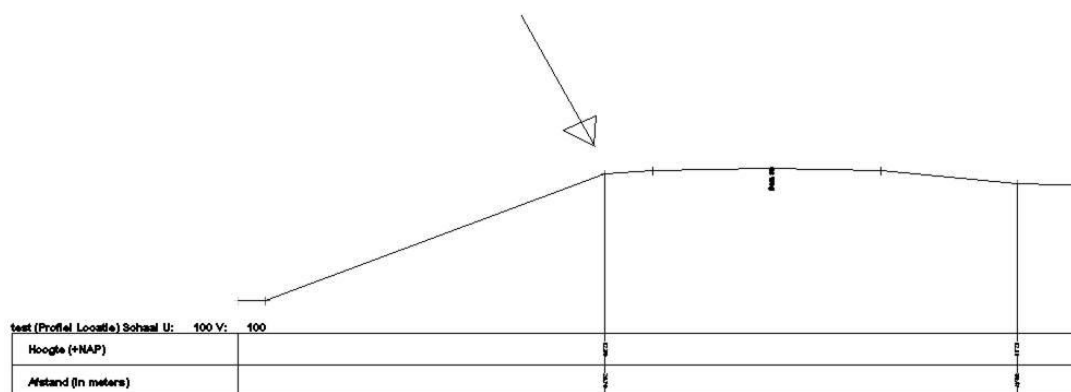
In tabel 1 is weergegeven welke hoogte informatie beschikbaar is, waar deze vandaan komt en of het duidelijk is op welke locatie deze data is ingewonnen. Voor de hoogtemeting uit 2018 is de binnenkruin, buitenkruin en as-weg ingemeten. In figuur 2-1 is aangegeven welke locatie als buitenkruinlijn is aangemerkt.

Tabel 1: Beschikbare hoogtemetingen

Jaar	Locatie meting	Bron	Opmerking
1926	Buitenkruinlijn	Exceltabel WSVV	X-Y coördinaten niet bekend
1995	Buitenkruinlijn	Exceltabel WSVV	X-Y coördinaten niet bekend
1995	Buitenkruinlijn	Exceltabel WSVV	X-Y coördinaten niet bekend
2004	Dwarsprofielen buitenkruinlijn	Fugrorapport, Exceltabel WSVV	
2009	Buitenkruinlijn	Exceltabel WSVV,	Uitgevoerd door waterschap januari 2009
2009	Buitenkruinlijn	Exceltabel WSVV	Uitgevoerd door bureau BCC december 2009
2018	Buitenkruinlijn, binnenkruinlijn, as-weg	Fugro rapport	



NOTITIE



Figuur 2-1: Locatie buitenkruinlijn en as-weg zoals gemeten in [Fugro 2018]

3 Analyse hoogtedata

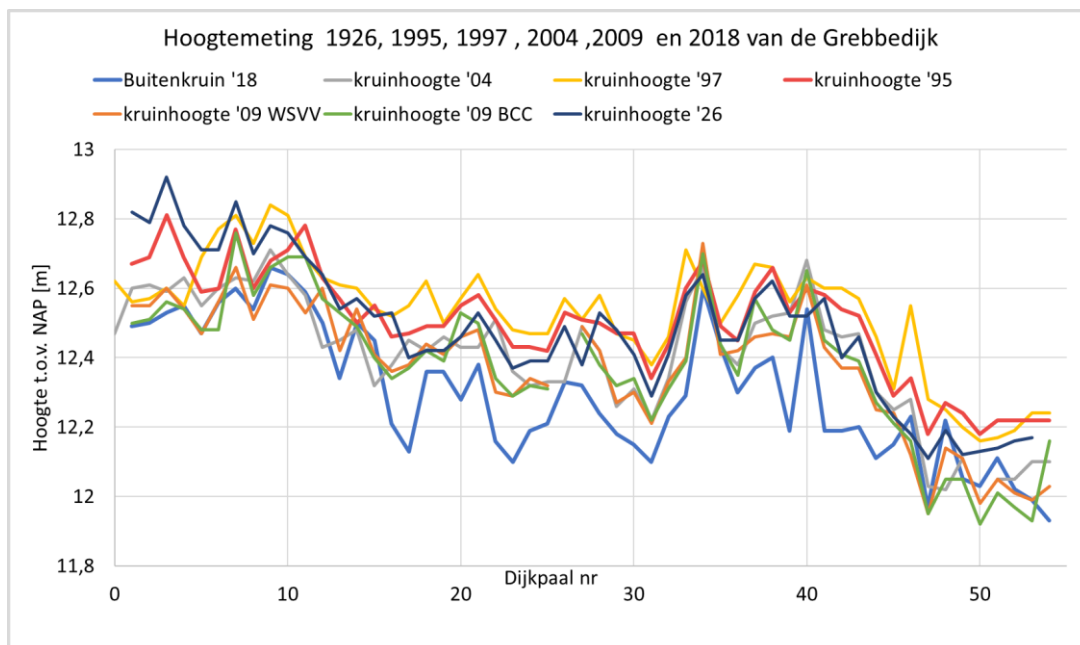
De data uit [Excel WSVV] is gegroepeerd per dijkpaal, zie figuur 3-1, voor de jaren 1926, 1995, 1997, 2004, 2009 (WSVV) en 2009 (BCC). Besloten is om deze indeling voor de huidige analyse ook aan te houden. In 2009 zijn 2 hoogtemetingen uitgevoerd, 1 door het waterschap in januari en 1 door bureau BCC in december. Dit is gedaan omdat de resultaten van de eerste meting veel vragen oproepen omdat de kruinhoogte in westelijke richting veel afnam. De controle meting bevestigde de meting. Voor de analyse in dit rapport wordt de gemiddelde hoogte van deze twee metingen gebruikt.

Voor het bepalen van de bodemdaling zijn in eerste instantie de hoogtemetingen ter plaatse van de buitenkruin vergeleken. Op deze locatie is namelijk de meeste data beschikbaar. In de tabel van [Excel WSVV] staan per dijkpaal de gebruikte coördinaten. Van de in 2018 uitgevoerde inmeting zijn de punten die het best overeenkomen met deze coördinaten gebruikt. Omdat deze punten niet exact overeenkomen kan hierdoor een hoogteverschil worden geïntroduceerd die niet het gevolg is van autonome bodemdaling. In bijlage 3 is de afstand tussen de coördinaten weergegeven.

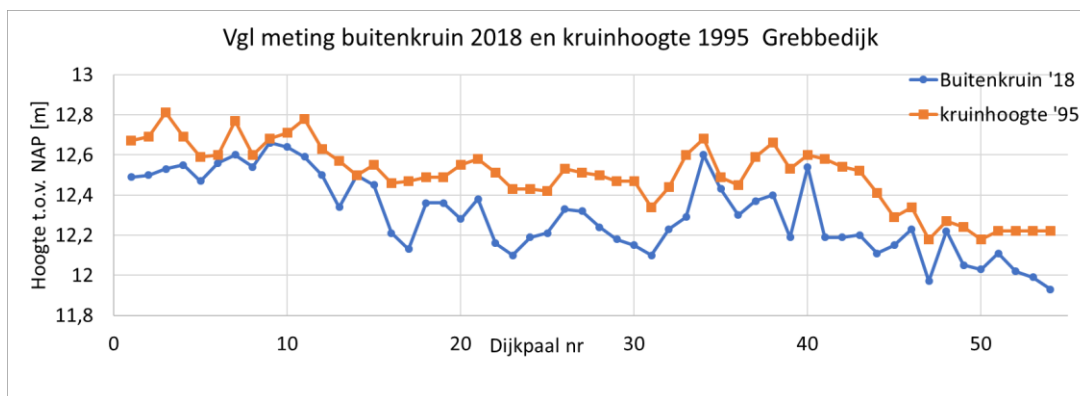
In figuur 3-1 is voor verschillende jaren de hoogtedata weergegeven. In Figuur 3-2 is alleen de hoogtedata van de jaren 1995 en 2018 weergegeven. Het verschil in hoogte tussen de twee jaren is gepresenteerd in Figuur 3-3. In Figuur 3-4 is het verschil weergegeven tussen 2018 en 2004. Figuur 3-5 vertoont het verschil tussen 2018 en 2009.



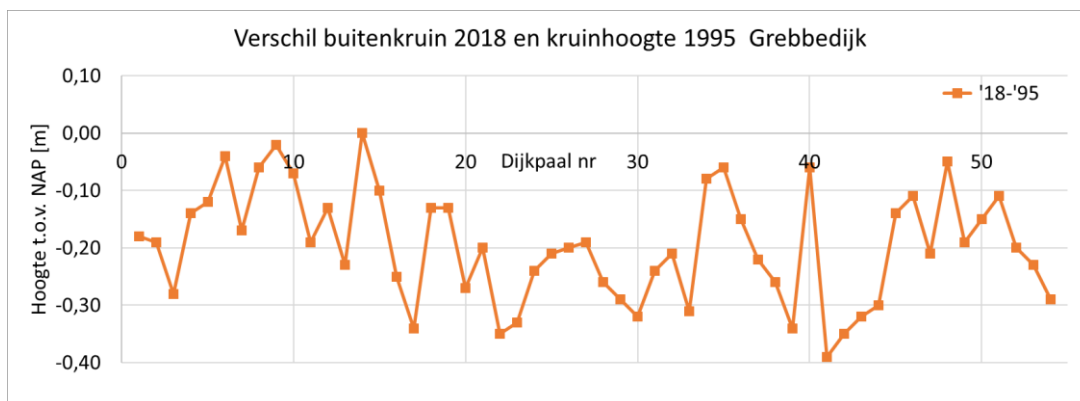
NOTITIE



Figuur 3-1: Vergelijking alle meetgegevens kruinhoogte



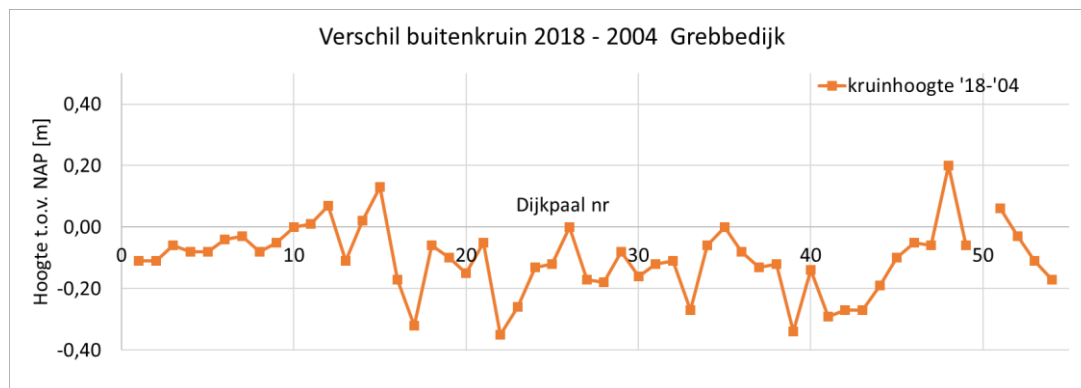
Figuur 3-2: Vergelijking kruinhoogte 1995 en buitenkruinhoogte 2018



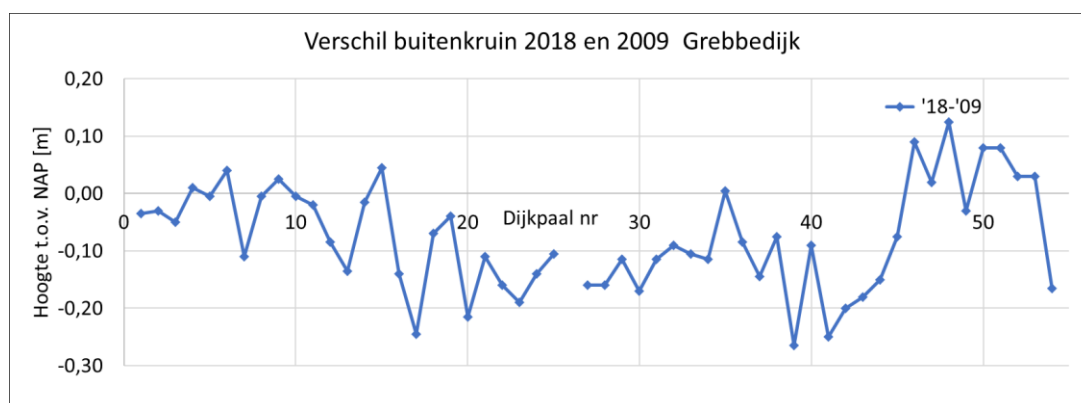


NOTITIE

Figuur 3-3: Verschil tussen de buitenkruin 2018 – kruinhoogte 1995



Figuur 3-4: Verschil tussen de buitenkruin 2018 – kruinhoogte 2004

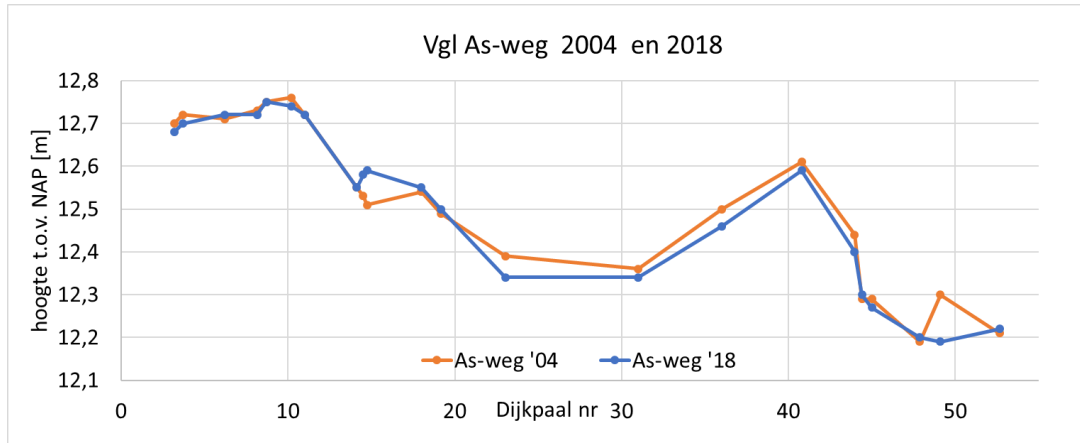


Figuur 3-5: Verschil tussen de buitenkruin 2018 – buitenkruin 2009

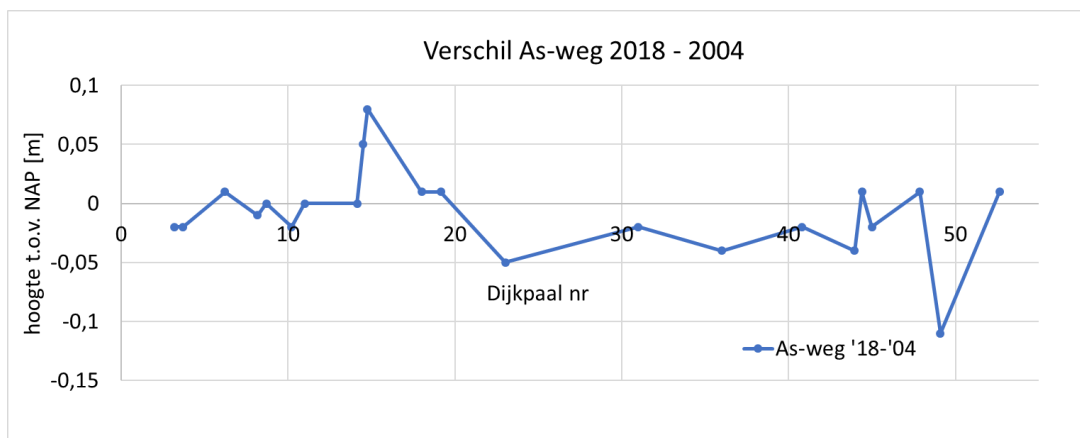
De autonome bodemdaling van de buitenkruin lijkt op basis van bovenstaande figuren aanzienlijk. Tussen 1995 en 2018 varieert de daling tussen ca. 0,0 en 1,3 cm per jaar. Voor de periode tussen 2004 en 2018 varieert de daling tussen ca. 0,0 en 1,4 cm per jaar. Tussen 2009 en 2018 varieert de daling tussen ca. 0,0 en 1,7 cm per jaar. Omdat een significante autonome bodemdaling op basis van de bodemopbouw niet verwacht wordt en de zakkingen ten gevolge van de dijkversterking in '95 naar verwachting beperkt zijn (alleen taludverflauwing van het binnentalud, geen dijkverhoging), is ook de zakking van de as van de dijk geanalyseerd. Voor de as van de dijk is alleen de data van de door Fugro uitgevoerde hoogtemetingen in 2004 en 2018 beschikbaar. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3-6.



NOTITIE



Figuur 3-6 Vergelijking hoogtemeting as-weg van 2004 en 2018



Figuur 3-7: Verschil tussen de as-weg 2004 – 2018

Uit Figuur 3-7 blijkt dat voor de as van de weg wel dezelfde trend zichtbaar is als voor de buitenkruinlijn, waarbij de zakking tussen dp0-12 en dp45-52 lager is dan tussen dp12-45. De absolute waarde van de zakking ter plaatse van de kruin is echter aanzienlijk lager dan ter plaatse van de buitenkruinlijn. De gemeten zakking over 14 jaar is ca. 1,5 cm voor dp0-12 en dp45-54, wat neerkomt op ca. 0,1 cm per jaar. Tussen dp12-45 ligt de gemeten zakking over 14 jaar op ca. 5cm, wat neerkomt op een daling van ca. 0,35 cm per jaar.

Uit de geodetische metingen blijkt dat er een verschil aanwezig is tussen de zakking van de as van de dijk en van de buitenkruin. Om dit te verifiëren is in de volgende paragraaf een analyse uitgevoerd van een reeks aan dwarsprofielen, om zo te zien of er significante verschillen zijn in hoogte tussen de as van de dijk en de buitenkruin.



NOTITIE

3.1 Analyse AHN2-profielen

Op basis van bovenstaande analyse lijkt het zo te zijn dat de buitenkruin van de dijk sneller zakt dan de as van de dijk. Op de buitenkruinlijn wordt een zakkingsnelheid van maximaal ca. 1,5 cm per jaar gevonden, terwijl op de as van de dijk een zakkingsnelheid van maximaal 4 mm per jaar wordt gevonden. Als dit daadwerkelijk het geval is zou de buitenkruin in de loop van de tijd veel lager moeten zijn komen te liggen als de as van de dijk, er van uitgaande dat de buitenkruinlijn niet regelmatig significant is opgehoogd/aangevuld. Om te verifiëren of de buitenkruin inderdaad (significant) meer is gezakt dan de as, zijn daarom elke 50 m dwarsprofielen gegenereerd langs het dijktraject op basis van AHN2-hoogtedata.

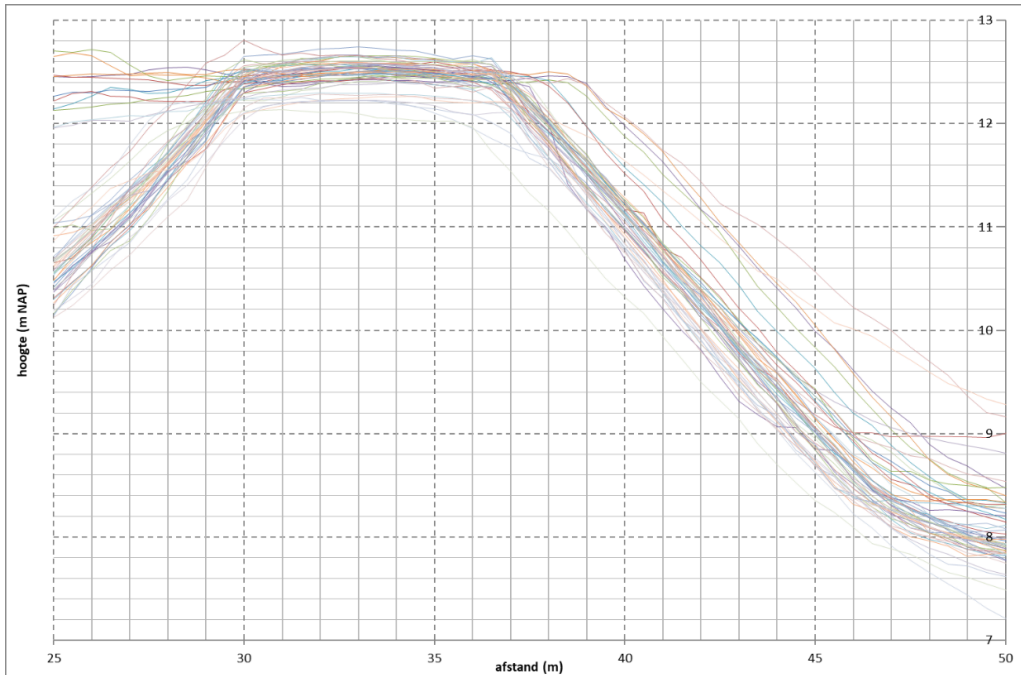
Met name als de laatste dijkversterking lang geleden is zal er in de loop van de tijd een significant zakkingsverschil zijn ontstaan. Het is niet precies bekend wanneer er voor het laatst een versterking heeft plaatsgevonden van de kruin en het buitentalud. Bekend is dat in 1995 geen integrale versterking heeft plaatsgevonden van de kruin en het buitentalud. Omdat niet bekend is wanneer de laatste versterking van het buitentalud heeft plaatsgevonden wordt uitgegaan van 1995 als referentiejaar. Sinds 1995 zou er volgens geodetische meetdata op veel plaatsen een zakking van maximaal ca. 35 cm hebben moeten plaatsvinden van de buitenkruin, uitgaande van een zakking van 1,5 cm per jaar. Op de as van de weg zou in die periode op basis van geodetische meetdata een zakking van ca. 8 cm hebben moeten plaatsvinden, uitgaande van 4 mm per jaar. Er zou dus een hoogteverschil aanwezig moeten zijn van ca. 25 cm (ca. 35cm minus ca. 8cm) tussen de as van de weg en de buitenkruin.

In Figuur 3-8 zijn de dwarsprofielen van de Grebbedijk weergegeven. De dwarsprofielen hebben een onderlinge afstand van 50 m. De dwarsprofielen tussen dp 15 en dp 51 zijn weergegeven, dit is het traject waar de meeste zakking plaatsvindt op basis van de metingen. In Figuur 3-9 is een uitsnede weergegeven ter plaatse van de buitenkruin. Er is een lineaire fit getrokken over de kruin van de dijk. Hieruit blijkt dat het hoogteverschil tussen de as van de weg en de buitenkruin gemiddeld ca. 8 cm bedraagt. Dit is veel minder dan de 25 cm die uit de geodetische metingen blijkt, uitgaande van 1995 als referentiejaar.

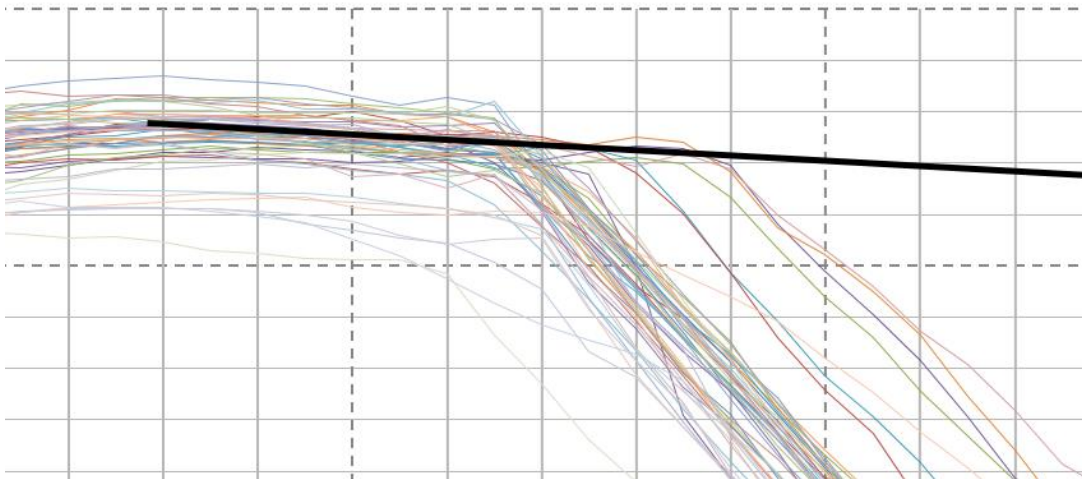
Als de AHN2-data wordt beschouwd lijkt het niet waarschijnlijk dat er aanzienlijke zakkingsverschillen plaatsvinden tussen de as van de weg en de buitenkruin, mits er niet tussentijds is aangevuld of opgehoogd.



NOTITIE



Figuur 3-8 Dwarsprofielen Grebedijk elke 50 m tussen dp 15 en dp 51, op basis van AHN2



Figuur 3-9: Uitsnede ter plaatse van de buitenkruijn, lineaire fit op hoogteverschil van kruin (zwarte lijn)

Wel is bekend dat enkele jaren geleden een aanvulling aan de bovenkant van het talud is uitgevoerd, zie Figuur 3-10. Dit omdat het stukje naast de weg 'hol' was getrokken. Deze aanvulling is echter alleen ter plaatse van het buitentalud aangebracht en niet ter plaatse van de kruin (asfaltweg). De beheerder heeft aangegeven dat dit ten westen van de weg Blauwe kamer naar het veer Opheusden als het deel bij Wageningen is uitgevoerd.



NOTITIE



Figuur 3-10 Foto aanvulling buitentalud, aangeleverd WSVV

3.2 Conclusie hoogte-data

Op basis van geodetische metingen kan worden geconcludeerd dat de buitenkruinlijn zakt met maximaal ca. 1,5 cm per jaar, terwijl op de as van de dijk een zakkingsnelheid van maximaal 4 mm per jaar wordt gevonden. Dit suggereert dat er aanzienlijke zakkingsverschillen aanwezig zijn tussen de as van de dijk en de buitenkruinlijn. Deze zakkingsverschillen zijn echter niet waarneembaar in profielen van de dijk op basis van AHN2-data.

Opgemerkt dient te worden dat het niet altijd duidelijk is waar ter plaatse van de buitenkruin is gemeten. De hoogteverschillen rondom de buitenkruinlijn zijn groter dan bij de as van de weg, waardoor meetreeksen niet altijd met elkaar vergeleken kunnen worden. Aangezien de trend over het gehele traject waarneembaar is in meerdere meetreeksen lijkt dit echter geen sluitende verklaring. Ook zou het kunnen zijn dat de buitenkruin daadwerkelijk meer zakt, bijvoorbeeld doordat de bermen worden uitgereden



NOTITIE

door verkeer. Dit wordt echter niet waargenomen in dwarsprofielen van de dijk op basis van AHN2-data.

Omdat op basis van geodetische metingen en AHN2-data geen eenduidige conclusie kan worden getrokken ten aanzien van de aan te houden bodemdaling voor de planperiode, is aanvullend satellietdata beschouwd. In het volgende hoofdstuk worden de resultaten van satellietdata geanalyseerd.

4 Satelliet data

Door SkyGeo is voor de Grebbedijk een zakkingskaart gemaakt op basis van satelliet data tussen 2015 en 2018 [SKYG 2018]. Deze zakkingskaart geeft de gemiddelde zakking van een meetpunt per jaar op basis van een lineaire fit. De kaart wordt gebruikt om de conclusies getrokken uit de meetresultaten van de waterpassing te valideren.

4.1 Methode en nauwkeurigheid

De zakkingskaart die SkyGEO levert is gebaseerd op InSAR. InSAR is een techniek waarmee hoogtedata en maaiveldzakkingen kunnen worden bepaald. Voor het analyseren van de InSAR data gebruikt SkyGEO twee verschillende algoritmes: Persistence Scatter (PS) en Distributed Scatter (DS). Op basis van puntreflecties wordt de deformatie van objecten waargenomen, de ontwikkelingen van deze deformaties worden met het PS algoritme met een nauwkeurigheid van een millimeter per jaar vastgesteld. Het DS algoritme zoekt naar nabijgelegen pixels die dezelfde reflectie-eigenschappen vertonen, waarna de gemiddelde deformatie van die groep pixels bepaald wordt. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen maaiveldpunten en hoge punten op basis van AHN2, waarbij de grens van het maaiveld 2-3 m boven de AHN2-terreinhoogte ligt.

De analyse levert nauwkeurige relatieve (zetting ten opzichte van een ander punt) zetting snelheden op. De nauwkeurigheid van 1 meetpunt in een tijdreeks is ca. 6 mm. De nauwkeurigheid van de relatieve zettingsnelheid op basis van een lineaire-fit op de metingen is ca. 1mm/jaar. De X,Y,Z-locatie van een punt heeft een absolute (de precieze locatie van het meetpunt) nauwkeurigheid van ca. 2,5m in elke richting [SKYG 2018].

4.2 Resultaten

Autonome bodemdaling is een fenomeen dat zich over een groter gebied voordoet, daarom wordt er voor de analyse minder waarde gehecht aan individuele meetpunten. In figuur 4-1 is de aangeleverde deformatiekaart voor de Grebbedijk weergegeven. Uit de kaart is op te maken dat er veel meetpunten rondom de dijk bij aanwezige bebouwing



NOTITIE

beschikbaar is. Op de dijk zelf is het aantal meetpunten relatief beperkt (ca. 100 op de kruin). De kaart vertoont de deformatie tussen ca. -10 en 10 mm jaar. Te zien is dat vrijwel alle punten groen gekleurd zijn, wat wil zeggen dat er gebiedswijd een deformatie tussen -5 en 5 mm per jaar voorkomt als boven en ondergrens. De metingen op de dijk laten geen significante verschillen zien ten opzichte van de punten in de omgeving.

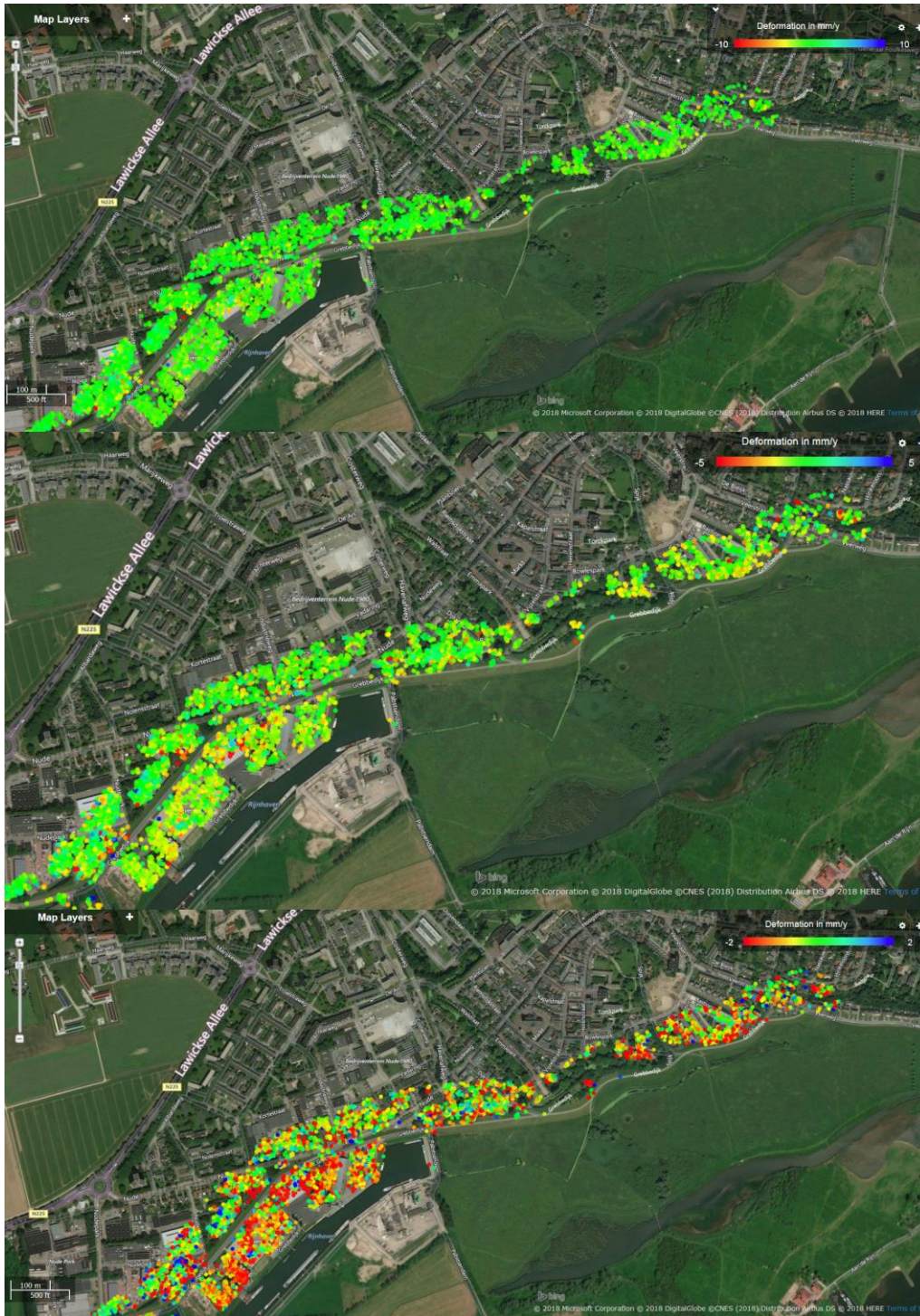
Figuur 4-2 zoomt in op het gebied tussen dijkpaal 0 en 20. Op drie verschillende deformatie schalen (-2 tot 2, -5 tot 5 en -10 tot 10 mm/jaar) is de deformatie weergegeven. Hieruit wordt duidelijk dat een autonome bodemdaling van ca. 2 mm per jaar als ondergrens aangehouden kan worden, als bovengrens geldt ca. 3 mm per jaar. Dit is ook gedaan voor het gebied tussen dijkpaal 20 – 35 in figuur 4-3. Hier komt hetzelfde beeld naar voren, een bovengrens van 3 mm per jaar en een ondergrens van 2 mm per jaar. Voor het gebied tussen dijkpaal 35 en 54 weergegeven in figuur 4-4 geldt dit ook.



Figuur 4-1 Deformatiekaart Grebbedijk met de gemiddelde deformatie per jaar tussen ca -10 mm en 10 mm per jaar [SKYG 2018]



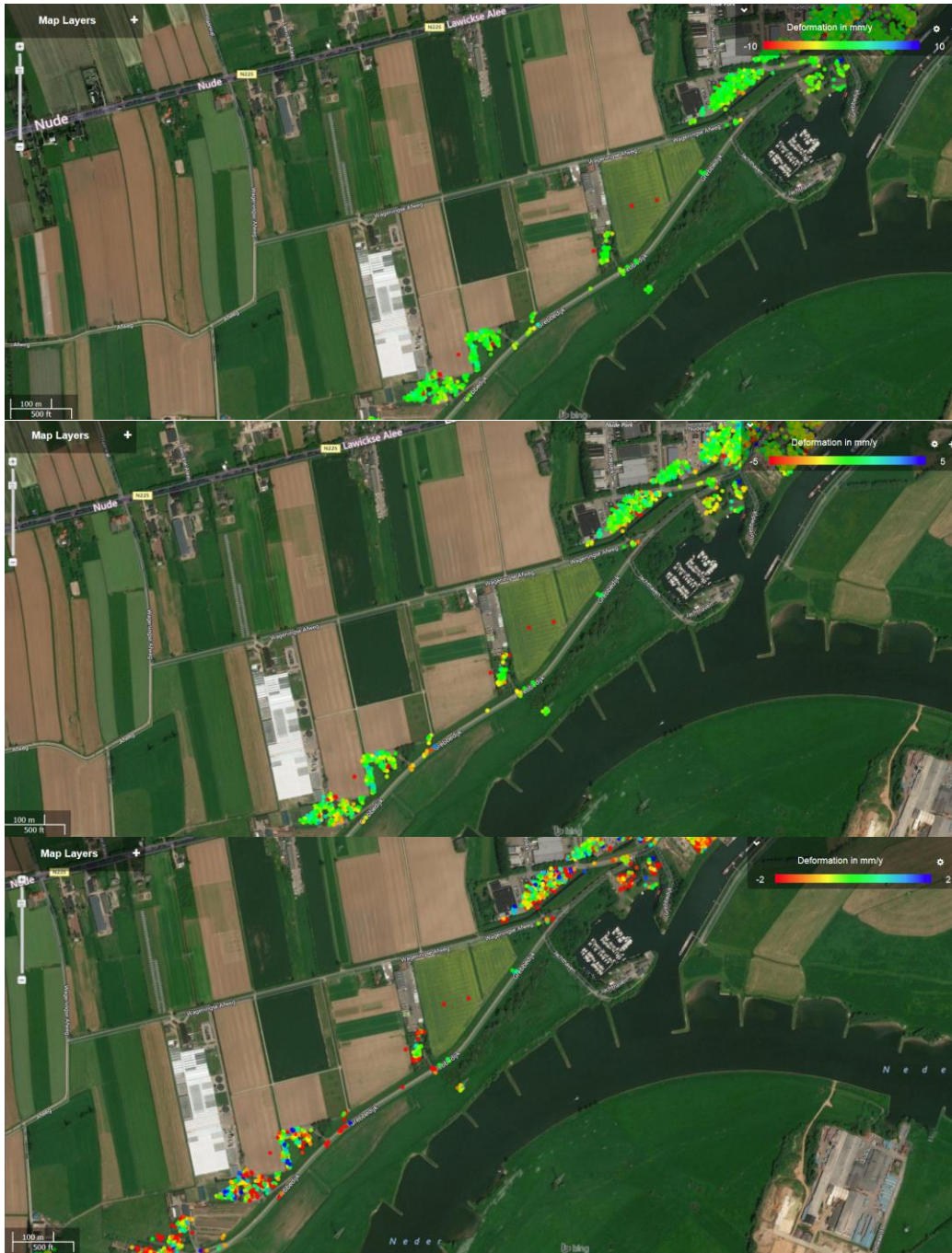
NOTITIE



Figuur 4-2 Zakkingskaart voor gemiddelde deformaties met verschillende deformatie schalen boven tussen ca. -10 en 10 mm/jaar midden tussen ca. -5 en 5 mm/jaar onder tussen ca. -2 en 2 mm/jaar [SKYG 2018]



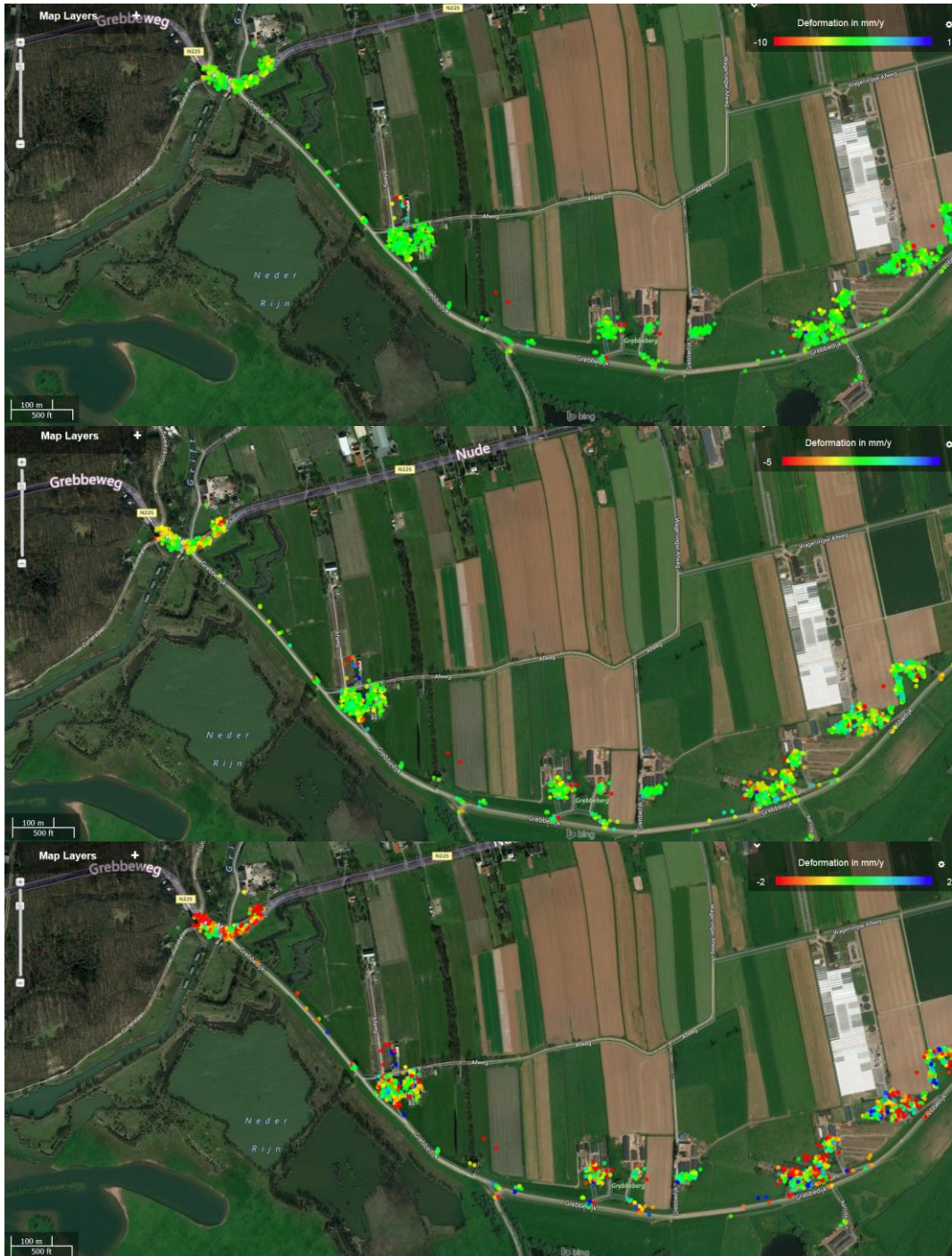
NOTITIE



Figuur 4-3 Zakkingskaart voor gemiddelde deformaties met verschillende deformatie schalen boven tussen ca. -10 en 10 mm/jaar midden tussen ca. -5 en 5 mm/jaar onder tussen ca. -2 en 2 mm/jaar [SKYG 2018]



NOTITIE



Figuur 4-4 Zakkingskaart voor gemiddelde deformaties met verschillende deformatie schalen boven tussen ca. -10 en 10 mm/jaar midden tussen ca. -5 en 5 mm/jaar onder tussen ca. -2 en 2 mm/jaar [SKYG 2018]



NOTITIE

4.3 Conclusie

Op basis van satellietdata wordt een zakkingsnelheid gevonden tussen de 2 en 3 mm per jaar. De trend die zichtbaar is in de geodetische metingen (in het midden van het dijktraject de meeste zakking) is niet waargenomen in de satellietdata. De satellietdata geeft langs het gehele dijktraject ongeveer dezelfde zakking.

Met de huidige resolutie van de satellietdata is het niet mogelijk om zakkingsverschillen tussen de as van de dijk en de buitenkruin vast te stellen. De gevonden zakking van 2 – 3 mm kan worden gezien als een gemiddelde zakking. De gevonden zakking sluit aan op de resultaten van de metingen van de as van de dijk (max ca. 3,5 mm / jaar). De zakking die volgt uit satellietdata sluit duidelijk niet aan op de resultaten van de geodetische metingen aan de buitenkruin.

5 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de uitgevoerde hoogtemetingen ter plaatse van de buitenkruinlijn lijkt de in de laatste toetsronde [DHV 2010] aangenomen autonome bodemdaling van ca. 1cm/jaar een reële waarde. Uit metingen blijkt zelfs dat op sommige trajecten de buitenkruinlijn meer zakt, tot wel 2 cm/jaar. Echter, op basis van de hoogtemetingen ter plaatse van de as van de dijk lijkt deze aanzienlijk lager te zijn (maximaal ca. 3,5 mm/jaar). Dit zou erop kunnen wijzen dat de buitenkruinlijn (veel) meer zakking vertoont dan de as van de dijk. Dit is gecontroleerd aan de hand van een analyse van een reeks aan dwarsprofielen van de dijk, op basis van AHN2-data. In de profielen is er slechts een beperkt hoogteverschil aanwezig tussen de as van de dijk en de buitenkruinlijn. Analyse van de profielen geeft geen aanleiding om aan te nemen dat er significante verschilzakking optreedt tussen de as van de dijk en de buitenkruinlijn.

De gevonden zakking op basis van geodetische metingen van de as van de dijk en satellietdata lijken een betrouwbaar beeld te geven van de autonome bodemdaling van de dijk. In de verkenningsfase wordt uitgegaan van de zakkings die op basis van deze data wordt gevonden. Hierbij kan een verschil worden gemaakt tussen de trajecten dp0-12 en 45-54 en het tussengelegen traject. In de twee eerstgenoemde trajecten treedt op basis van geodetische metingen significant minder zetting op dan het tussengelegen traject. Opgemerkt wordt dat dit verschil niet zichtbaar is in de satellietdata.

Zoals benoemd zijn er een aantal meetreeksen op basis van geodetische inmetingen die aangeven dat de dijk mogelijk sneller zou zakken, of dat er verschilzettingen optreden tussen de as van de dijk en de buitenkruin. Hier is geen voor de hand liggende verklaring voor. Wel dient te worden opgemerkt dat het niet altijd duidelijk is waar ter plaatse van de



NOTITIE

buitenkruin is gemeten. De hoogteverschillen rondom de buitenkruinlijn zijn groter dan bij de as van de weg, waardoor meetreeksen niet altijd met elkaar vergeleken kunnen worden. Aangezien de trend over het gehele traject waarneembaar is in meerdere meetreeksen lijkt dit echter geen sluitende verklaring. Ook zou het kunnen zijn dat de buitenkruin daadwerkelijk meer zakt, bijvoorbeeld doordat de bermen worden uitgereden door verkeer. Dit wordt echter niet waargenomen in dwarsprofielen van de dijk op basis van AHN2-data.

Op basis van de verschillende bronnen lijkt het verantwoord om voor de autonome daling uit te gaan van een autonome bodemdaling van 15 cm voor een planperiode van 50 jaar. Dit sluit aan op de bodemdaling op basis van de geodetische metingen ter plaatse van de kruin en de satellietdata.

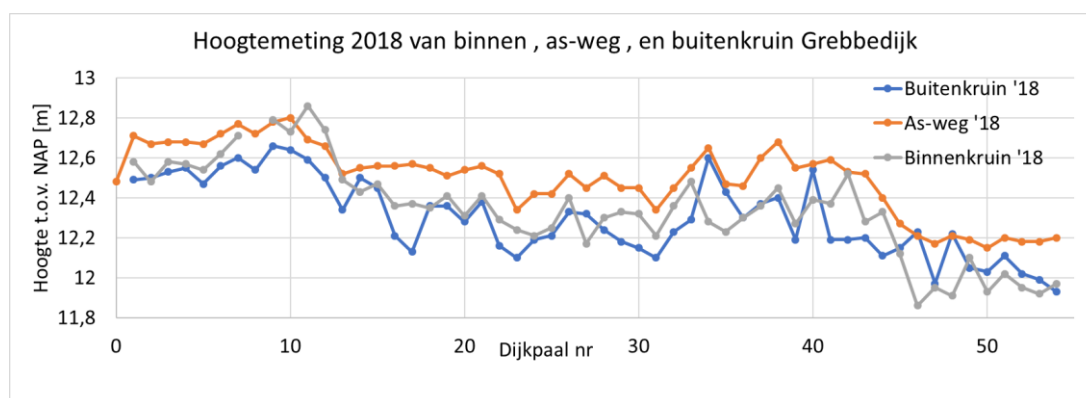
Uit de meetdata ter plaatse van de buitenkruinlijn en de enkele jaren uitgevoerde aanvulling van het 'hol' getrokken bovenste deel van het talud lijkt het buitentalud lokaal (in de buurt van Wageningen) weg te zakken. De oorzaak hiervoor is niet duidelijk. Mogelijk is een ondeugdelijke opbouw (afglijden of uitrijden bovenlaag) de oorzaak. Om meer zekerheid over dit fenomeen te verkrijgen wordt geadviseerd om:

- Proefsleuven te graven om de opbouw ter plaatse van de kruin en het talud nader vast te stellen. Dit is sowieso een nuttige actie om de dikte van de bekledingslaag naast het wegcunet vast te stellen, en/of
- Inventariseren of hoge-resolutie satellietdata aanvullende informatie kan leveren over het zakkingsgedrag van de dijk en eventuele verschilzakkingen tussen de as en de buitenkruin. Bij het snel in gang zetten hiervan kan tot de realisatiefase toch nog waardevolle informatie worden verkregen om de restonzekerheid weg te nemen, en/of
- Plaatsen van een raster van meetspijkers in de kruin van de dijk om de vervormingen structureel vast te stellen. Bij het snel in gang zetten hiervan kan tot de realisatiefase toch nog waardevolle informatie worden verkregen om de restonzekerheid weg te nemen.

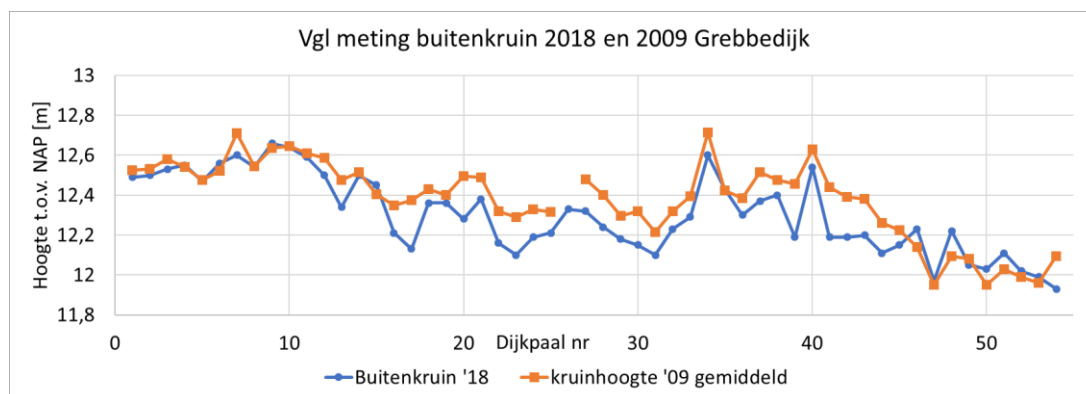


NOTITIE

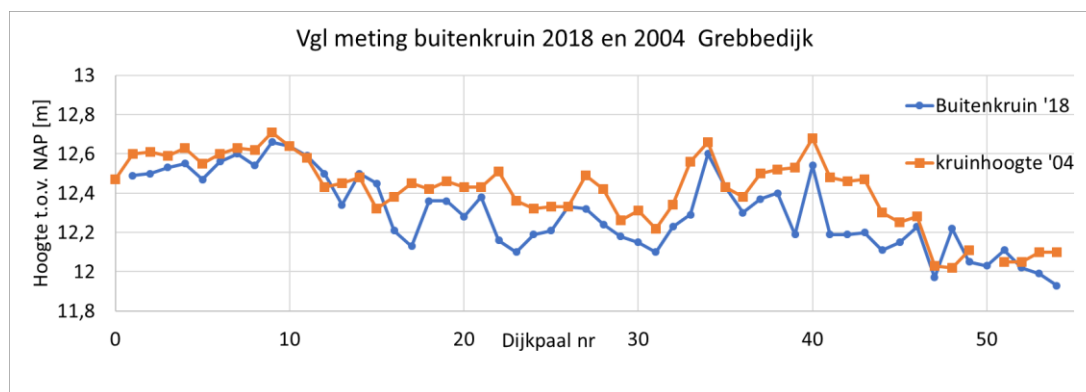
Bijlage 1 Analyse hoogte



Figuur 5-1 Hoogtemeting 2018 Binnenkruin, as-weg en buitenkruin



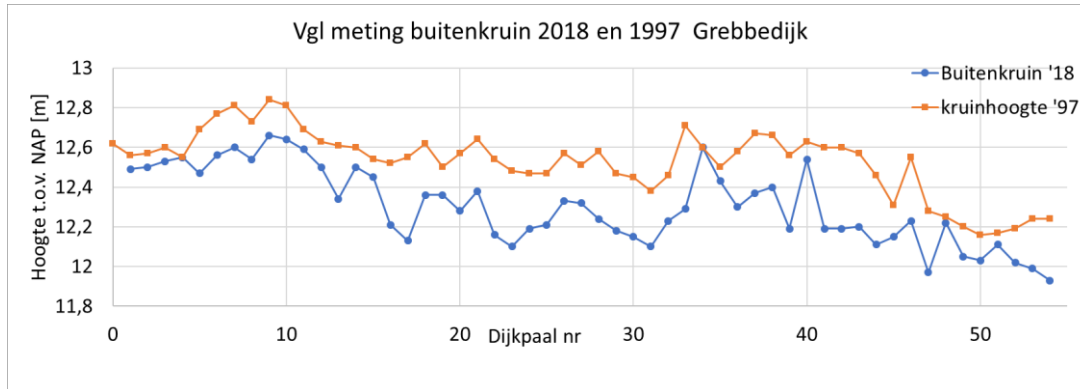
Figuur 5-2 Vergelijking meting buitenkruin 2018 en 2009



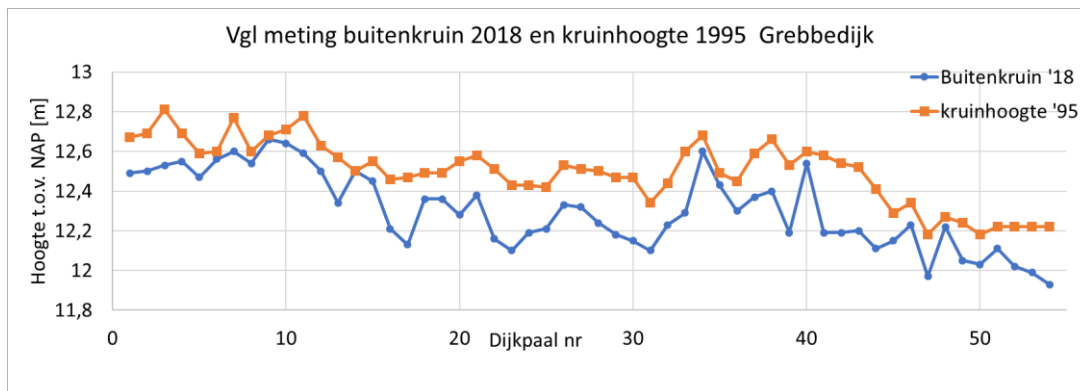
Figuur 5-3 Vergelijking meting buitenkruin 2018 en 2004



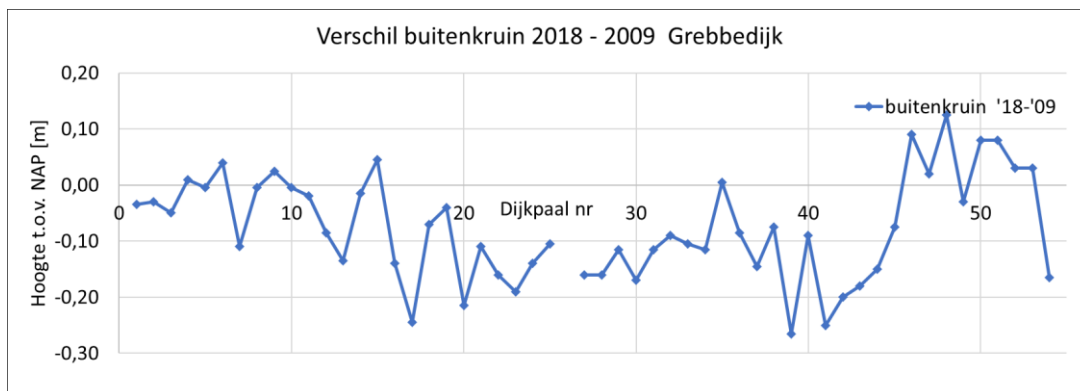
NOTITIE



Figuur 5-4 Vergelijking meting buitenkruin 2018 en 1997



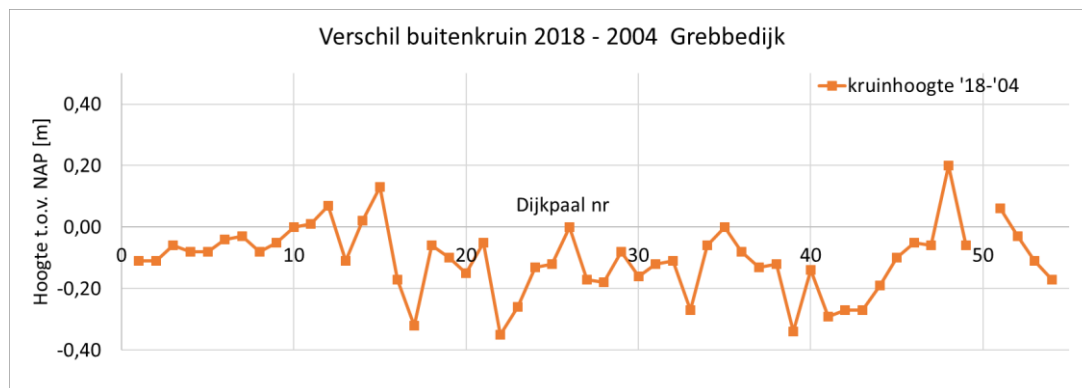
Figuur 5-5 Vergelijking meting buitenkruin 2018 en 1995



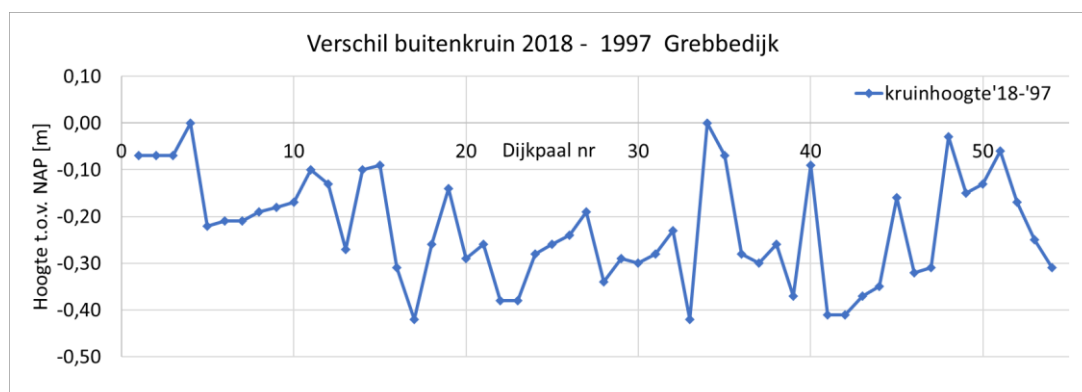
Figuur 5-6 Verschil buitenkruinhoogte 2018 en 2009



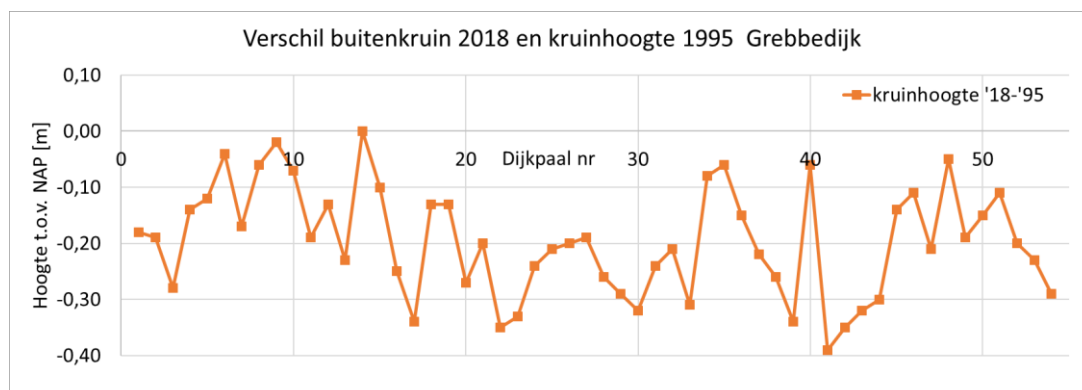
NOTITIE



Figuur 5-7 Verschil buitenkruinhoogte 2018 en 2004



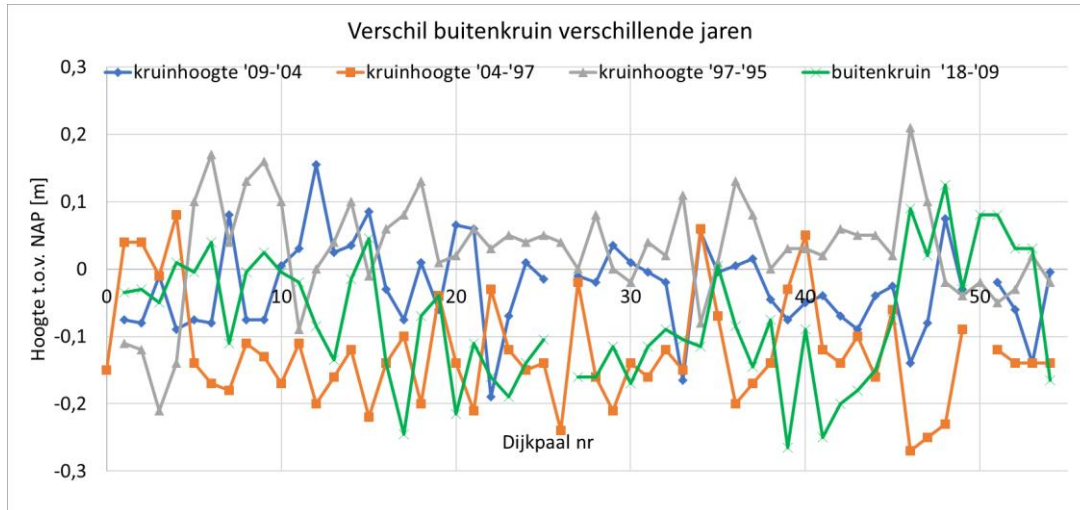
Figuur 5-8 Verschil buitenkruinhoogte 2018 en 1997



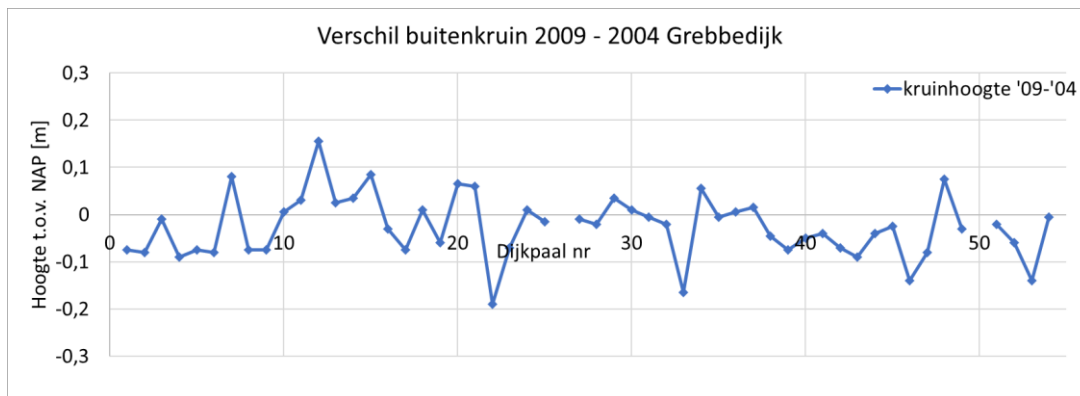
Figuur 5-9 Verschil buitenkruinhoogte 2018 en 1995



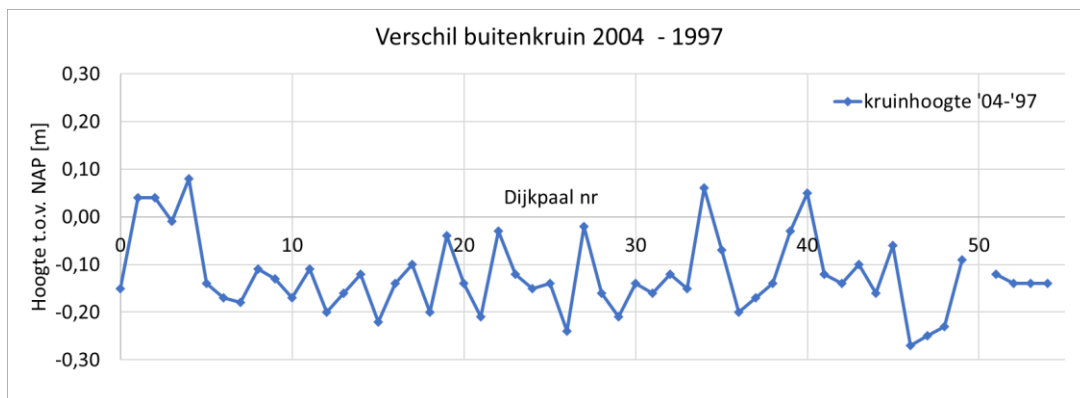
NOTITIE



Figuur 5-10 Overzicht verschillen tussen de jaren 2009-2018, 2004-2009, 1997-2004 en 1995-1997



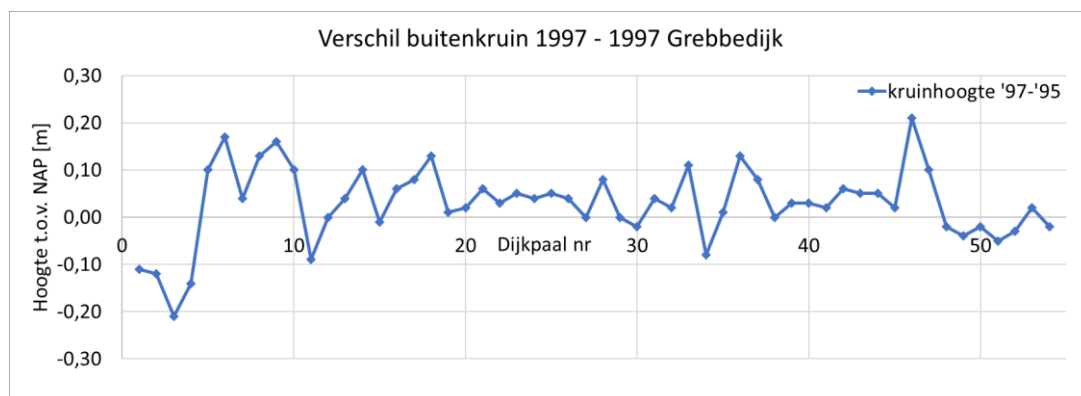
Figuur 5-11 Verschil buitenkruinlijn 2004 en 2009



Figuur 5-12 Verschil buitenkruinlijn 1997 en 2004



NOTITIE



Figuur 5-13 Vershil buitenkruinlijn 1995 en 1997



NOTITIE

Bijlage 2 Gebruikte hoogtedata

Tabel 5-1 Gegevens hoogtemetingen uit toets bestand[Excel WSVV] en hoogtemeting [Fugro 2018]

Dijkpaal	X-coördinaat ¹	Y-coördinaat ¹	1926	1995	1997	2004	2009 ²	2009 ³	2009 gem. ⁴	2018 Bui ⁵	2018 As	2018 Bin ⁶
0	174663,55	441895,57		12,19	12,62	12,47				11,91	12,48	
1	174590,28	441870,2	12,82	12,67	12,56	12,6	12,55	12,5	12,53	12,49	12,71	12,58
2	174518,1	441825,58	12,79	12,69	12,57	12,61	12,55	12,51	12,53	12,5	12,67	12,48
3	174418,99	441795,42	12,92	12,81	12,6	12,59	12,6	12,56	12,58	12,53	12,68	12,58
4	174324,65	441761,9	12,78	12,69	12,55	12,63	12,54	12,54	12,54	12,55	12,68	12,57
5	174233,15	441723,24	12,71	12,59	12,69	12,55	12,47	12,48	12,48	12,47	12,67	12,54
6	174138,7	441701,93	12,71	12,6	12,77	12,6	12,56	12,48	12,52	12,56	12,72	12,62
7	174069,24	441634,18	12,85	12,77	12,81	12,63	12,66	12,76	12,71	12,6	12,77	12,71
8	173969,42	441613,63	12,7	12,6	12,73	12,62	12,51	12,58	12,55	12,54	12,72	
9	173872,45	441601,32	12,78	12,68	12,84	12,71	12,61	12,66	12,64	12,66	12,78	12,79
10	173775,12	441588,87	12,76	12,71	12,81	12,64	12,6	12,69	12,65	12,64	12,8	12,73
11	173689,92	441576,86	12,69	12,78	12,69	12,58	12,53	12,69	12,61	12,59	12,69	12,86
12	173585,2	441559,61	12,64	12,63	12,63	12,43	12,6	12,57	12,59	12,5	12,66	12,74
13	173477,1	441528,99	12,54	12,57	12,61	12,45	12,42	12,53	12,48	12,34	12,52	12,49
14	173379,89	441490,13	12,57	12,5	12,6	12,48	12,54	12,49	12,52	12,5	12,55	12,43
15	173283,44	441450,67	12,52	12,55	12,54	12,32	12,41	12,4	12,41	12,45	12,56	12,47
16	173220,04	441381,02	12,53	12,46	12,52	12,38	12,36	12,34	12,35	12,21	12,56	12,36
17	173160,04	441307,22	12,4	12,47	12,55	12,45	12,38	12,37	12,38	12,13	12,57	12,37
18	173100,36	441233,2	12,42	12,49	12,62	12,42	12,44	12,42	12,43	12,36	12,55	12,35
19	173037,51	441158,81	12,42	12,49	12,5	12,46	12,41	12,39	12,4	12,36	12,51	12,41
20	172962,69	441084,73	12,46	12,55	12,57	12,43	12,46	12,53	12,5	12,28	12,54	12,31
21	172878,75	441032,25	12,53	12,58	12,64	12,43	12,48	12,5	12,49	12,38	12,56	12,41
22	172802,88	440968,68	12,45	12,51	12,54	12,51	12,3	12,34	12,32	12,16	12,52	12,29
23	172736,12	440894,65	12,37	12,43	12,48	12,36	12,29	12,29	12,29	12,1	12,34	12,24
24	172677,81	440816,46	12,39	12,43	12,47	12,32	12,34	12,32	12,33	12,19	12,42	12,21
25	172619,33	440736,1	12,39	12,42	12,47	12,33	12,32	12,31	12,32	12,21	12,42	12,25
26	172558,78	440653,06	12,49	12,53	12,57	12,33				12,33	12,52	12,4
27	172493,82	440572,71	12,38	12,51	12,51	12,49	12,49	12,47	12,48	12,32	12,45	12,17
28	172405,25	440515,01	12,53	12,5	12,58	12,42	12,42	12,38	12,4	12,24	12,51	12,3
29	172324,05	440464,53	12,48	12,47	12,47	12,26	12,27	12,32	12,3	12,18	12,45	12,33
30	172240,65	440409,27	12,41	12,47	12,45	12,31	12,3	12,34	12,32	12,15	12,45	12,32
31	172168,44	440347,96	12,29	12,34	12,38	12,22	12,21	12,22	12,22	12,1	12,34	12,21
32	172099,21	440274,96	12,41	12,44	12,46	12,34	12,33	12,31	12,32	12,23	12,45	12,36
33	172034,49	440201,26	12,58	12,6	12,71	12,56	12,4	12,39	12,4	12,29	12,55	12,48



NOTITIE

34	171965,12	440128,62	12,64	12,68	12,6	12,66	12,73	12,7	12,72	12,6	12,65	12,28
35	171875,1	440067,32	12,45	12,49	12,5	12,43	12,41	12,44	12,43	12,43	12,47	12,23
36	171781,74	440028,73	12,45	12,45	12,58	12,38	12,42	12,35	12,39	12,3	12,46	12,3
37	171686,68	440001,45	12,57	12,59	12,67	12,5	12,46	12,57	12,52	12,37	12,6	12,36
38	171587,83	439982,16	12,62	12,66	12,66	12,52	12,47	12,48	12,48	12,4	12,68	12,45
39	171486,78	439968,39	12,52	12,53	12,56	12,53	12,46	12,45	12,46	12,19	12,55	12,27
40	171386,5	439959,57	12,52	12,6	12,63	12,68	12,61	12,65	12,63	12,54	12,57	12,39
41	171286,6	439971,84	12,57	12,58	12,6	12,48	12,43	12,45	12,44	12,19	12,59	12,37
42	171183,4	439987,77	12,4	12,54	12,6	12,46	12,37	12,41	12,39	12,19	12,53	12,52
43	171086,73	440002,85	12,46	12,52	12,57	12,47	12,37	12,39	12,38	12,2	12,52	12,28
44	170987,92	440024,03	12,3	12,41	12,46	12,3	12,25	12,27	12,26	12,11	12,4	12,33
45	170897,72	440062,79	12,23	12,29	12,31	12,25	12,24	12,21	12,23	12,15	12,27	12,12
46	170801,78	440115,24	12,18	12,34	12,55	12,28	12,12	12,16	12,14	12,23	12,21	11,86
47	170736,8	440186,87	12,11	12,18	12,28	12,03	11,95	11,95	11,95	11,97	12,17	11,95
48	170663,72	440253,82	12,19	12,27	12,25	12,02	12,14	12,05	12,1	12,22	12,21	11,91
49	170598,94	440328,03	12,12	12,24	12,2	12,11	12,11	12,05	12,08	12,05	12,19	12,1
50	170534,58	440406,81	12,13	12,18	12,16	12,96	11,98	11,92	11,95	12,03	12,15	11,93
51	170470,99	440480,15	12,14	12,22	12,17	12,05	12,05	12,01	12,03	12,11	12,2	12,02
52	170395,16	440557,2	12,16	12,22	12,19	12,05	12,01	11,97	11,99	12,02	12,18	11,95
53	170321,86	440621,93	12,17	12,22	12,24	12,1	11,99	11,93	11,96	11,99	12,18	11,92
54	170282,88	440656,63		12,22	12,24	12,1	12,03	12,16	12,1	11,93	12,2	11,97

Opmerkingen

1. Coördinaten volgen uit toets bestand [Excel WSVV]
2. Meting waterschap januari 2009
3. Meting Bureau Bcc december 2009
4. Hoogtemeting Fugro buitenkruin (locatiemeetpunt zo dicht mogelijk bij coördinaten [Excel WSVV])
5. Hoogtemeting Fugro as-weg (locatiemeetpunt zo dicht mogelijk bij coördinaten [Excel WSVV])
6. Hoogtemeting Fugro binnenkruin (locatiemeetpunt zo dicht mogelijk bij coördinaten [Excel WSVV])

Tabel 5-2 Gegevens as-weg 2018 en 2004

Dijkpaal	X_coördinaat	Y-coördinaat	Meting 2004	Meting 2018
3,18	174392,07	441794,56	12,7	12,68
3,7	174340,20	441778,20	12,72	12,7
6,22	174119,72	441691,04	12,71	12,72
8,16	173953,62	441614,54	12,73	12,72
8,7	173900,39	441608,22	12,75	12,75
10,2	173753,61	441588,89	12,76	12,74
11	173635,55	441573,29	12,72	12,72
14,13	173370,41	441490,77	12,55	12,55
14,5	173336,19	441477,06	12,53	12,58
14,75	173312,81	441467,74	12,51	12,59
18	173097,12	441235,91	12,54	12,55
19,16	173024,52	441148,08	12,49	12,5
23,02	172731,95	440895,64	12,39	12,34
31	172164,47	440348,62	12,36	12,34



NOTITIE

36,01	171780,64	440032,13	12,5	12,46
40,8	171305,33	439972,11	12,61	12,59
43,96	170991,97	440026,51	12,44	12,4
44,4	170947,96	440045,10	12,29	12,3
45	170898,08	440066,23	12,29	12,27
47,86	170675,85	440246,94	12,19	12,2
49,1	170595,88	440338,06	12,3	12,19
52,64	170349,85	440601,43	12,21	12,22

Opmerkingen

- Coördinaten en hoogte volgen uit tekeningen behorende bij toets bestand (dwarsprofielen2.dwg)*
- Hoogtemeting Fugro as-weg (locatiemeetpunt zo dicht mogelijk bij coördinaten [Excel WSVV])*



NOTITIE

Bijlage 3 Afstand tussen punten

Tabel 5-3 Afstand tussen coördinaten [Excel WSVV] en 2018 meting buitenkruin [Fugro 2018]

Dijkpaal	Afstand [m]	Dijkpaal	Afstand [m]
0	4,62	27	0,75
1	7,65	28	0,81
2	1,43	29	1,41
3	8,07	30	0,11
4	0,81	31	1,71
5	0,32	32	0,76
6	0,48	33	0,54
7	0,58	34	0,59
8	0,35	35	0,65
9	26,20	36	1,05
10	0,86	37	0,38
11	1,37	38	0,43
12	11,14	39	1,62
13	3,64	40	0,60
14	5,41	41	1,35
15	1,67	42	0,85
16	4,75	43	0,54
17	4,43	44	1,31
18	3,73	45	1,13
19	3,25	46	1,43
20	1,60	47	0,41
21	1,82	48	0,48
22	1,38	49	0,39
23	0,58	50	1,22
24	0,98	51	0,37
25	0,54	52	1,23
26	0,93	53	0,70
27	0,75	54	10,54

Tabel 5-4 Afstand tussen coördinaten 2004[Fugro 2004] en 2018 as-weg hoogtemeting [Fugro 2018]

Dijkpaal	Afstand tussen as-weg 2004 en 2018
3,18	4,40
3,7	0,34
6,22	5,55
8,16	1,46
8,7	0,20
10,2	0,74
11	15,37
14,13	3,68
14,5	3,67



NOTITIE

14,75	12,96
18	0,66
19,16	10,64
23,02	2,51
31	0,73
36,01	1,13
40,8	19,54
43,96	3,17
44,4	6,97
45	0,36
47,86	4,55
49,1	10,08
52,64	16,16



Bijlage 7 Commentaartabel

