



hoogheemraadschap
Hollands
Noorderkwartier

Prins Hendrikzanddijk

Geohydrologische effectstudie

Auteur

Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.

Registratienummer

EDM70-19-103/16-016.575

Datum

5 oktober 2016

Versie

04

Status

definitief

Afdeling

Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Bevelandseweg 1
Postbus 250
1700 AG Heerhugowaard



Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Aanleiding	4
1.3	Doel	4
1.4	Leeswijzer	4
2	Randvoorwaarden en uitgangspunten	5
2.1	Locatie	5
2.2	Bodemopbouw	6
2.3	Oppervlaktewater	7
2.3.1	Binnendijks	7
2.3.2	Waddenzee	8
2.4	Grondwaterstand en stijghoogte	9
2.5	Grondwaterkwaliteit	12
2.6	Grondwateraanvulling	13
2.7	Landbouwkundig gebruik	13
2.7.1	Bodemtype	14
2.7.2	Landgebruik	14
2.7.3	Grondwaterstand	15
2.7.4	Doelrealisatie landbouw	17
2.8	Beschermd natuurmonument Ceres	18
2.9	Ontwerp Prins Hendrikzanddijk	18
3	Grondwatermodel	20
3.1	Basismodel	20
3.2	Te doorlopen stappen	20
3.2.1	Actualisatie en verbetering huidige situatie	20
3.2.2	Hydrologisch effect permanente situatie	21
3.2.3	Hydrologisch effect aanlegfase	21
3.2.4	Modellering veiligheidsduin	21
3.3	Model omvang	22
3.4	Model prestatie	23
4	Referentie situatie	27
4.1	Referentiesituatie aanlegeffect: 2015	27
4.2	Referentiesituatie langjarig effect: 2025	27
4.3	Referentiesituatie langjarig effect: 2085	28
5	Permanente situatie	30
5.1	Effect op grondwaterstand 2025	30
5.2	Effect op grondwaterstand 2085	31
5.3	Grondwaterkwaliteit in 2025	33
5.4	Grondwaterkwaliteit in 2085	34
5.5	Afgeleide effecten	36
5.5.1	Landbouw	36
5.5.2	Beschermd natuurmonument Ceres	36
6	Aanlegfase	37
6.1	Bouwmethode	37
6.2	Berekend effect basisscenario	37



6.3	Afgeleid effect basisscenario	43
6.3.1	Landbouw	44
6.3.2	Beschermd natuurmonument Ceres	44
6.3.3	Huidige dijk	44
6.3.4	Overige belangen	44
6.4	Alternatieven	45
6.4.1	Hydraulisch aanbrengen tot NAP + 4 m in plaats van NAP + 8 m	45
6.4.2	Een halvering van de aanlegssnelheid	46
6.4.3	Toepassen bemaling	47
6.5	Monitoring	48
6.6	Conclusie en aanbeveling	49
7	Conclusie	51
8	Referenties	53
	Bijlage I Geohydrologische achtergrond informatie	54
	Bijlage II Aanvullende Modelresultaten	83



1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier realiseert als onderdeel van de versterking van de Waddenzeedijk op Texel ter plaatste van sectie 9 de Prins Hendrikzanddijk. De Prins Hendrikzanddijk is een integrale oplossing die de doelstelling voor hoogwaterveiligheid combineert met natuurontwikkeling.

1.2 Aanleiding

Witteveen+Bos heeft een verkenning uitgevoerd naar het hydrologische effect van de Prins Hendrikzanddijk (Witteveen+Bos 2013). In dit onderzoek zijn de permanente effecten van de ingreep op de grondwaterstand stationair berekend met een regionaal model. Het hoogheemraadschap wil meer inzicht in de effecten op de grondwaterstand, waterkwaliteit en afgeleide effecten in zowel de permanente als de aanlegfase.

1.3 Doel

Het doel van dit onderzoek is om een nadere berekening te maken van de hydrologische en afgeleide effecten van de Prins Hendrikzanddijk. Dit omvat zowel de waterkwantiteit als -kwaliteit, daarbij wordt zowel de permanente als de aanlegfase beschouwd.

1.4 Leeswijzer

De gebruikte randvoorwaarden en uitgangspunten zijn in hoofdstuk 2 opgenomen. Hoofdstuk 3 bevat het grondwatermodel. De referentie situatie is in hoofdstuk 4 opgenomen. Hoofdstuk 5 beschrijft de permanente situatie. Hoofdstuk 6 omvat de effecten in de aanlegfase. Hoofdstuk 7 geeft de conclusie.



2 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Dit hoofdstuk geeft de randvoorwaarden en uitgangspunten weer.

2.1 Locatie

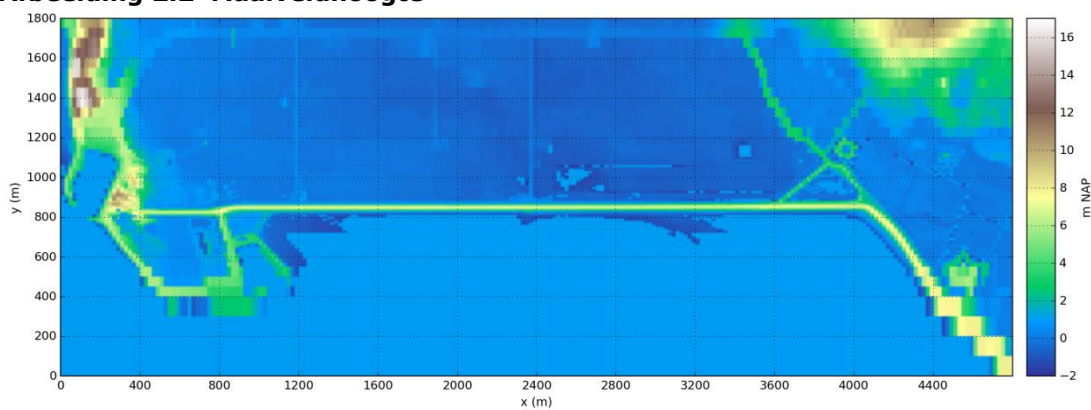
Afbeelding 2.1 geeft de locatie van de Prins Hendrikzanddijk weer op een satelliet foto. In het noorden is het beschermd natuurmonument Ceres weergegeven met een groene arcering.

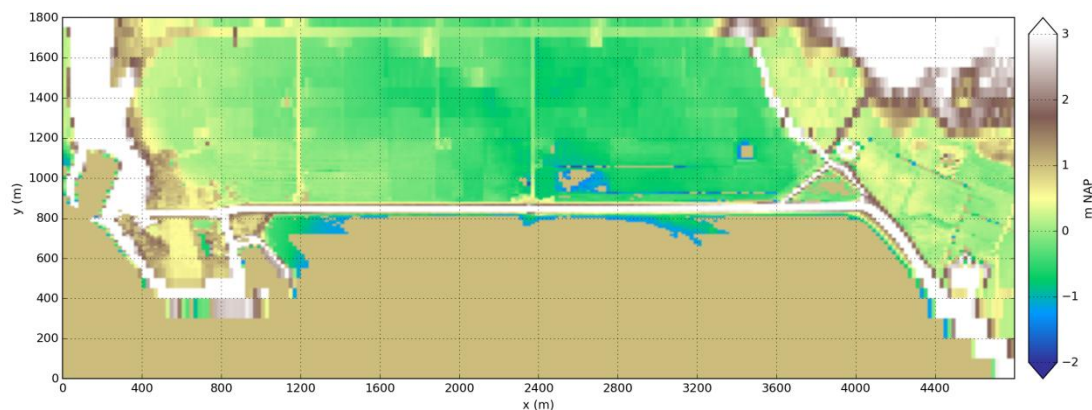
Afbeelding 2.1 Locatie op satelliet foto



De maaiveldhoogte in de huidige situatie is weergegeven in afbeelding 2.2.

Afbeelding 2.2 Maaiveldhoogte





2.2 Bodemopbouw

Voor de analyse van de bodemopbouw zijn onderstaande gegevens gebruikt, de bronnen zijn gerangschikt in volgorde van belang, namelijk:

- lokaal uitgevoerde boringen en sonderingen (Wiertsema en Partners 2015a en 2015b, zie bijlage I);
- geotechnische lengteprofielen (Geodelft 2001);
- sonderingen en boringen uit Dinoloket (TNO 2015);
- regionaal grondwatermodel Texel (Witteveen+Bos 2011), zie bijlage 0;
- Regis 2.1 (TNO 2015).

De focus bij de analyse van de bodemopbouw ligt op de opbouw binnen de deklaag (tussen maaiveld en circa NAP -17 m), omdat dat maatgevend is voor de effecten van de zanddijk. Deze laag is nader in kaart gebracht door het uitgevoerde grondonderzoek. Tabel 2.1 geeft een schematisch overzicht van de bodemopbouw.

Tabel 2.1 Schematische bodemopbouw

van (m NAP)	tot (m NAP)	geohydrologie	lithologie	k_h (m/dag)	k_v (m/dag) of c (dagen)
-1	-2	deklaag	klei		$c = 1.000$
-2	-7	deklaag	zand, matig fijn en siltig	10	$k_v = 2,5$
-7	-8	deklaag	klei		$c = 1.000$
-8	-15	1 ^e WVP, deel A	zand, matig fijn tot matig grof op sommige plekken met veel dunne kleilaagjes	10	$k_v = 3-4$
-15	-17	scheidende laag	klei		$c = 2.000$
-17	-25	1 ^e WVP, deel B	zand, matig fijn tot grof	30	$k_v = 5$
-25	-32	1 ^e WVP, deel B	matig fijn zand, zwak slibhoudend	3.0	$k_v = 0.8$
-32	-42	1 ^e WVP, deel B	matig fijn tot matig grof zand	16.5	$k_v = 4$
-42	-52	1 ^e WVP, deel B	matig grof zand	30.0	$k_v = 8$
-52	-62	1 ^e WVP, deel B	matig grof zand	30.0	$k_v = 8$
-62	-72	geohydrologische basis	klei	n.v.t.	n.v.t.



In de eerdere studie (Witteveen+Bos 2013, zie bijlage I, lokaal grondonderzoek) was het merendeel van de verticale weerstand van de deklaag tussen NAP - 12 m en NAP - 22 m toegekend. Op basis van het uitgevoerde grondonderzoek is deze weerstand in het huidige project nader gespecificeerd binnen de deklaag, namelijk in lagen tussen NAP - 1 en - 2 m; tussen NAP - 7 m en - 8 m en tussen NAP - 15 en - 17 m. De totale verticale weerstand is gelijk. Tussen de kleilagen liggen watervoerende tussenlagen.

Onder de deklaag ligt het 1^e watervoerende pakket. Daarin is tussen circa NAP - 15 m en NAP - 17 m een scheidende laag aangetroffen. Tussen NAP - 25 m en NAP - 32 m worden minder doorlatend zand aangetroffen met een bijmenging van slib. Deze laag is niet als scheidende laag geclassificeerd, maar wordt wel met een lagere doorlaatfactor gemodelleerd.

De geohydrologische basis voor deze studie ligt op NAP - 62 m, omdat de kleilaag tussen NAP - 62 m en NAP - 72 m een dusdanige weerstand heeft dat de aanleg van de zanddijk geen effect heeft onder deze laag.

2.3 Oppervlaktewater

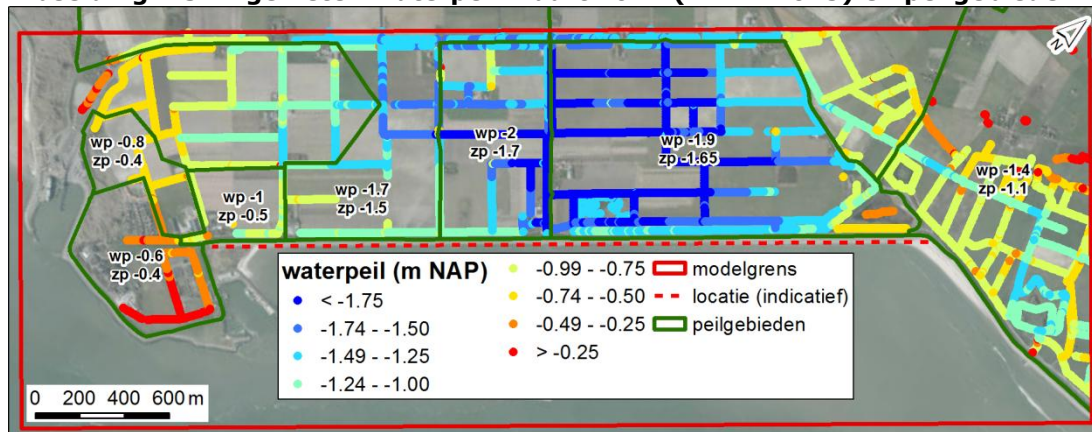
Het binnen- en buitendijkse oppervlaktewatersysteem is apart beschreven.

2.3.1 Binnendijks

Het binnendijkse oppervlaktewatersysteem is peil gereguleerd. De peilen liggen beneden het gemiddelde zeeniveau. Binnen de peilvakken liggen verschillende stuwen waarmee lokaal het peil wordt opgezet om zoetwaterlenzen in de percelen te creëren. Het waterpeil is overgenomen uit een bestand van het hoogheemraadschap (2015). Dit bestand is door het hoogheemraadschap samengesteld via een analyse van het AHN2 bestand (ingevlogen in maart 2011). De afgeleide waterpeilen zijn in afbeelding 2.3 weergegeven. Dit afgeleide peil is gehanteerd als waterpeil voor het grondwatermodel, omdat dit:

- een vlakdekkend overzicht geeft van het waterpeil inclusief de lokale stuwen;
- naar verwachting representatief is voor een gemiddelde situatie.

Afbeelding 2.3 Ingemeten waterpeil maart 2011 (HHNK 2015) en peilgebieden





Voor de beoordeling van de waterkwaliteit is de indeling van het hoogheemraadschap aangehouden. Deze is in tabel 2.2 opgenomen.

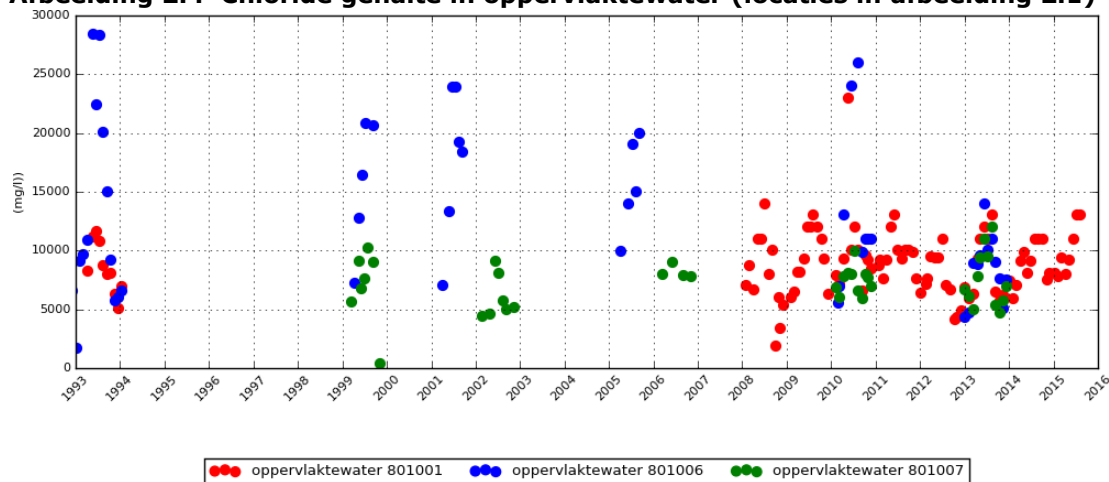
Tabel 2.2 Classificatie chloride gehalte

classificatie	chloride (mg/l)
zeer zoet	< 100
zoet	< 250
licht brak	250- 2.000
brak	2.000 - 5.000
zeer brak	5.000 - 10.000
zout	10.000 - 18.000
zeer zout	> 18.000

De waterkwaliteit in het oppervlaktewater is waargenomen op 3 locaties, zie afbeelding 2.1.

Afbeelding 2.4 geeft de waarnemingen sinds 1993 weer. De waarnemingen zijn meestal zeer brak. Incidenteel wordt licht brak of zout tot zeer zout water waargenomen. De zoutconcentraties zijn het laagst in de winter, en het hoogst in de zomer. In de zomer is de concentratie hoger vanwege de verdamping en lagere hoeveelheid neerslag. In de winter is minder verdamping en meer neerslag waardoor dan de chloride concentratie lager is.

Afbeelding 2.4 Chloride gehalte in oppervlaktewater (locaties in afbeelding 2.1)



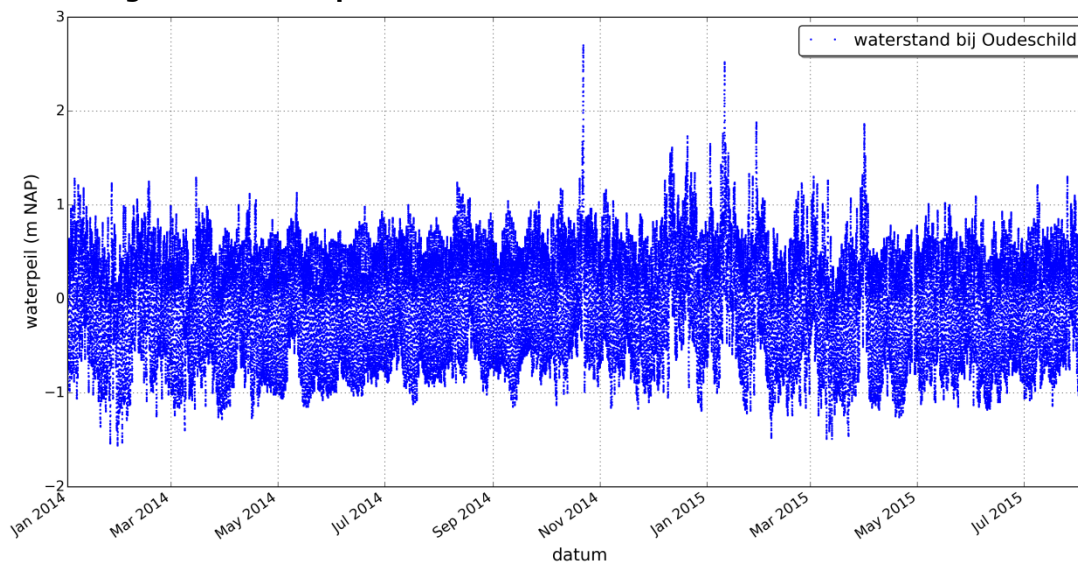
2.3.2 Waddenzee

Afbeelding 2.5 geeft het waterpeil in de Waddenzee weer sinds 1 april 2014. De grafiek laat zien dat tijdens de meetperiode voor het grondwater er geen extreme waterstanden zijn voorgekomen. De gemiddelde waterstand is NAP - 0,08 m. Voor het hoog en laag water is een stand van respectievelijk NAP + 0,8 m en - 0,8 m aangehouden.

De zeespiegelstijging wordt in de studie meegenomen via de waterbouwkundige randvoorwaarden, namelijk een stijging van 0,30 m per 50 jaar (paragraaf 2.3.1, Witteveen+Bos 2014). Tussen 2015 en 2025 stijgt het gemiddelde peil in de Waddenzee met 0,08 m van NAP -0,08 m naar NAP - 0,00 m. In 2085 ligt het gemiddelde Waddenzeepeil 0,6 m hoger, op NAP + 0,52 m



Afbeelding 2.5 Peilverloop Waddenzee



2.4 Grondwaterstand en stijghoogte

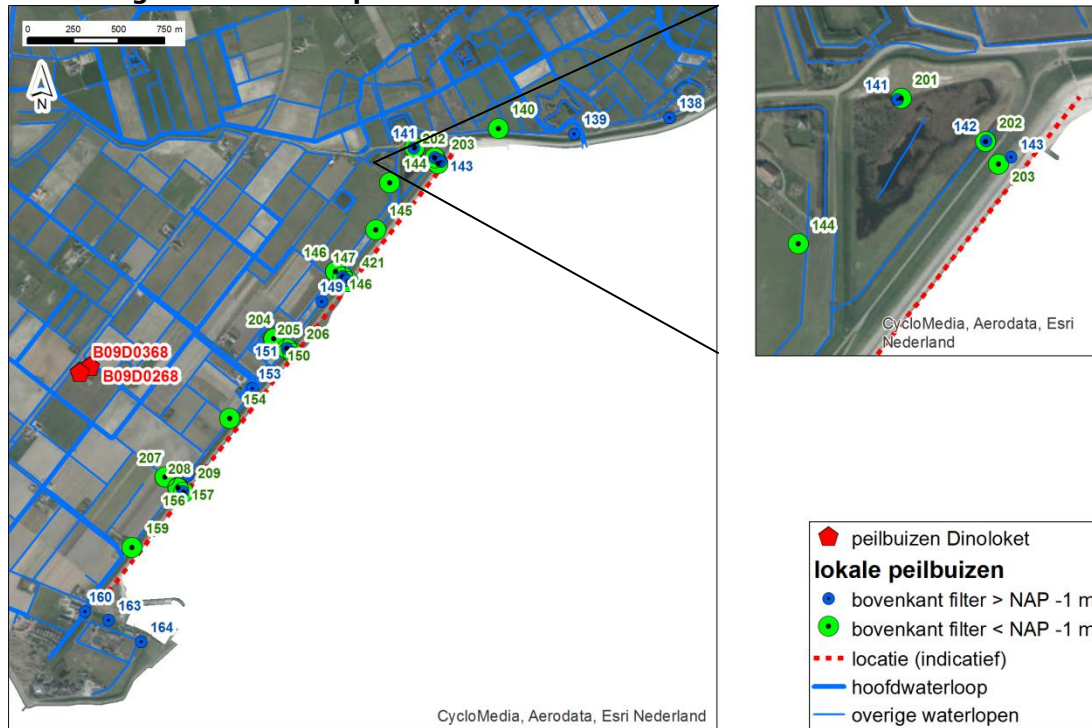
In de dijk en in de polder zijn peilbuizen geplaatst (Wiertsema&Partners 2015a). Vanaf 1 juni 2015 wordt in deze peilbuizen de grondwaterstand automatisch geregistreerd met drukopnemers. Op circa 1 km vanaf de Waddenzee staan enkele peilbuizen waarvan de waarnemingen in Dinoloket zijn opgenomen (TNO 2015). Afbeelding 2.9 geeft het meetnet weer.

De meetreeksen in de peilbuizen zijn kort geanalyseerd om de geohydrologische kenmerken van het gebied te begrijpen. Deze kennis wordt gebruikt in de opzet van het lokale grondwatermodel. Aandachtspunten daarbij zijn:

- de lokale peilbuizen zijn sinds 1 juni bemeten, er waren bij aanvang van deze studie dus maar 3 maanden aan meetdata beschikbaar, waarvan juli droger was dan normaal (paragraaf 2.6). Sindsdien zijn de peilbuisgegevens nog eens geanalyseerd (op 24 augustus 2016). Op basis van die analyse is geconstateerd, dat de gemiddelde grondwaterstanden en stijghoogtes over het algemeen met minder dan 0,1 m wijzigen als de hele reeks wordt beschouwd. De figuren in de bijlage zijn dan ook niet geüpdate met de meest recente gegevens;
- de waarnemingen zijn niet nog gevalideerd. Uit een vergelijking met de handpeiling blijkt dat geen noemenswaardige verschillen zijn tussen de automatische registratie en de handmeting, behalve bij PB140 (zie bijlage I, tabel I.8). De automatische metingen zijn niet gecorrigeerd voor het chloridegehalte van het diepere grondwater. Gezien de goede overeenkomst tussen de ongevalideerde en gevalideerde data lijkt dit geen al te grote fout te geven;
- 23 van de 36 peilbuizen staan op minder dan 10 m afstand van het binnendijkse oppervlaktewater (zie bijlage I, tabel I.8). De waargenomen grondwaterstand kan sterk door het oppervlaktewater worden beïnvloed.



Afbeelding 2.6 Overzicht peilbuizen

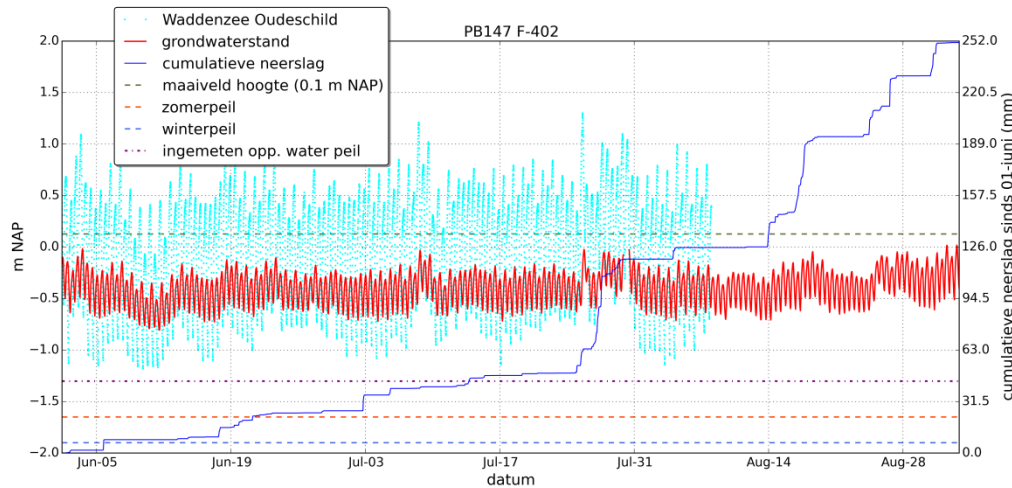


In bijlage I zijn grafieken opgenomen van alle peilbuizen die automatisch worden bemeaten. Een voorbeeld van de grafiek is in afbeelding 2.7 weergegeven. Elke grafiek geeft het volgende weer:

- de cyaan kleurige lijn geeft de waargenomen waterstand op de Waddenzee weer te Oudeschild (Waterbase 2015). Deze data is tot begin augustus beschikbaar, zie paragraaf 2.3.2;
- rode doorgetrokken lijn: de gemeten grondwaterstand per uur;
- de blauwe doorgetrokken lijn: de uurlijkse cumulatieve neerslag bij het weerstation De Kooy (KNMI 2015) sinds 1 juni 2015. Een stijgende lijn geeft aan dat er neerslag valt, een horizontale lijn geeft aan dat het droog is;
- de groene stippellijn geeft het maaiveld niveau weer, bij peilbuizen in de dijk ligt dit niveau buiten de grafiek, de waarde is in de legenda opgenomen;
- de rode en blauwe stippellijn geven respectievelijk het zomer en winterstreefpeil weer. Peilbuizen in de dijk staan geografisch buiten de peilvakken en hebben geen peil;
- het praktijkpeil kan van het zomer en winterstreefpeil afwijken (zie paragraaf 2.3.1). Daarom is met de paarse streep-stippellijn het afgeleide oppervlaktewaterpeil in de meest nabijgelegen watergang weergegeven.



Afbeelding 2.7 Voorbeeld meetreeks grondwaterstand peilbuis PB147 F-402, waterstand Waddenzee, cumulatieve neerslag, oppervlaktewaterpeil, streefpeilen en maaiveld

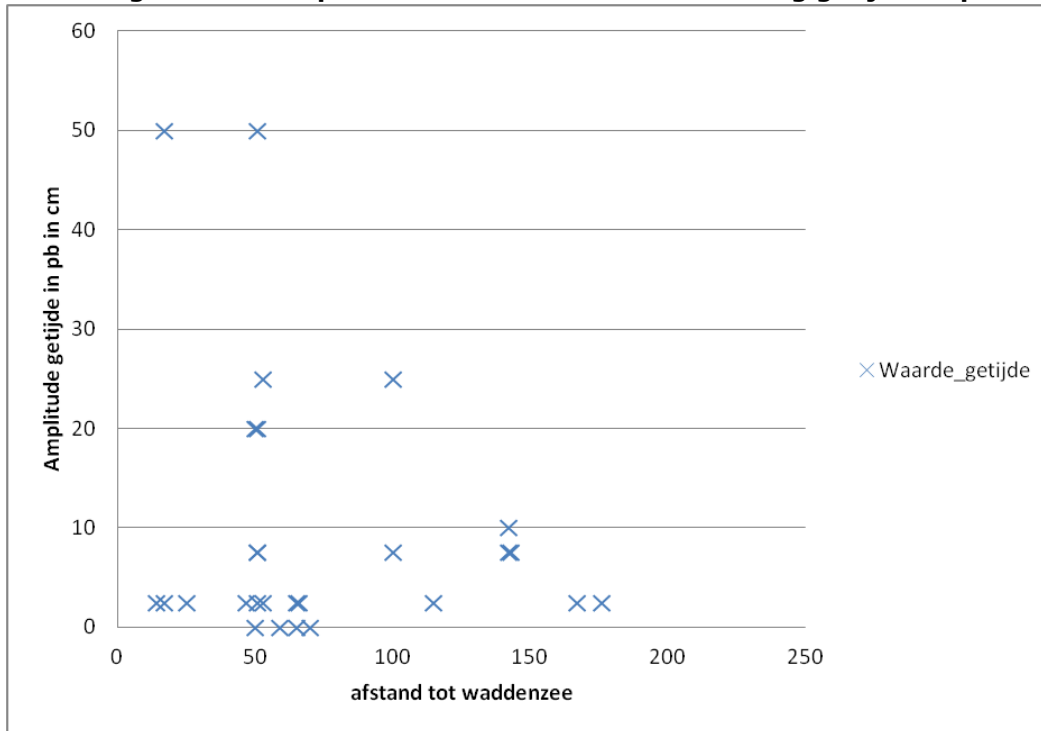


De belangrijkste uitkomsten van de analyse zijn:

- de gemeten grondwaterstand varieert tussen circa NAP 0 m en - 1,5 m, dus beneden het gemiddelde peil in de Waddenzee. De waarnemingen liggen boven of op het zomerpeil (NAP - 1,7 m tot NAP - 1,1 m). Dit is mogelijk te verklaren door de kweldruk vanuit de Waddenzee, de lokale stuwen op de percelen en de slecht doorlatende deklaag;
- nabij het beschermd natuurmonument Ceres ligt stijghoogte in de diepere filters (PB201 en PB202 met filterdieptes tussen de NAP -7,6 tot NAP -9,5 m) ongeveer gelijk of een lager dan in de freatische laag. Daar is dus sprake van een infiltratie situatie. Het peil in de freatische filters ligt beneden het peil van de Waddenzee. Het freatische grondwater kan dus gevoed worden door de Waddenzee, maar kan ook licht infiltreren naar het watervoerende pakket;
- in het zuidelijk deel (PB160-PB164) zijn hogere grondwaterstanden gemeten van rond NAP 0 m en bij natte periodes zelfs hoger. Dit kan verklaard worden door het feit dat het maaiveld hoger ligt;
- de reactie van de grondwaterstand op neerslag varieert sterk tussen de peilbuizen. Sommige reageren heel duidelijk op de neerslag terwijl anderen een zeer beperkte of zelfs geen reactie vertonen. Dit heeft te maken met lokale omstandigheden zoals slecht doorlatende lagen en nabijheid van oppervlaktewater;
- in veel van de beschouwde peilbuizen is het getijde op de Waddenzee duidelijk waarneembaar, zie afbeelding 2.8. Globaal is een relatie tussen de amplitude van het gemeten getijde in de grondwaterstand en de afstand tot de Waddenzee. Deze neemt af met toenemende afstand vanaf de zee. Het is duidelijk te zien dat er ook veel uitzonderingen zijn waarbij het getijde niet zichtbaar is in de gemeten grondwaterstand. Dit kan verschillende oorzaken hebben, zoals de lokale bodemopbouw bijvoorbeeld kleilagen die het getijde effect uitdempen, of peilbuizen die vlakbij oppervlaktewater staan. Peilbuizen met een dieper gelegen filter tonen over het algemeen een sterkere reactie op het getijde dan de ondiepe peilbuizen. Het getijde werkt verder door in de eerste zandlaag vanwege de hogere doorlatendheid. De filters van de ondiepere peilbuizen staan in de deklaag met een lagere doorlatendheid waardoor de invloed van het getijde verder uitdempt.



Afbeelding 2.8 Afstand peilbuis tot Waddenzee en schatting getijde amplitude



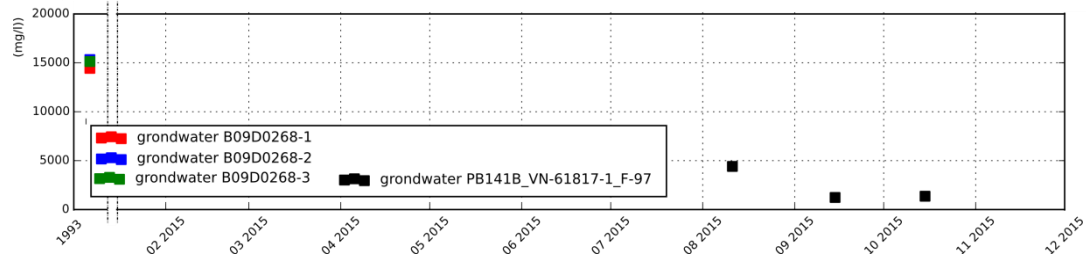
2.5 Grondwaterkwaliteit

Waarnemingen van de chloride concentratie zijn beschikbaar via Dinoloket en in de lokale peilbuizen, deze zijn in afbeelding 2.9 weergegeven:

- in Dinoloket is voor peilbuis B09D0268 de chloride concentratie in alle 3 de filters geanalyseerd op 7 december 2013 (TNO 2015). De filters staan tussen de 9 en 30 m - mv, de chloride concentratie ligt rond de 15.000 mg/l. Het water is zout;
- in 1 lokale peilbuis binnen het modelgebied is de chloride concentratie afgeleid van EC-waarnemingen (Wiertsema en Partners 2015c), namelijk in peilbuis 141 in beschermd natuurmonument Ceres. Het midden van het filter ligt circa 1 m - mv. De waargenomen waterkwaliteit was brak in augustus en was licht brak in september en oktober 2015. In november 2015 was de waterkwaliteit weer brak, en vervolgens licht brak tot mei 2016. In juni 2016 is de waterkwaliteit zelfs zoet.



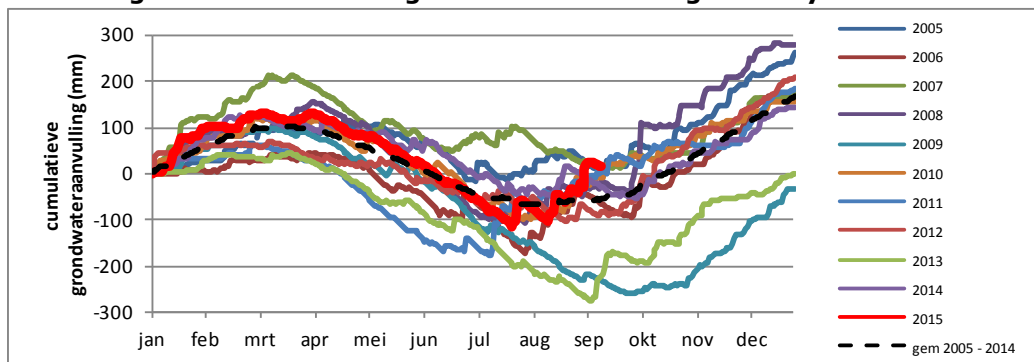
Abbeelding 2.9 Waargenomen chloride concentraties in grondwater



2.6 Grondwateraanvulling

In de modelstudie wordt de grondwateraanvulling berekend via de waargenomen neerslag en potentiële Makkink referentie gewasverdamming in De Kooy (KNMI 2015) over de periode 2005 - 2014. De rode lijn laat zien dat juli 2015 droger was dan het gemiddelde over 2005 - 2014. Via gewasfactoren wordt de referentie gewasverdamming omgerekend voor het huidige landgebruik.

Abbeelding 2.10 Cumulatieve grondwateraanvulling De Kooy 2005 - 2015



De klimaatverandering wordt in het model opgenomen via het G_H-klimaatscenario KNMI'14 (KNMI 2014). Dit is een gematigd scenario voor temperatuursstijging gecombineerd met een grote invloed van het luchtstromingspatroon. In het scenario wordt uitgegaan van een toename van de neerslag van 5 % in 2085 en een toename van de potentiële verdamping van 5,5 %. De stijging wordt lineair verondersteld.

2.7 Landbouwkundig gebruik

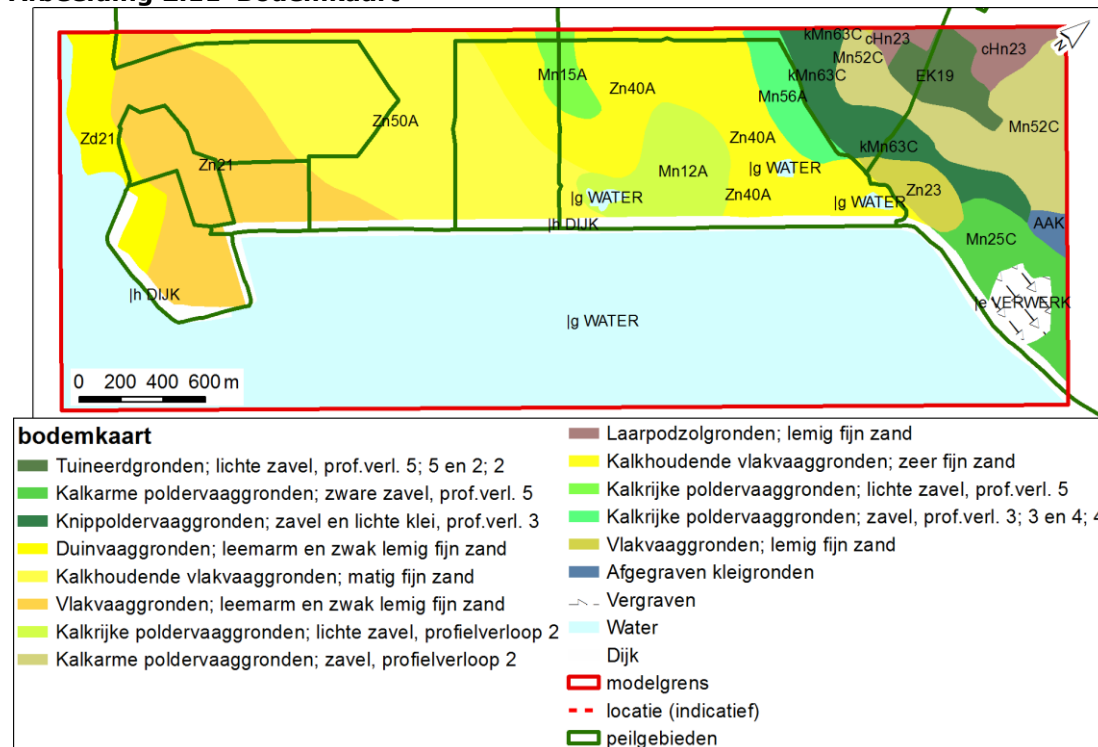
De huidige omstandigheden voor de landbouw worden inzichtelijk gemaakt via Waternood. Dit is een gangbare methode om de doelrealisatie voor de landbouw te berekenen. Hiervoor is het bodemtype, landgebruik en huidige grondwaterstand vereist. Aanvullend wordt een beschouwing gemaakt over de waterkwaliteit (chloride concentratie) en het landbouwkundig gebruik.



2.7.1 Bodemtype

De bodemtypen zijn in kaart gebracht via de bodemkaart van Alterra. De meest voorkomende typen zijn Zn40a, Zn50a en Mn12A, zie afbeelding 2.11.

Afbeelding 2.11 Bodemkaart



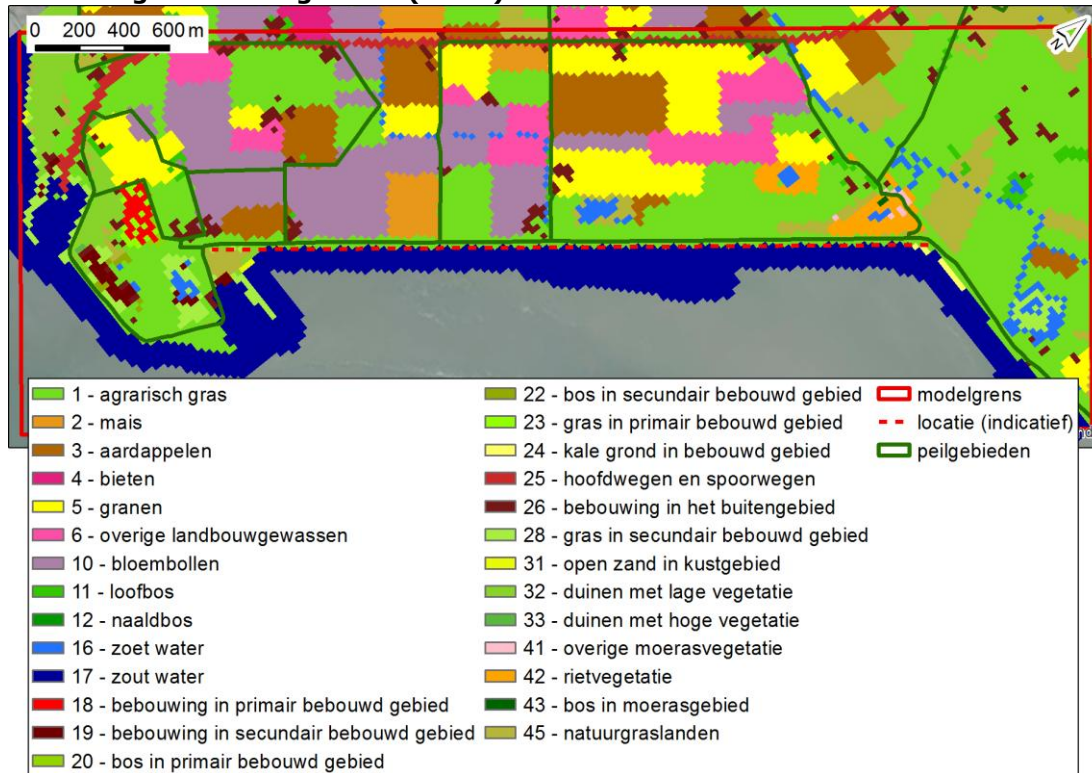
2.7.2 Landgebruik

Het LGN6 is gebruikt als basis voor het landgebruik.

Afbeelding 2.12 geeft het landgebruik in het modelgebied weer. Gras en bloembollen zijn de meest voorkomende typen landbouwkundig gebruik.



Afbeelding 2.12 Landgebruik (LGN6)



2.7.3 Grondwaterstand

De Waterlood berekening vereist de GHG¹ en GLG². Langjarige waarnemingen om een GxG uit af te leiden ontbreken direct achter de dijk in de Prins Hendrikpolder. Daarom is de huidige situatie voor landbouwkundig gebruik inzichtelijk gemaakt via:

- de vlakdekkende GHG en GLG via het grondwaterregime op basis van karteerbare kenmerken (Alterra 2011). Dit wordt als meest betrouwbare vlakdekkende beeld gezien door het waterschap;
- de gekarteerde GHG en GLG tijdens het veldwerk (Wiertsema en Partners 2015). Uit de kartering worden alleen de peilbuizen weergegeven die in het landbouwgebied liggen, dus niet de peilbuizen in de dijk zelf. Deze laatste peilbuizen geven namelijk niet de landbouwkundige situatie weer.

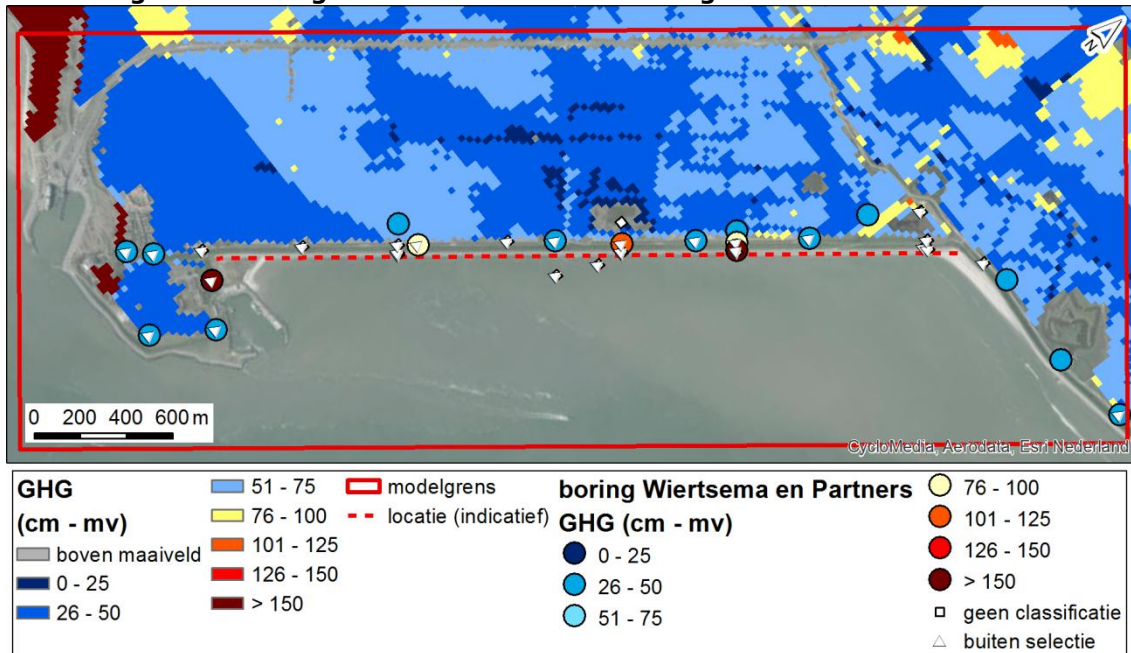
Beide bronnen zijn weergegeven. Afbeelding 2.13 geeft de GHG situatie weer. De gekarteerde GHG ligt tussen de 51 en 75 cm - mv. De GHG via het grondwaterregime heeft eenzelfde bandbreedte, namelijk tussen 25 en 75 cm - mv.

¹ GHG: Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand.

² GLG: Gemiddeld Laagste Grondwaterstand.

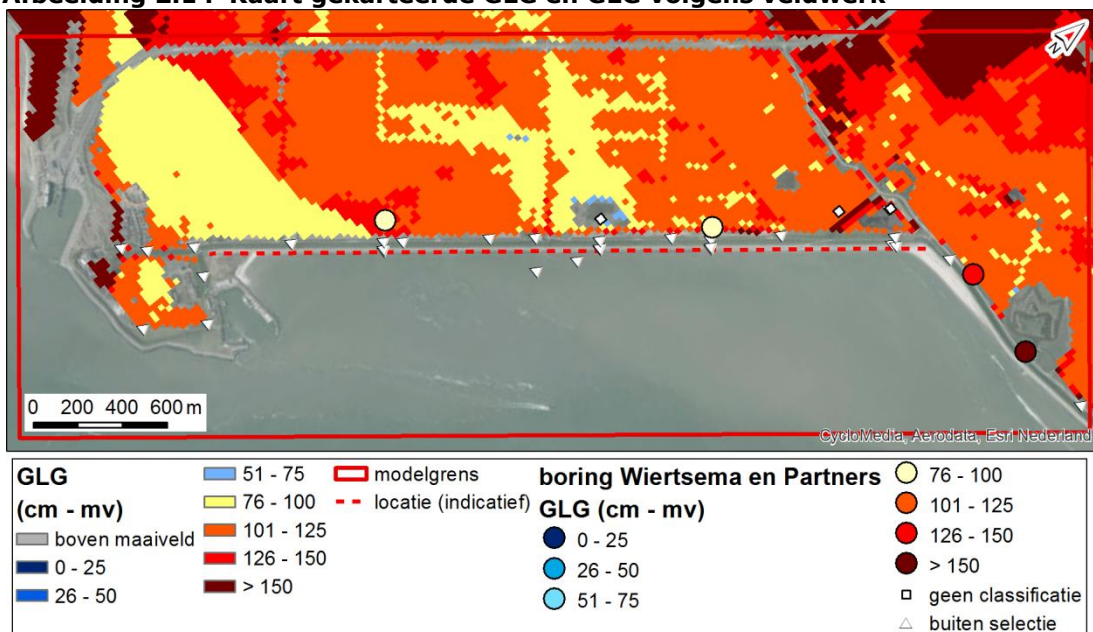


Afbeelding 2.13 Kaart gekarteerde GHG en GHG volgens veldwerk



Afbeelding 2.14 geeft de GLG-situatie weer. De gekarteerde GLG ligt de 76 en 100 cm - mv of dieper. De GLG via het grondwaterregime sluit daar bij aan met waarden tussen de 75 en 150 cm onder maaiveld. Dit betekent een jaarlijkse fluctuatie van circa 0,5 tot 1,0 m. Op basis van de gekarteerde GHG/GLG (Wiertsema & Partners) wordt de situatie iets natter ingeschat dan op basis van het grondwaterregime.

Afbeelding 2.14 Kaart gekarteerde GLG en GLG volgens veldwerk





2.7.4 Doelrealisatie landbouw

Op basis van de gegevens uit de vorige paragrafen is de huidige doelrealisatie voor de landbouw berekend voor de bodemtypen Zn40A, Zn50A en U09Tnr003, met gras en bloembollen voor de voorkomende grondwaterstanden. Tabel 2.3 geeft de berekende nat en droogte schade weer via Waternood, dit instrumentarium omvat alleen de waterkwantiteit. De tabel laat zien dat bloembollen gevoeliger zijn voor diepe grondwaterstanden dan gras.

Tabel 2.3 Huidige doelrealisatie landbouw (waterkwantiteit via Waternood)

landgebruik	GHG (cm - mv)	GLG (cm - mv)	Zn40A		Zn50A		Mn12A	
			natschade (%)	droogte schade (%)	natschade (%)	droogte schade (%)	natschade (%)	droogte schade (%)
gras		75		2		2		0
bloembollen		75		3		3		0
gras	60	110	0	11	0	11	0	0
bloembollen	60	110	4	16	4	16	29	0
gras	100	150	0	27	0	27	0	4
bloembollen	100	150	0	36	0	36	2	8

Tabel 2.4 geeft de verandering van de doelrealisatie weer voor bodemtype Zn50A bij een vernatting ten opzichte van de middelste klasse uit tabel 2.3. Vernatting leidt voor gras tot maximale toename van 2 procentpunt natschade. De droogteschade neemt maximaal met 6 procentpunten af (halvering). Bloembollen zijn gevoeliger, hier neemt de natschade met maximaal 16 procentpunten toe (factor 5), de natschade neemt maximaal met 9 procentpunten af (halvering).

Tabel 2.4 Effect vernatting voor Zn50A (waterkwantiteit via Waternood)

land- gebruik	GHG (cm - mv)	GLG (cm - mv)	Zn50A GHG / GLG volgens linker kolom		Zn50A 10 cm vernatting		Zn50A 20 cm vernatting	
			natschade (%)	droogte schade (%)	natschade (%)	droogte schade (%)	natschade (%)	droogte schade (%)
gras	60	110	0	11	0 (0)	7 (-4)	2 (+2)	5 (-6)
bloem- bollen	60	110	4	16	10 (+6)	11 (-5)	20 (+16)	7 (-9)

De waterkwaliteit valt buiten de berekende doelrealisatie in tabel 2.3. Volgens het Cultuur technisch vademecum is de toelaatbare chloride concentratie voor grasland 600 mg/l en voor bloembollen 300 mg/l. Waarnemingen van de freatische chloride concentratie ontbreken. Volgens het regionale grondwatermodel worden deze waarden overschreden (paragraaf 3.4). Mogelijk vormen zich op de percelen zoetwater lenzen, waardoor lokaal zoet grondwater voorhanden is.



2.8 Beschermd natuurmonument Ceres

Het beschermd natuurmonument Ceres is ontstaan door het rechte trekken van de dijk in de jaren 1961 tot 1963. In de jaren na de inpoldering overheersten brakke natuurwaarden, daarna is het gebied geleidelijk zoeter geworden. Het gebied is momenteel in eigendom van Staatsbosbeheer. Op de hogere delen in het gebied is sprake van soorten die zoete omstandigheden verlangen, richting de lager gelegen watergang is sprake van een overgang naar brakke omstandigheden (Witteveen+Bos 2015).

In het gebied zijn waarnemingen van de grondwaterstand en stijghoogte beschikbaar. In paragraaf 2.4 is opgenomen dat de grondwaterstand onder het gemiddelde peil van de Waddenzee ligt, maar hoger is dan in de Prins Hendrikpolder. Dit betekent dat het freatische grondwater gevoed kan worden door de Waddenzee (naast het neerslagoverschot), maar kan ook licht infiltreren naar het watervoerende pakket.

In peilbuis 141 (freatisch, midden filter 1 m - mv) is de grondwaterkwaliteit eenmalig waargenomen in augustus 2015. Het grondwater is zout, circa 10.000 mg/l. Dit duidt op ofwel infiltratie vanuit de Waddenzee, of een overblijfsel van de situatie voor de inpoldering van Ceres.

In het gebied zijn beschermde planten en Rode lijstsoorten aangetroffen. Deze soorten vereisen zoet water, omdat de zout resistentie slechts enkele honderden mg/l is (mondelinge communicatie ecoloog). Blijkbaar is een zoet water lens aanwezig, mogelijk door een combinatie van het neerslagoverschot en de lagere kweldruk dan in de Prins Hendrikpolder.

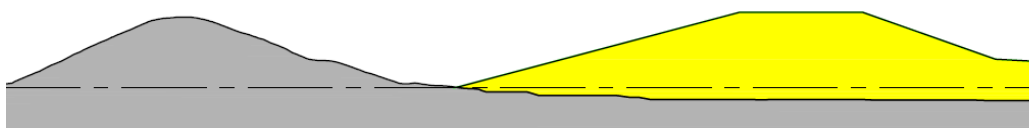
2.9 Ontwerp Prins Hendrikzanddijk

Voor de modelberekeningen zijn twee scenario's bekeken, te weten:

- Het veiligheidsduin wordt voor de huidige dijk aangelegd, het "duin voor dijk" ontwerp. Zie hiervoor afbeelding 2.15.
- Het veiligheidsduin wordt tegen de buitenberm van de huidige dijk aangelegd, het "duin tegen dijk" ontwerp. Zie hiervoor afbeelding 2.16.

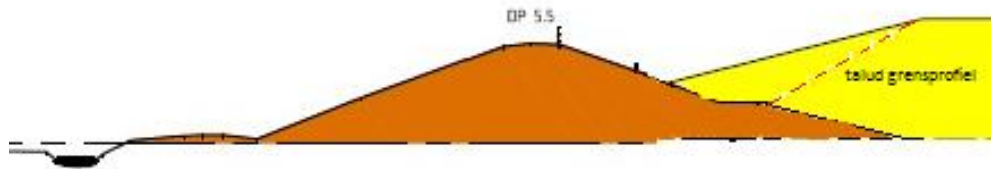
In het model zijn het nieuwe veiligheidsduin en de huidige dijk geschematiseerd. De randvoorwaarde van de Waddenzee is opgelegd ter plaatse waar het veiligheidsduin het niveau van NAP -0,08 m kruist.

Afbeelding 2.15 Doorsnede ontwerp duin voor dijk





Afbeelding 2.16 Doorsnede ontwerp duin tegen dijk





3 Grondwatermodel

3.1 Basismodel

Het grondwatermodel wordt gebaseerd op het gebruikte model voor de klimaatstudie (Witteveen+Bos 2011) en het model dat eerder is gebruikt voor geohydrologische effect berekeningen (Witteveen+Bos 2013). De gebruikte modelcode is SEAWAT, deze code houdt rekening met dichtheidsverschillen tussen zoet en zout water en is daarom geschikt voor deze situatie.

3.2 Te doorlopen stappen

De modellering kent 2 stappen die in subparagrafen zijn toegelicht.

3.2.1 Actualisatie en verbetering huidige situatie

De grondwatermodellering is op twee manieren aangepast:

1. actualisatie op basis van het uitgevoerde grondonderzoek (paragraaf 2.2);
2. verbetering van model schematisatie door het oppervlaktewater in te voeren op de werkelijke locatie, in plaats van de huidige vlakdekkende watergangen (paragraaf 2.3.1). Daarbij is voor de waterlopen een drainageweerstand van 5 dagen gekozen op basis van ervaring;
3. actualisatie begrenzing Waddenzee, waarbij een bodemweerstand van 10 dagen is gekozen op basis van ervaring;
4. aanwezigheid perceelsdrainage conform informatie het hoogheemraadschap met een peil van 0,7 m-mv en een weerstand van 10 dagen. Perceelsdrainage is aangebracht waar landbouw plaatsvindt.

Het aangepaste model wordt stationair doorgerekend voor een gemiddelde situatie. De berekende grondwaterstand wordt indicatief vergeleken met de waarnemingen in de recent geplaatste peilbuizen. De modelprestatie wordt in twee rondes geoptimaliseerd. De uiteindelijke bodemopbouw van het model is weergegeven in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Modellagen en bijbehorende geoptimaliseerde geohydrologische parameters

model- laag	van NAP)	(m tot NAP)	(m materiaal	kh (m/dag)	kv (m/dag)	c (dagen)
1	mv	+1	dijk, zand, fijn tot matig fijn	1	0,25	50
2	+1	0	deklaag, zand, fijn tot matig fijn	2		
	0	-2	klei			2000
3	-2	-7	zand, matig fijn en siltig	10	2,5	
	-7	-8	klei, niet overal aanwezig in het gebied			1000
4	-8	-15	zand, matig fijn tot matig grof op sommige plekken met veel dunne kleilaagjes	15	3,75	
	-15	-17	klei			2000
5	-17	-25	zand, matig fijn tot grof	30	7,5	
6	-25	-32	matig fijn zand, zwak slijbhoudend	3	0,75	
7	-32	-42	matig fijn tot matig grof zand	16,5	4,125	
8	-42	-52	matig grof zand	30	7,5	



model- laag	van NAP)	(m tot NAP)	(m materiaal	kh (m/dag)	kv (m/dag)	c (dagen)
9	-52	-62	matig grof zand	30	7,5	
	-62	-72	geohydrologische basis	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

Het aangepaste model voor de gemiddelde situatie wordt over een langjarige periode tot en met het jaar 2085 doorgerekend om de autonome verandering van de chloride concentratie te berekenen. Uitgangspunt is een gemiddeld niveau voor de Waddenzee en grondwateraanvulling. Daarbij wordt het effect van klimaatverandering op zeespiegelstijging (paragraaf 2.3.2) en grondwateraanvulling (paragraaf 2.6) meegenomen.

Met de chloride verdeling in 2085 jaar wordt de laag water, gemiddelde en hoog water situatie opnieuw stationair doorgerekend. Dat vormt de referentie situatie.

3.2.2 Hydrologisch effect permanente situatie

Beide ontwerpen worden voor een gemiddelde situatie over een langjarige periode van 2015 tot 2085 doorgerekend om de verandering van de chloride concentratie te berekenen. Uitgangspunt daarbij is dat het grondwater in de zanddijk direct na aanleg zout is, omdat het aangebrachte zand een herkomst uit zee heeft.

Met de chloride verdeling in 2085 wordt de laag water, gemiddelde en hoog water situatie opnieuw stationair doorgerekend. Dat is het berekende stationaire effect op de grondwaterstand.

3.2.3 Hydrologisch effect aanlegfase

Het effect van de aanlegfase wordt voor beide ontwerpen berekend voor een gemiddelde situatie wat betreft neerslag en peil in de Waddenzee. De berekening wordt uitgevoerd met MODFLOW, dit betekent dat dichtheidsverschillen door zoet en zout water niet zijn gemodelleerd. Hiervoor is gekozen omdat MODFLOW sneller convergeert en daardoor een kortere doorlooptijd heeft. Het effect op de waterkwaliteit wordt kwalitatief beschreven.

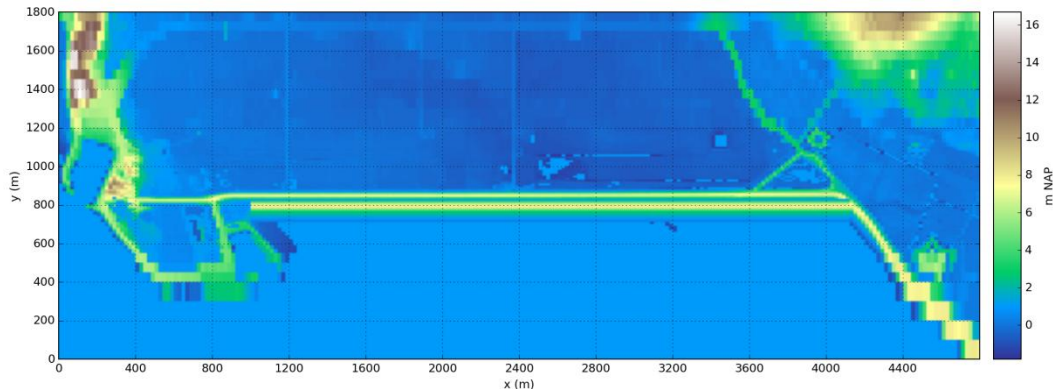
3.2.4 Modellerings veiligheidsduin

Het nieuw aan te leggen veiligheidsduin is ingevoerd door de maaiveldhoogte van het referentiemodel aan te passen langs de bestaande dijk. Het verloop van de maaiveldhoogte is gebaseerd op de doorsnede tekeningen van de twee scenario's (schematisch weergegeven in paragraaf 2.9). In het scenario duin voor dijk is de totale breedte van het veiligheidsduin circa 120 m. In het scenario duin tegen dijk is de totale breedte circa 100 m. De lengte van het veiligheidsduin is circa 3 km. De maaiveldhoogte van het duin voor dijk scenario's is weergegeven in onderstaande afbeeldingen via 1 kaart en 1 doorsnede. Hierin is ook de locatie van het nieuwe veiligheidsduin zichtbaar. De locatie van het veiligheidsduin en de maaiveldhoogte in het scenario duin tegen dijk zijn niet afzonderlijk weergegeven. Het enige verschil is dat het veiligheidsduin ongeveer 20 m is verschoven richting de huidige dijk.

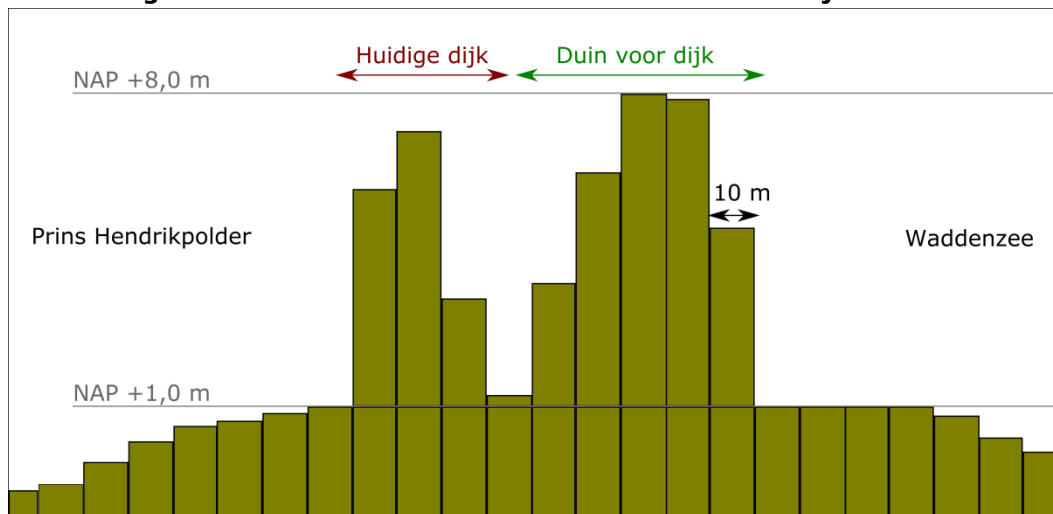


In het model is de freatische laag opgesplitst in 2 modellen (zie tabel 3.1). De bovenste modellaag is alleen actief daar waar de maaiveldhoogte groter is dan NAP +1,0 m. Op het veiligheidsduin is de grondwateraanvulling toegepast op basis van het landtype duinen met lage vegetatie uit het LGN.

Afbeelding 3.1 Maaiveldhoogte in model voor scenario duin voor dijk



Afbeelding 3.2 Doorsnede model voor scenario duin voor dijk



3.3 Model omvang

De vereiste modelomvang is berekend via de spreidingslengte van het zandpakket tussen NAP - 8 m en - 15 m. De spreidingslengte is circa 300 m. De vereiste modelomvang is driemaal de spreidingslengte, dus circa 900 m. De modelomvang is hiervan afgeleid, zodanig dat in alle richtingen rond de ontwikkeling aan de spreidingslengte wordt voldaan. Afbeelding 3.3 geeft dit op kaart weer. Aan de randen zijn de randvoorwaarden uit het regionale model opgelegd.



Afbeelding 3.3 Modelomvang



Om het aantal rekencellen te beperken is het modelgrid parallel langs de dijk (en het veiligheidsduin) gedraaid. Binnen het modelgebied wordt een variabele celgrootte gehanteerd. De minimale celgrootte is $10 \times 20 \text{ m}^2$ (haaks-op-de-dijk x lengte-richting-van-de-dijk). Dit geeft de beste schematisatie van de grondwaterstroming die haaks op de dijk is gericht. De minimale celgrootte is toegepast ter plaatse van de toekomstige veiligheidsduin, de huidige dijk en een zone van circa 200 m in het binnenland. Daarbuiten loopt de cel grootte haaks op de dijk op naar 50 m richting het achterland en 100 m richting de Waddenzee. Door de variabele cel grootte blijft de rekentijd en omvang van het model handelbaar, terwijl nabij de dijk een goede schematisatie van de huidige en toekomstige situatie kan worden gemaakt.

3.4 Model prestatie

De modelprestatie is beoordeeld voor de waterkwantiteit en -kwaliteit.

De modelprestatie voor de waterkwantiteit is via twee stappen beoordeeld:

- de berekende grondwaterstand en stijghoogte voor een gemiddelde situatie vergeleken met de waarnemingen in de lokale peilbuizen (afbeelding 3.4 en afbeelding 3.5). De gemodelleerde en geobserveerde grondwaterstanden en stijghoogte vertonen een goede overeenkomst:
 - tabel 3.2 laat zien dat voor het freatische grondwater het gemiddelde verschil $-0,02 \text{ m}$ bedraagt, en het gemiddelde absolute verschil³ $0,19 \text{ m}$. Bij 19 van de 24 peilbuizen bedraagt het verschil minder dan $0,25 \text{ m}$;
 - tabel 3.2 laat zien dat voor de stijghoogte het gemiddelde verschil $+0,02 \text{ m}$ bedraagt, en het gemiddelde absolute verschil³ $0,12 \text{ m}$. Bij 5 van de 7 peilbuizen bedraagt het verschil minder dan $0,07 \text{ m}$;

³ Per peilbuis is het absolute verschil berekend. De absolute verschillen over alle peilbuizen zijn vervolgens gemiddeld, hierdoor vallen te natte (positief getal) en te droge (negatief getal) niet meer tegen elkaar weg.



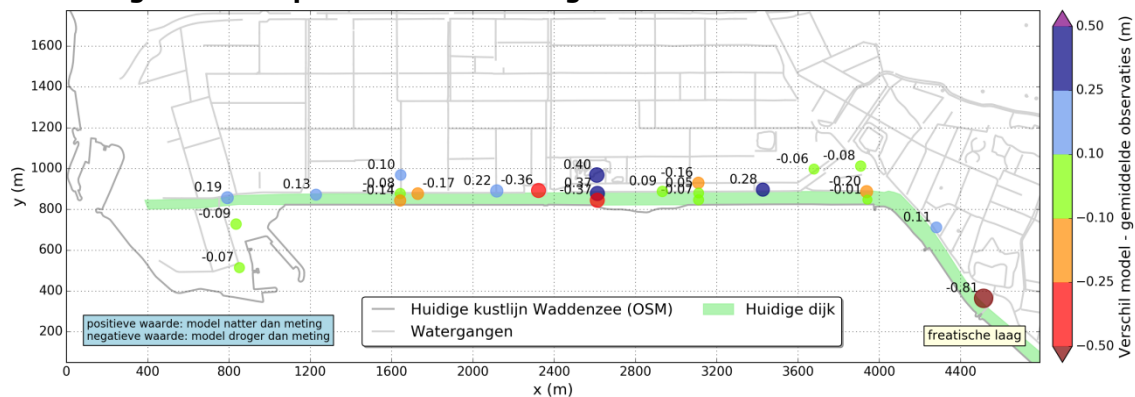
- systematische patronen zijn niet zichtbaar, de verdeling van te natte of te droge locaties is willekeurig verdeeld over het modelgebied;
- de vlakdekkend berekende grondwaterstand is indicatief vergeleken met de gekarteerde GVG⁴ (Alterra 2011), beide datasets hebben dezelfde orde grootte. Daarmee is de berekende situatie vlakdekkend getoetst, en zijn er geen systematische afwijkingen aanwezig.

Op basis van bovenstaande vergelijking is beoordeeld dat het model een goede vereenvoudiging van de werkelijkheid vormt voor de waterkwantiteit en geschikt is voor de verdere analyses naar de verschilleffecten van het veiligheidsduin.

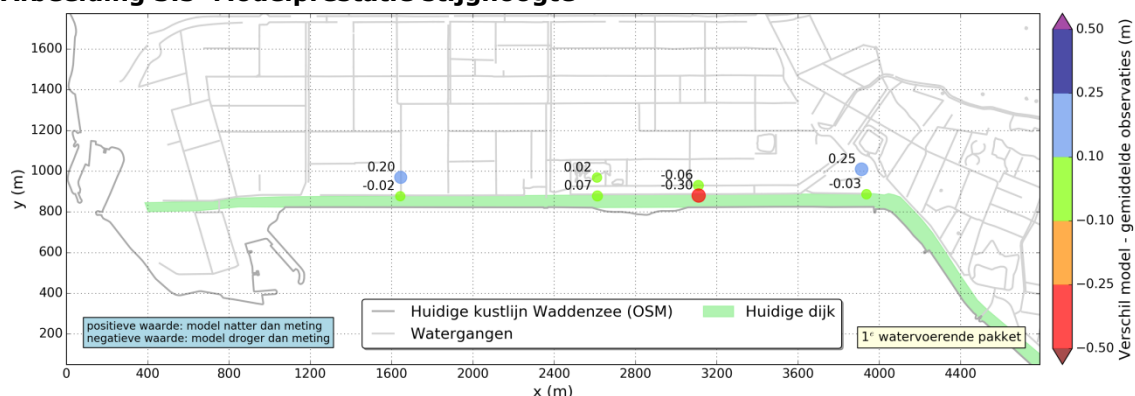
Tabel 3.1 Statistische parameters modelprestatie

	gemiddeld verschil (m)	gemiddeld absoluut verschil (m)
freatische grondwaterstand	-0,02	0,19
stijghoogte	+0,02	0,12

Afbeelding 3.4 Modelprestatie freatische grondwaterstand



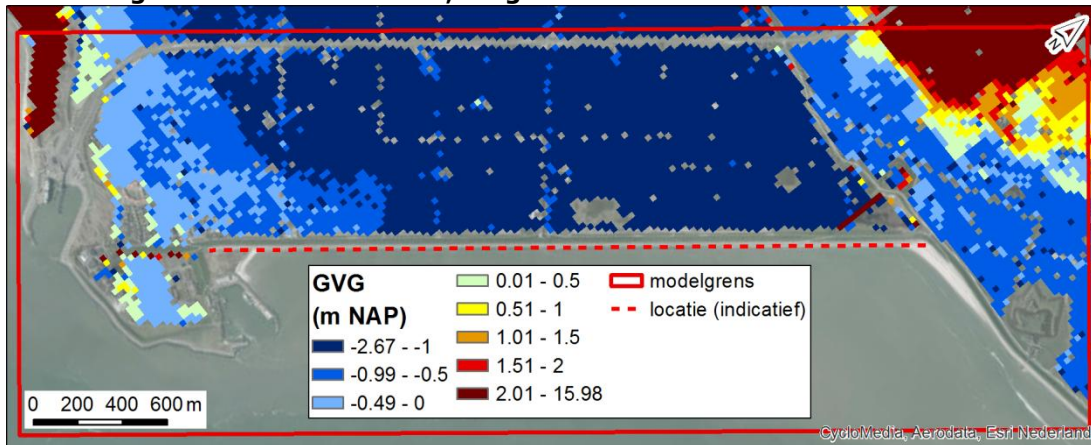
Afbeelding 3.5 Modelprestatie stijghoogte



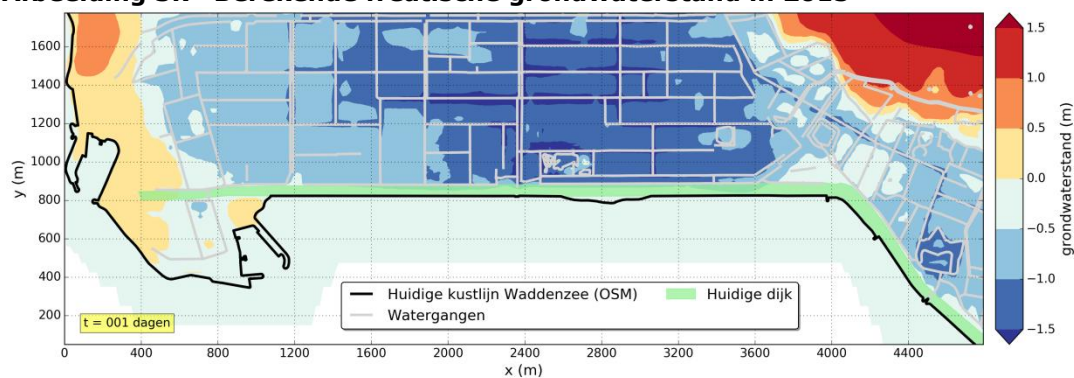
⁴ GVG: Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand.



Afbeelding 3.6 Gekarteerde GVG, omgerekend naar NAP +m



Afbeelding 3.7 Berekende freatische grondwaterstand in 2015



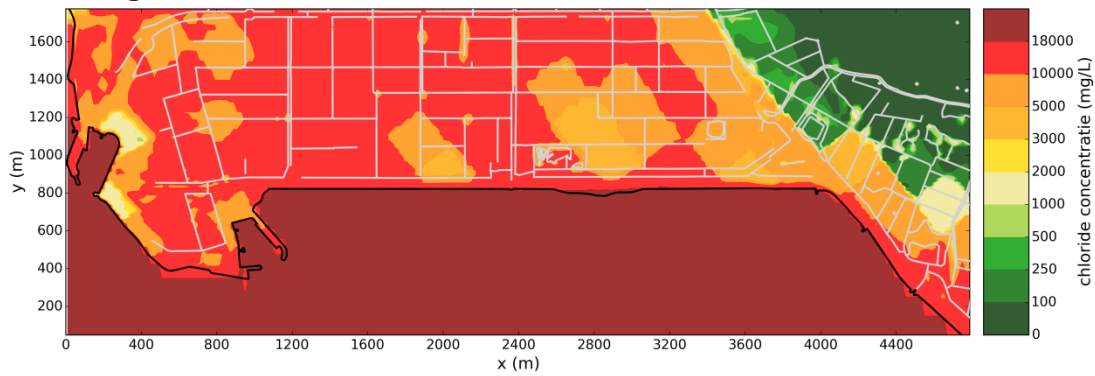
Voor de beoordeling van de modelprestatie op het gebied van waterkwaliteit is in onderstaande afbeelding de startwaarde van de freatische chloride concentratie weergegeven. In de startwaarde voor de chloride concentratie is geen zoetwaterlens opgenomen. Gezien de landbouwfunctie in de Prins Hendrikpolder is het waarschijnlijk dat er in de huidige situatie een (dunne) zoetwaterlens aanwezig is, zeker na de natte wintermaanden. De huidige situatie is gebaseerd op de startwaardes van de chloride concentratie uit het regionale model. Dit is de best beschikbare informatie omdat de beschikbare waarnemingen van de chloride concentratie geen vlakdekkend beeld geven. De beschikbare waarnemingen van Dinoloket (circa 15.000 mg/l in de diepere lagen) en de waarneming in het beschermd natuurmonument Ceres in augustus (circa 5.000 mg/l in het freatische grondwater) komen overeen met de startwaarde. De waarneming in Ceres in september en oktober (circa 1.000 mg/l) liggen onder deze startwaarde. Het dichtheidsverschil tussen de waargenomen chloride concentratie (1.000 mg/l) ten opzichte van de gemodelleerde concentratie (5.000 mg/l) is niet dusdanig groot dat de grondwaterstroming veel zal veranderen.

De geconstateerde verschillen tussen de modellering en de verwachte praktijksituatie zijn geen beperking voor het maken van een verschilberekening van de chloride concentratie, omdat ten eerste de verschilberekening wordt uitgevoerd ten opzichte van een referentiemodel met dezelfde startcondities, waardoor de berekende effecten een indicatie geven van de effecten van het veiligheidsduin. Ten tweede omdat het model een gemiddelde situatie omvat en alleen wordt gebruikt om de verschillen tussen de verschillende scenario's te berekenen voor de waterkwaliteit



van het gebied, en niet voor de bepaling van absolute chloride concentraties. Bij de beoordeling van de effecten wordt daarmee rekening gehouden.

Afbeelding 3.8 Startwaarde chloride in 2015





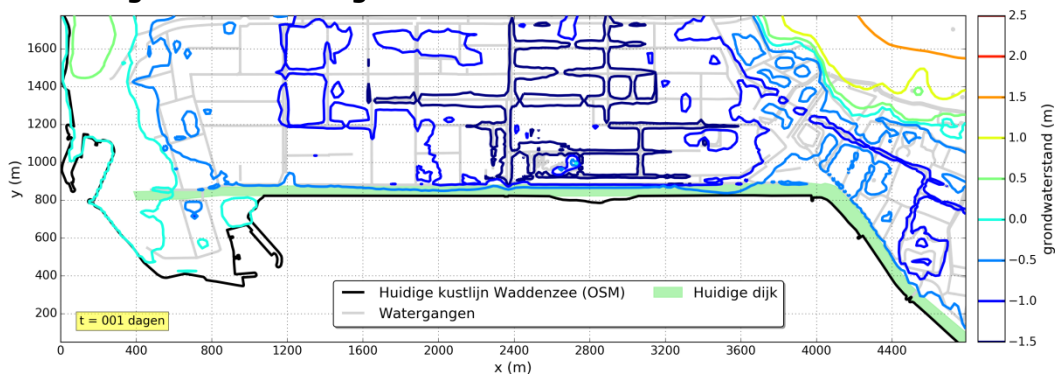
4 Referentie situatie

De referentiesituatie is de situatie zonder realisatie van het veiligheidsduin. Deze is berekend voor de beoordeling van de aanleggeffekten (2015) en voor de beoordeling van de langjarige effecten (2025 en 2085). Deze start met de huidige binnendijkse situatie en het gemiddelde peil op de Waddenzee. Tot 2085 is dit doorgerekend met het effect van klimaatverandering op de zeespiegelstijging (paragraaf 2.3.2) en de grondwateraanvulling (paragraaf 2.6).

4.1 Referentiesituatie aanleggeffekt: 2015

Afbeelding 4.1 toont de berekende freatische grondwaterstand in het jaar 2015 bij een gemiddeld peil in de Waddenzee van NAP -0,08 m

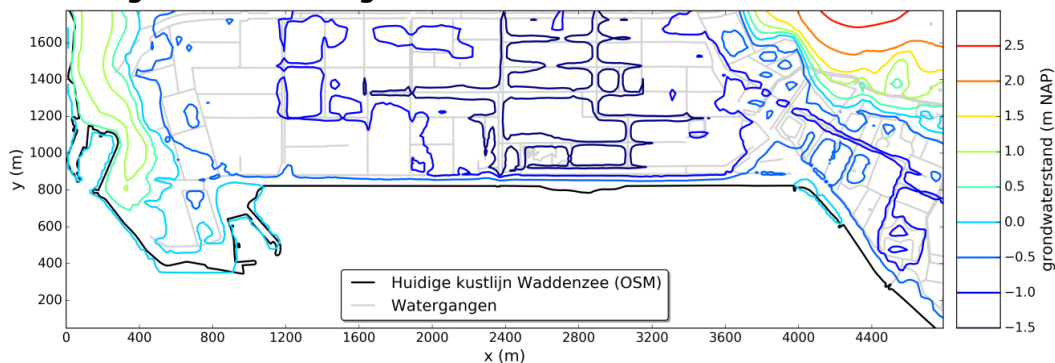
Afbeelding 4.1 Freatische grondwaterstand in 2015



4.2 Referentiesituatie langjarig effect: 2025

Afbeelding 4.2 toont de berekende freatische grondwaterstand in het jaar 2025 bij een gemiddeld peil in de Waddenzee van NAP +0,0 m.

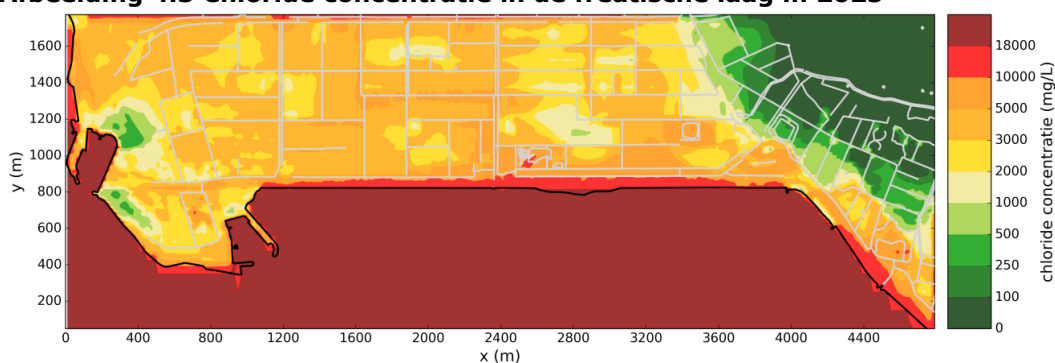
Afbeelding 4.2 Freatische grondwaterstand in 2025





De berekende chloride concentratie in de freatische laag in 2025 is weergegeven in afbeelding 4.3. Hierin is zichtbaar dat de het grondwater in het grootste deel van de Prins Hendrikpolder brak tot zeer brak is (chloride concentratie tussen de 3.000 mg/l en 10.000 mg/l). Bij het beschermd natuurmonument Ceres is de chloride concentratie lager, tussen de 2.000 en 10.000 mg/l. Dat is brak tot zeer brak water. Ten opzichte van de startsituatie is de chloride concentratie in de polder afgenomen vanwege de toename in grondwateraanvulling en aan de noord en zuid⁵ zijde van de polder omdat dit infiltratiegebieden zijn.

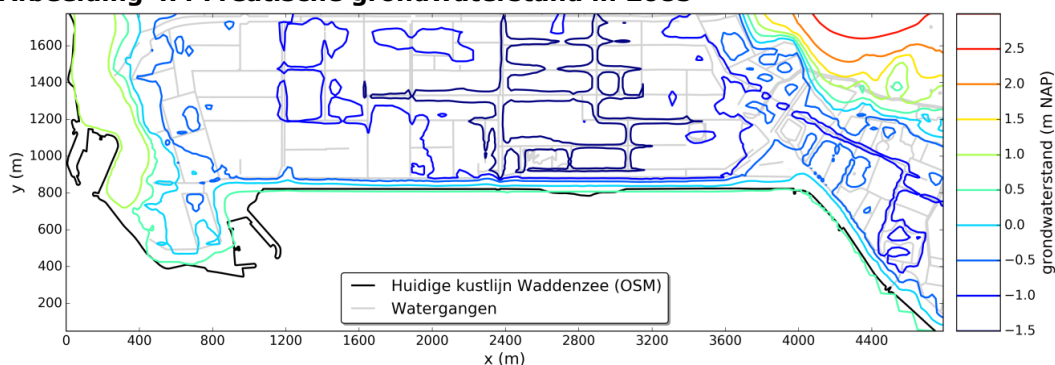
Afbeelding 4.3 Chloride concentratie in de freatische laag in 2025



4.3 Referentiesituatie langjarig effect: 2085

Afbeelding 4.4 geeft de berekende freatische grondwaterstand in 2085 weer bij een gemiddeld waterpeil in de Waddenzee van NAP +0,52 m.

Afbeelding 4.4 Freatische grondwaterstand in 2085

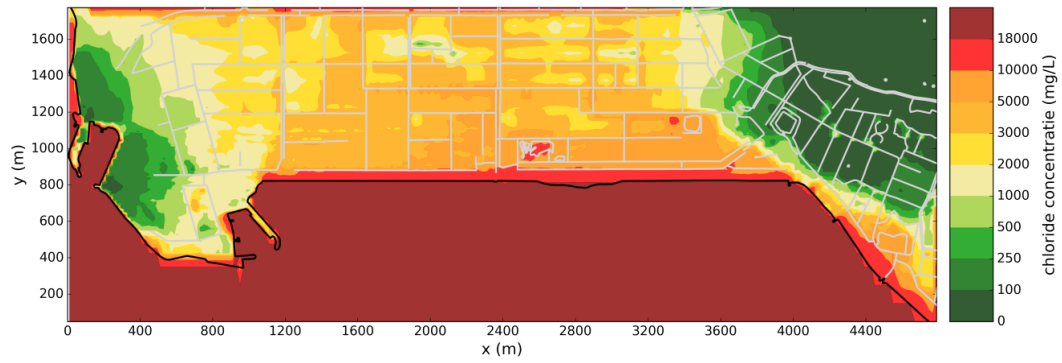


Afbeelding 4.5 geeft de berekende chloride concentratie weer in 2085. In de Prins Hendrikpolder is berekend dat de freatische grondwater brak tot zeer brak is (chloride concentratie tussen 3.000 en 10.000 mg/l), dit is vergelijkbaar met de situatie in 2025 (zie afbeelding 4.3). In het beschermd natuurmonument Ceres is de berekende concentratie nog vergelijkbaar, namelijk 2.000 tot 10.000 mg/l. Lokaal treedt verzilting op vanwege de toename in de stijghoogte als gevolg van zeespiegelstijging (toename in zout kwel) en zones waarin de grondwateraanvulling relatief laag is.

⁵ In de afbeelding aan de linker en rechterzijde, omdat in de afbeelding het noorden niet boven is.



Afbeelding 4.5 Chloride concentratie in de freatische laag in 2085





5 Permanente situatie

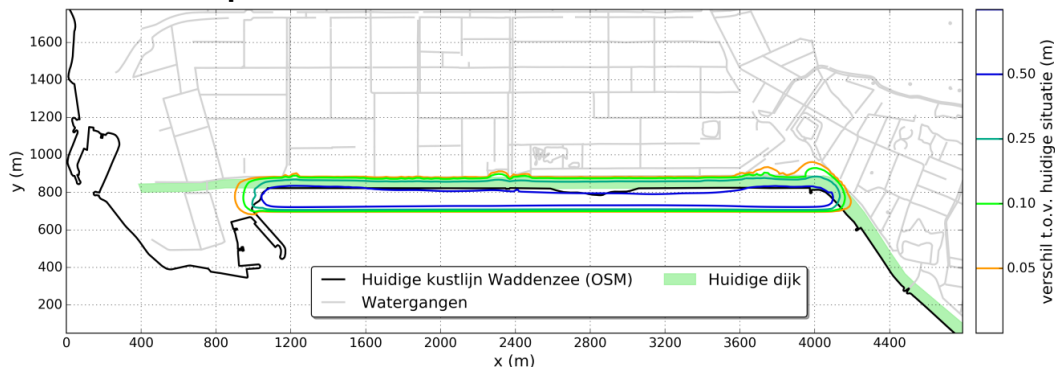
De effecten van de permanente situatie zijn beschouwd in 2025 en in 2085, respectievelijk 10 en 70 jaar na start van de modellering. In paragraaf 2.3.2 is beschreven dat de zeespiegelstijging is opgenomen in de modellering. Tussen 2015 en 2025 is het gemiddelde peil in de Waddenzee gestegen met 0,085 m van NAP -0,08 m naar NAP - 0,00 m. In 2085 ligt het gemiddelde Waddenzeepeil 0,6 m hoger, op NAP + 0,52 m.

Eerst zijn de effecten van de scenario's op de grondwaterstand en stijghoogte beschouwd op de twee verschillende tijdstippen, en vervolgens zijn de berekende effecten op de grondwaterkwaliteit weergegeven.

5.1 Effect op grondwaterstand 2025

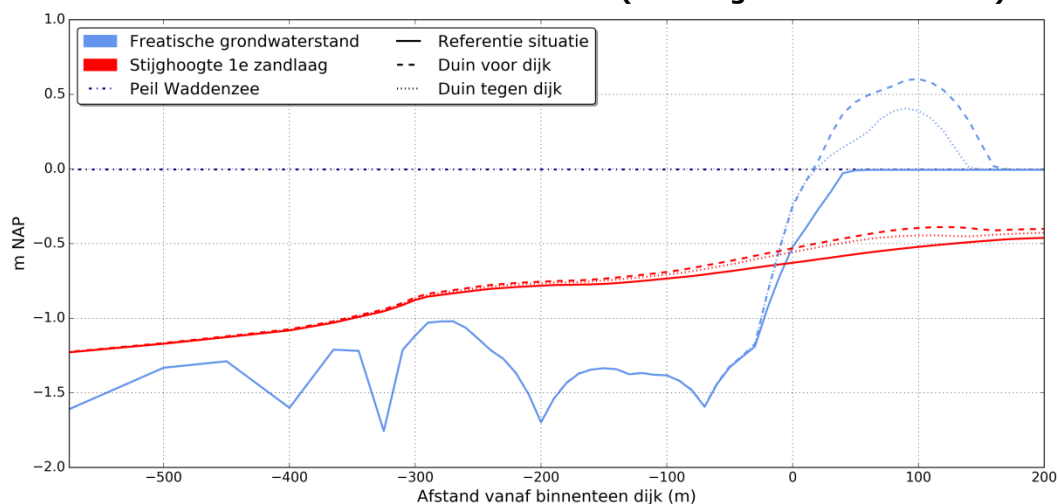
Het effect van de 2 scenario's op de grondwaterstand in 2025 is beoordeeld bij een gemiddeld peil op de Waddenzee van NAP - 0,0 m. Dit effect is op kaart weergegeven in afbeelding 5.1 (duin voor dijk) in 2025 bij gemiddeld peil in de Waddenzee ten opzichte van referentie situatie in hetzelfde jaar. De resultaten van het scenario duin voor dijk, komen overeen met die van het scenario duin tegen dijk, waardoor geen afzonderlijke afbeelding is opgenomen. In beide scenario's wordt een verhoging van maximaal 0,6 m berekend ter plaatse van het nieuwe veiligheidsduin. Dit wordt veroorzaakt doordat de Waddenzee verder weg komt te liggen ten opzichte van de referentiesituatie. Dit effect is kleiner bij duin tegen dijk, omdat dan een kleinere opbolling in het veiligheidsduin optreedt door de kleinere breedte van het veiligheidsduin. Ter plaatse van de landbouwpercelen is het berekende effect minder dan 0,05 m. Dit effect is kleiner dan het eerder berekende effect (Witteveen+Bos 2013) vanwege de verbeterde modelopzet. Uit de doorsnede in afbeelding 5.2 is zichtbaar dat het veiligheidsduin een invloed heeft op de grondwaterstand, maar dat de stijghoogte vrijwel ongewijzigd blijft. De kwelstroom in het achterland neemt licht toe door het veiligheidsduin, omdat de stijghoogte in het achterland iets toeneemt ten opzichte van de referentiesituatie. Kaarten met de berekende kwelstroom zijn opgenomen in bijlage 2.

Afbeelding 5.1 Berekend effect freatische grondwaterstand duin voor dijk in 2025 ten opzichte van referentie situatie 2025





Afbeelding 5.2 Doorsnede⁶ freatische grondwaterstand en stijghoogte beide scenario's en referentie situatie in 2025 (ter hoogte van x = 2790 m)



5.2 Effect op grondwaterstand 2085

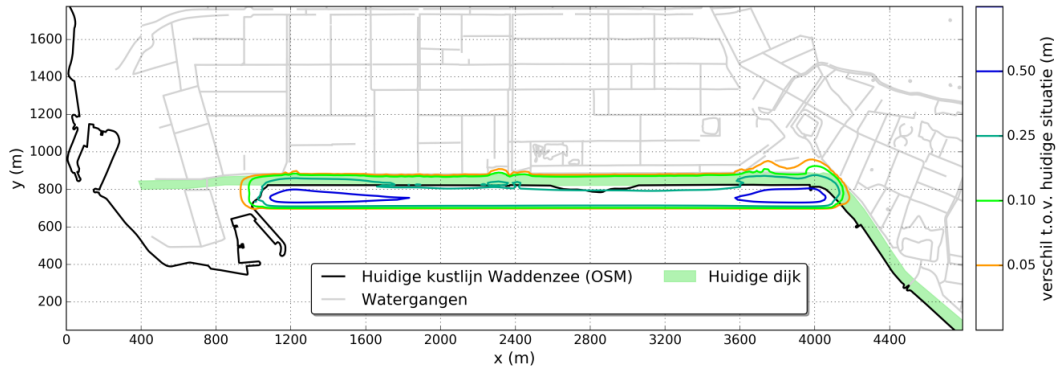
Het effect van de 2 scenario's op de grondwaterstand in 2085 is beoordeeld in 2 stappen:

- het effect bij een gemiddeld peil op de Waddenzee van NAP +0,52 m. Dit effect is op kaart weergegeven in afbeelding 5.3 (duin voor dijk) in 2085 bij gemiddeld peil in de Waddenzee ten opzichte van referentie situatie, zie hoofdstuk 4. Voor het scenario duin voor dijk is geen afzonderlijke afbeelding opgenomen, omdat de effecten vergelijkbaar zijn aan die van het scenario duin tegen dijk. De freatische grondwaterstand stijgt met maximaal 0,6 m onder de huidige dijk. Ter plaatse van de landbouwpercelen is het berekende effect minder dan 0,05 m. In de periode tussen 2015 en 2085 stelt dit effect zich langzaam in. Het berekende effect voor duin tegen dijk heeft een kleiner invloedsgebied. De scenario's hebben beide geen merkbaar effect op de kwelstroom, dit is inzichtelijk gemaakt in de doorsnede in afbeelding 5.4 en in bijlage II. Deze doorsnede laat zien dat de freatische grondwaterstand en stijghoogte in het binnenland niet merkbaar wijzigen;
- het effect bij hoog en laag water is stationair berekend in 2085. Dit is een worst-case benadering, omdat in werkelijkheid het hoog en laag water slechts kort durend is. Afbeelding 5.5 laat zien dat ook tijdens deze situaties de freatische grondwaterstand in het binnenland niet merkbaar wijzigt. In het veiligheidsduin treedt bij de duin voor dijk variant de grootste opbolling op, omdat deze de grootste breedte heeft.

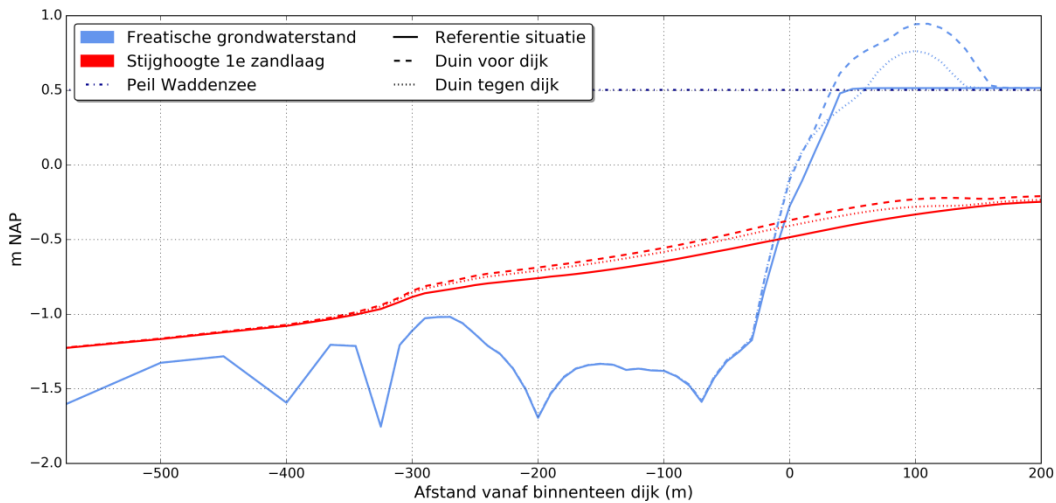
⁶ De dijksloot ligt rond x=-50 m in de doorsnede.



Afbeelding 5.3 Berekend effect freatische grondwaterstand duin voor dijk in 2085 ten opzichte van referentie situatie 2085



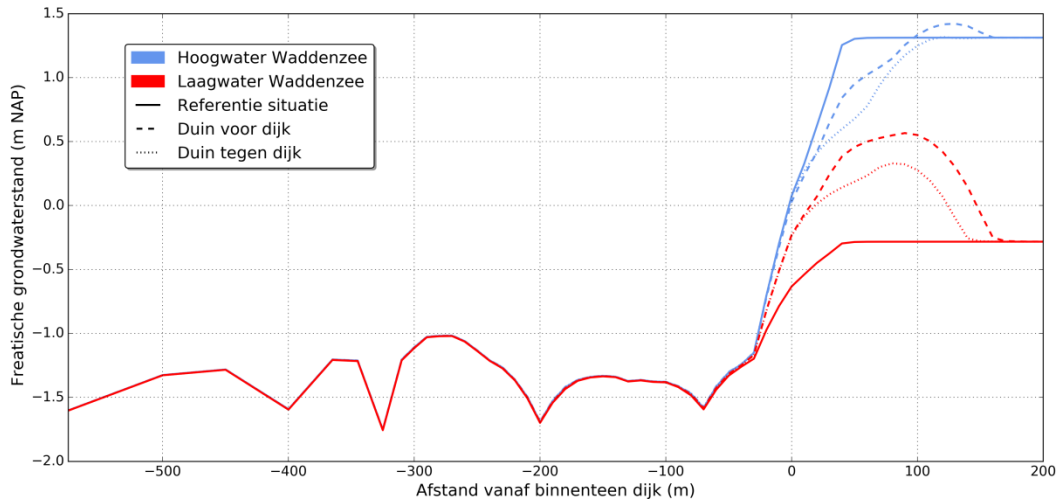
Afbeelding 5.4 Doorsnede⁷ freatische grondwaterstand en stijghoogte beide scenario's en referentie situatie in 2085 (ter hoogte van x = 2.790 m)



⁷ De dijksloot ligt rond x=-50 m in de doorsnede.



Afbeelding 5.5 Doorsnede freatische grondwaterstand beide scenario's en referentie situatie in 2085 voor laag en hoog water (ter hoogte van x = 2.790 m)



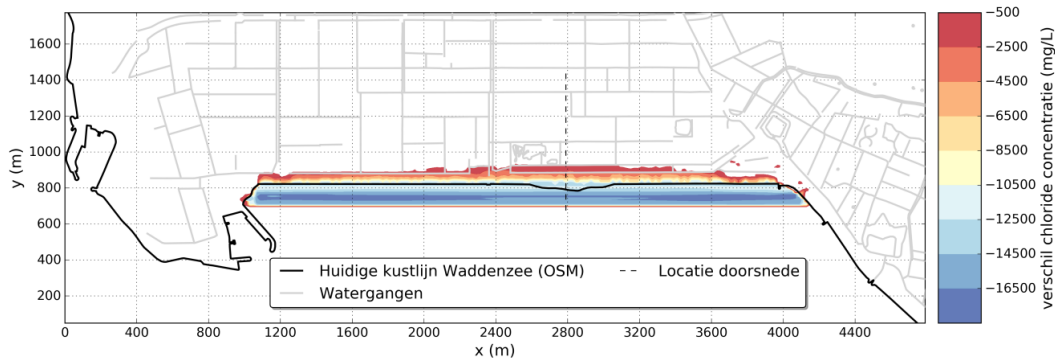
5.3 Grondwaterkwaliteit in 2025

In afbeelding 5.6 is de verandering van de freatische chloride concentratie weergegeven in 2025 ten opzichte van de referentie situatie in 2025 voor het scenario duin voor dijk. Beide scenario's leveren een vergelijkbaar resultaat op, waardoor het scenario duin tegen dijk niet is weergegeven. In de afbeelding is zichtbaar dat nabij de huidige dijk een verzoeting optreedt. De doorsnede in afbeelding 5.7 vertoont het verloop van de chloride concentratie in de freatische laag en de eerste zandlaag loodrecht op de dijk en het veiligheidsduin. Hierin is zichtbaar dat het veiligheidsduin in beide scenario's op een afstand van circa 100 m van de teen van de huidige dijk tot een verzoeting leidt. In scenario met duin voor dijk is de verzoeting iets groter dan in het scenario met duin tegen dijk vanwege het extra oppervlak waarover infiltratie van hemelwater kan plaatsvinden. Voorbij dat punt, op ongeveer 100 a 200 meter van de huidige dijk treedt een lichte verzilting op (<500 mg/l) die niet is weergegeven in het bovenaanzicht.

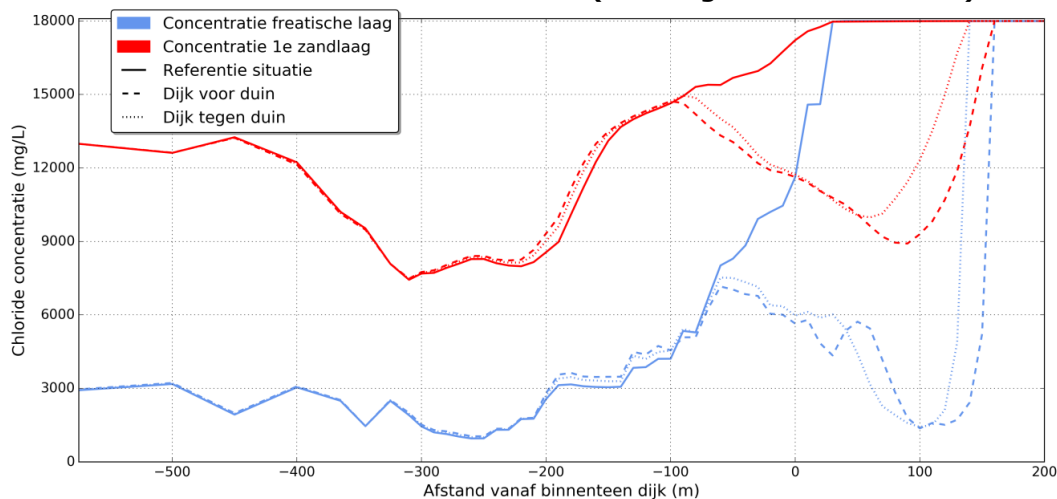
Volgens de modellering van de referentiesituatie is het grondwater in de Prins Hendrikpolder brak (> 2.000 mg Cl/l). Door de ontwikkelingen neemt nabij de huidige dijk de chloride concentratie af, maar het grondwater blijft licht brak. Ter plaatse van het veiligheidsduin daalt de concentratie in de freatische laag met meer dan 10.500 mg/l. In de eerste zandlaag daalt de concentratie met 3.000 tot 5.000 mg/l hetgeen duidt op de vorming van een zoetwaterbel. De berekende afname van de zoutflux betekent dat de kansen voor de ontwikkeling van een lokale zoetwaterbel toenemen.



Afbeelding 5.6 Berekend effect freatische chloride concentratie duin voor dijk in 2025 ten opzichte van referentie situatie 2025



Afbeelding 5.7 Doorsnede chloride concentratie dijk voor duin, dijk tegen duin en referentie situatie in 2025 (ter hoogte van x = 2790 m)



5.4 Grondwaterkwaliteit in 2085

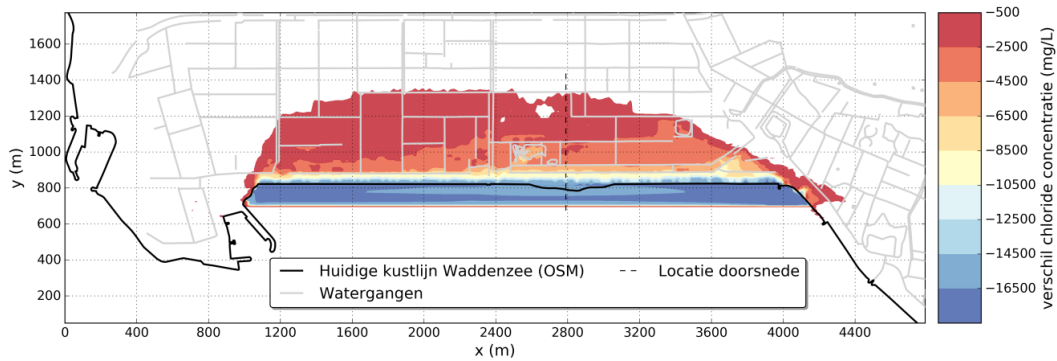
Afbeelding 5.8 en afbeelding 5.9

Afbeelding geven de verandering van de freatische⁸ chloride concentratie weer in 2085 ten opzichte van de referentie situatie in 2085. Zichtbaar is dat de berekende chloride concentratie tot circa 600 m afstand van de huidige dijk afneemt door de ontwikkelingen. De doorsnede in afbeelding 5.13 en de kaarten in bijlage II laten zien dat in de berekening het freatische grondwater in de Prins Hendrikpolder desondanks zout blijft, namelijk boven de 10.000 mg/l. In beschermd natuurmonument Ceres neemt het chloridegehalte in aan de kant van de dijk met 6.500 tot 10.500 mg/l af en in het overig deel van het gebied met 500 tot 6.500 mg/l. De kwaliteit is dan brak water (2.000 - 5.000 mg/l). In de dijk neemt de chloride concentratie af tot minimaal 3.000 mg/l, dat is brak water. De berekende afname van de zoutflux betekent dat de kansen voor de ontwikkeling van een lokale zoetwaterbel toenemen.

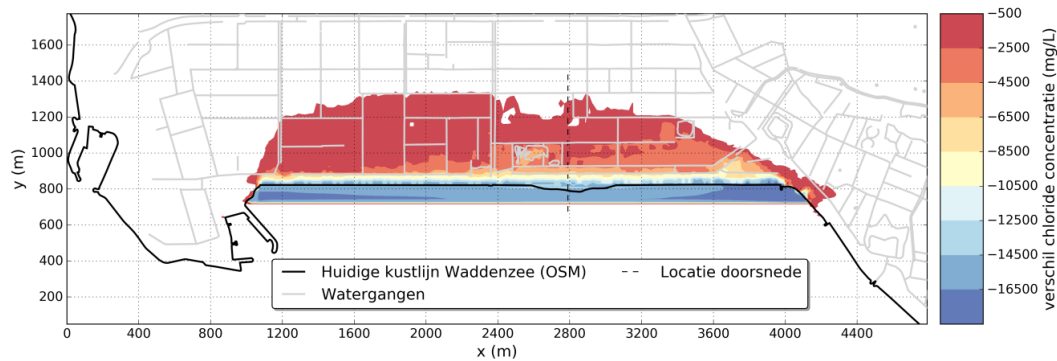
⁸ Freatisch grondwater is het ondiepe grondwater, het water dat je tegen komt wanneer je een kuil graaft.



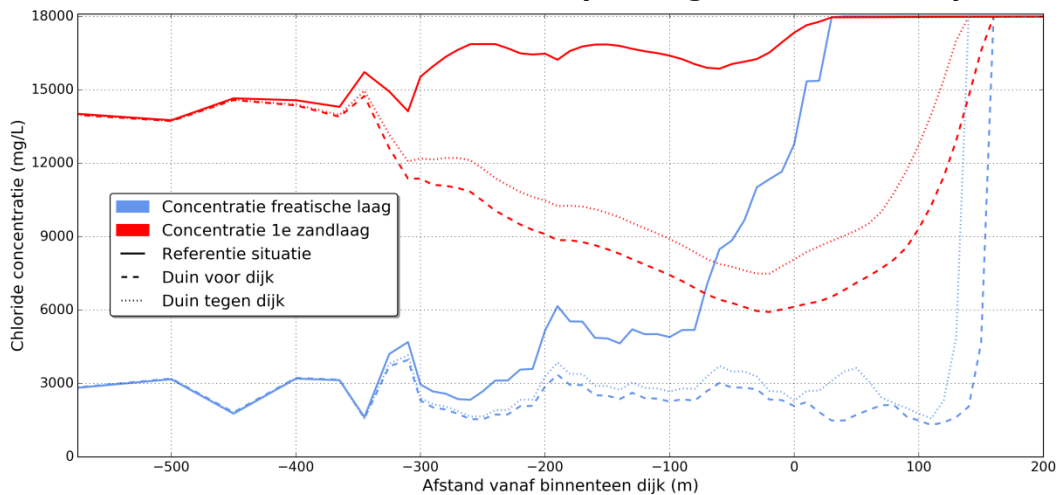
Afbeelding 5.8 Berekend effect fretische chloride concentratie duin voor dijk in 2085 ten opzichte van referentie situatie in 2085



Afbeelding 5.9 Berekend effect fretische chloride concentratie duin tegen dijk in 2085 ten opzichte van referentie situatie in 2085



Afbeelding 5.10 Doorsnede chloride concentratie duin voor dijk, duin tegen dijk en referentie situatie in 2085 (ter hoogte van x = 2790 m)





5.5 Afgeleide effecten

Deze paragraaf beschrijft de afgeleide effecten voor de landbouw en natuur.

5.5.1 Landbouw

Beide scenario's hebben in zowel 2025 als 2085 geen negatief effect voor de landbouwpercelen, omdat:

- voor de waterkwantiteit, omdat:
 - geen merkbare verandering van de freatische grondwaterstand optreedt, want de verandering is minder dan 0,05 m;
 - de kwelstroom niet wijzigt;
- voor de waterkwaliteit de chloride concentratie afneemt ten opzichte van de autonome ontwikkeling. Het freatische grondwater blijft echter zout, net als in de huidige situatie. Er is dus geen merkbaar verschil. Een afname van de zoutflux betekent dat de kansen voor de ontwikkeling van een lokale zoetwaterbel toenemen. Dat is positief.

5.5.2 Beschermd natuurmonument Ceres

Beide scenario's hebben geen negatief effect op de abiotische randvoorwaarden in het beschermd natuurmonument Ceres. In beide scenario's wijzigt de grondwaterkwantiteit niet merkbaar. De berekende chloride concentratie in het freatisch grondwater neemt af, maar blijft naar verwachting op basis van de berekeningsresultaten nog steeds brak. De grootste afnames treden op nabij de huidige dijk, waar het grondwater in de huidige situatie al veel zouter is dan in de rest van het gebied. Er is geen negatief effect op de zoete standplaatscondities die blijkens de aanwezige soorten voorkomen in het beschermd natuurmonument Ceres, omdat deze niet gekoppeld zijn aan de brakke kwelstroom maar aan de zoet waterlens. Doordat het freatisch brak blijft, blijven overgangen van brak naar zoet in het gebied aanwezig.



6 Aanlegfase

Dit hoofdstuk omvat een analyse van de geohydrologische effecten in de aanlegfase. Hiervoor zijn verschillende mogelijke aanlegvarianten doorgerekend via het grondwatermodel. De uitgangspunten voor de aanleg zijn geselecteerd via expert view. Een nadere beoordeling van de effecten moet door de aannemer worden gemaakt.

6.1 Bouwmethode

Op basis van ervaring is tijdens het overleg met het hoogheemraadschap op 24 september 2015 beoordeeld dat het hydraulisch opspuiten van het veiligheidsduin de meest waarschijnlijke aanlegoptie is. Dit is dan ook het uitgangspunt voor de berekening van het basisscenario. Eventuele alternatieve scenario's worden beschouwd als negatieve effecten optreden.

Op basis van expert view zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd voor het basisscenario:

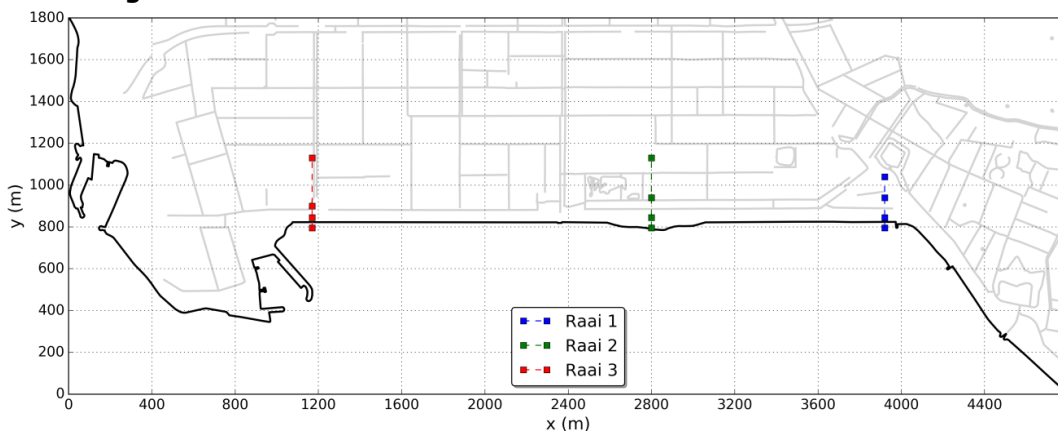
- een aanlegsnelheid van 100 m per week;
- hydraulisch opspuiten tot NAP + 8,0 m;
- het veiligheidsduin is gedurende het opspuiten volledig verzadigd met water.

Hiermee is het geleidelijk opschuiven van de werkzaamheden doorgerekend.

6.2 Berekend effect basisscenario

Het berekende effect van het basisscenario is weergegeven via grafieken en kaarten. De grafieken zijn weergegeven voor 3 raaien op kenmerkende locaties langs het tracé namelijk het beschermd natuurmonument Ceres, en 2 locaties in het landbouwgebied zie afbeelding 6.1. Iedere raai bestaat uit een locatie in het veiligheidsduin, de huidige dijk en 2 locaties in het achterland. De kaarten geven de situatie op een kenmerkend tijdstip weer.

Afbeelding 6.1 Raaien en locaties



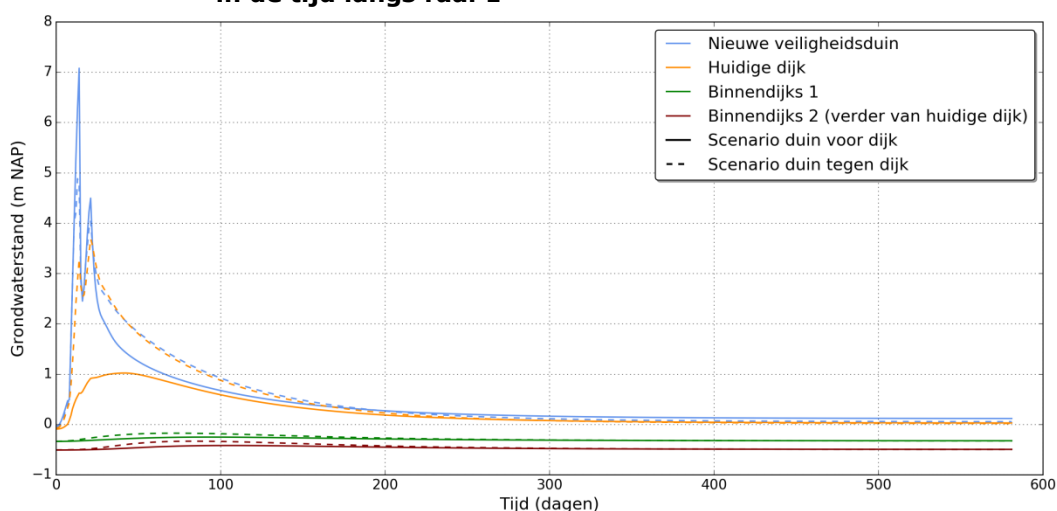


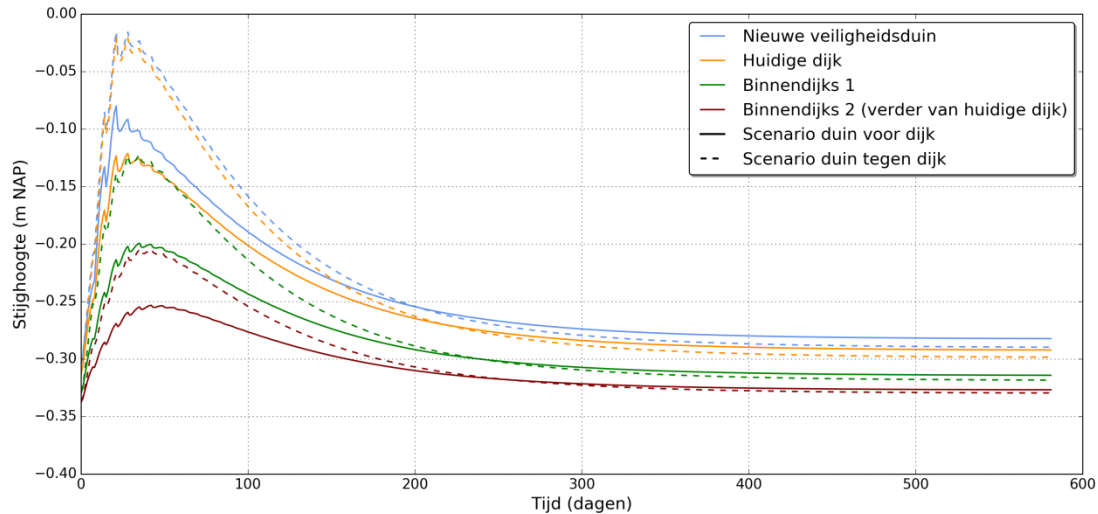
Afbeelding 6.2 geeft de berekende grondwaterstand en stijghoogte in de tijd weer langs raai 1, dit is nabij het beschermd natuurmonument Ceres. De doorgetrokken lijn is voor het scenario duin voor dijk, de gestippelde lijn is voor het scenario duin tegen dijk. De grafiek laat zien dat door het opspuiten de berekende grondwaterstand in het veiligheidsduin (blauwe kleur) oploopt tot circa NAP + 7 m als de aanlegfase deze raai passeert na circa 20 dagen. De grondwaterstand zakt vervolgens uit, en bereikt na circa 200 dagen de eindsituatie. De stijghoogte neemt minder toe door opspuiten van het veiligheidsduin, maar werkt wel verder door landinwaarts vanwege de relatief goede doorlatendheid. Dit kan voor een lichte toename van zoute kwel zorgen landinwaarts.

De maximale grondwaterstand in de huidige dijk (oranje kleur) kent enige vertraging. De maximale waarde is circa NAP + 1,0 m voor het scenario duin voor dijk, bij het scenario duin tegen dijk wordt een maximale grondwaterstand van circa NAP + 3,5 m berekend. Dit verschil treedt op doordat bij het eerste scenario het water kan afstromen tussen het veiligheidsduin en de huidige dijk, terwijl bij het tweede scenario het water direct vanuit het veiligheidsduin in de huidige dijk infiltreert. In het model is de infiltratie mogelijk groter gemodelleerd dan in werkelijkheid optreedt, omdat geen rekening is gehouden met een afdekkende kleilaag op de huidige dijk.

De peil verhoging in het achterland kent een grotere vertraging. Dit komt overeen met de ervaring bij de Hondsbossche Pettemer Zeewering. Binnendijs wordt in het beschermd natuurmonument Ceres een verhoging van de grondwaterstand berekend van maximaal circa 0,2 m gedurende een periode van circa 4 maanden. Als deze verhoging optreedt in de zomer of een relatief droge winter, dan kan deze verhoging wegvallen in de jaarlijkse natuurlijke fluctuatie. Echter, in een normale en natte winter kan een een verhoging boven de gemiddelde grondwaterstand ontstaan.

Afbeelding 6.2 Berekende grondwaterstand en stijghoogte in de 1^{ste} watervoerende laag in de tijd langs raai 1

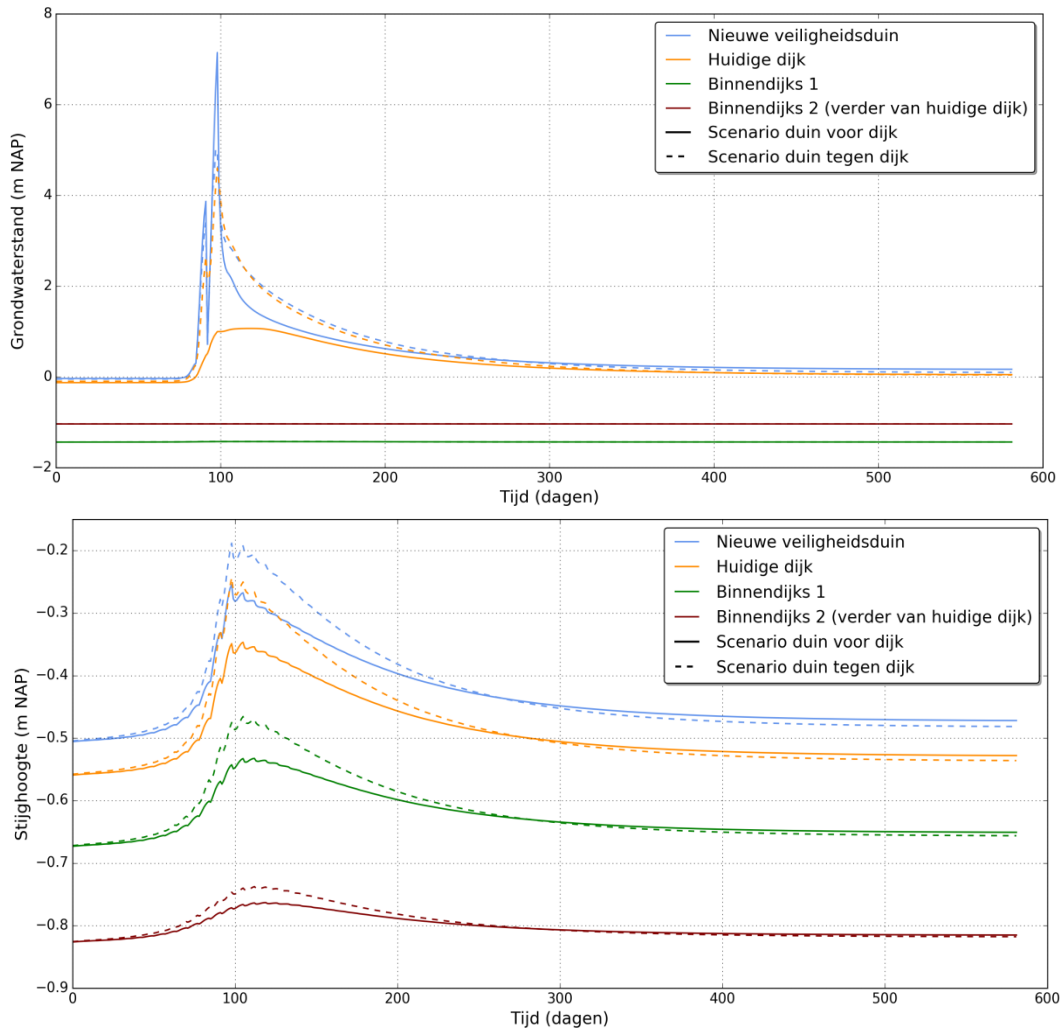




In afbeelding 6.3 en afbeelding 6.4 zijn de grafieken voor raai 2 en 3 opgenomen. De maximale effecten treden hier later op omdat de aanleg hier later passeert. De effecten in het veiligheidsduin en de huidige dijk zijn gelijk aan raai 1. Binnendijks wijken de effecten af, omdat perceelsdrainage aanwezig is. Hierdoor stijgt de berekende grondwaterstand veelal minder dan 0,05 m. De afvoer door de perceelsdrainage neemt wel toe. In de modellering is aangehouden dat de capaciteit hiervoor voldoende is. De stijghoogte neemt minder toe door opspuiten van het veiligheidsduin maar werkt wel verder door landinwaarts vanwege de relatief goede doorlatendheid. Dit kan voor een tijdelijke lichte toename in zoute kwel zorgen landinwaarts. De vlakdekkende freatische effecten zijn ook zichtbaar in de kaarten in afbeelding 6.5 en afbeelding 6.6.

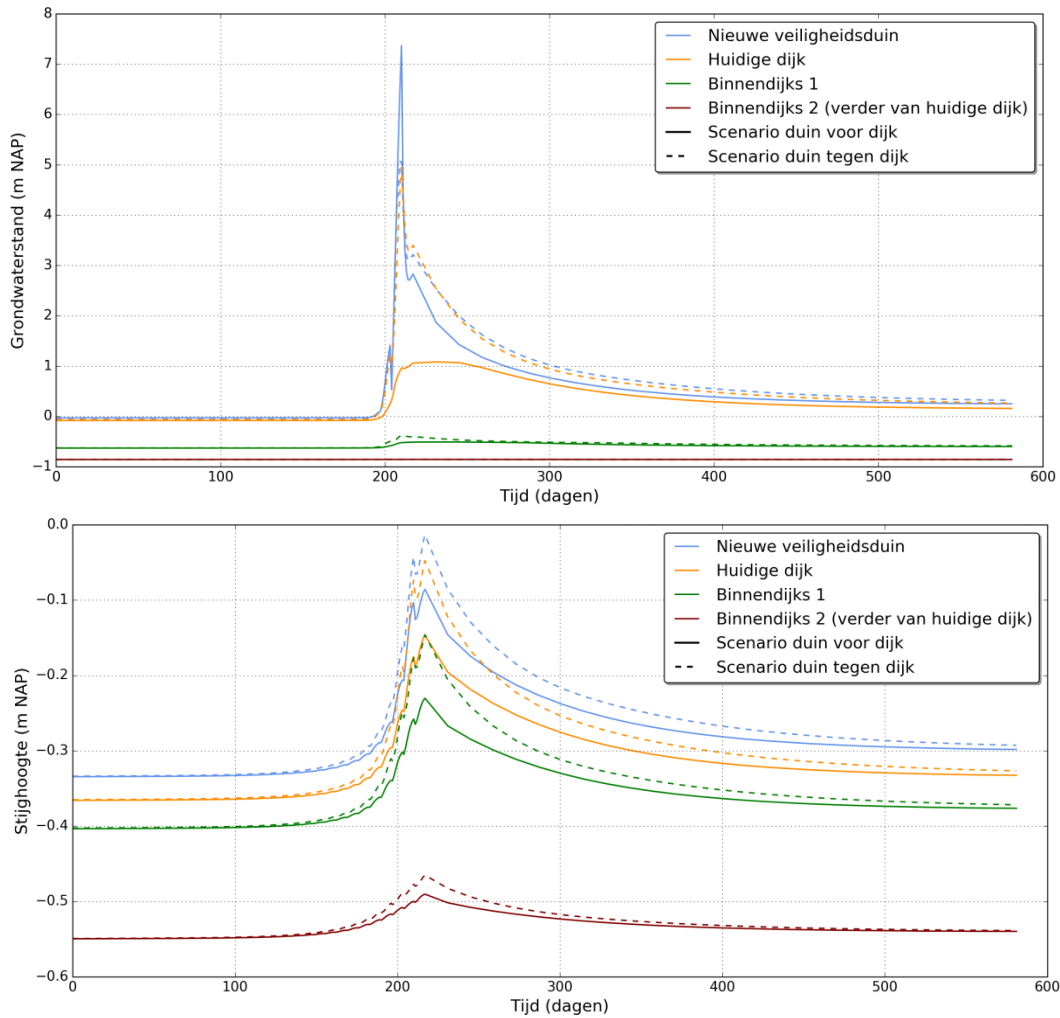


Afbeelding 6.3 Berekende grondwaterstand en stijghoogte in 1^{ste} watervoerende laag in de tijd langs raai 2



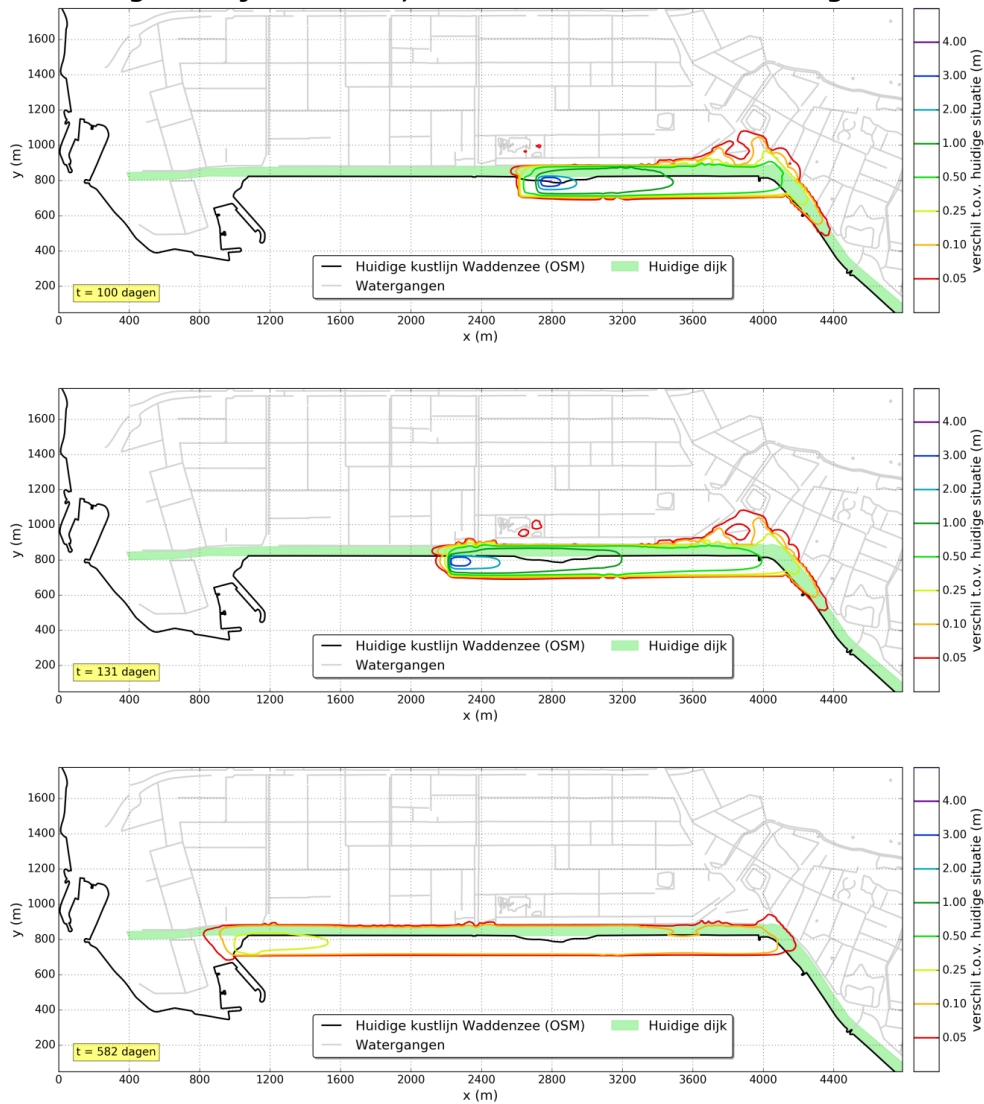


Afbeelding 6.4 Berekende grondwaterstand en stijghoogte in de 1^{ste} watervoerende laag in de tijd langs raai 3



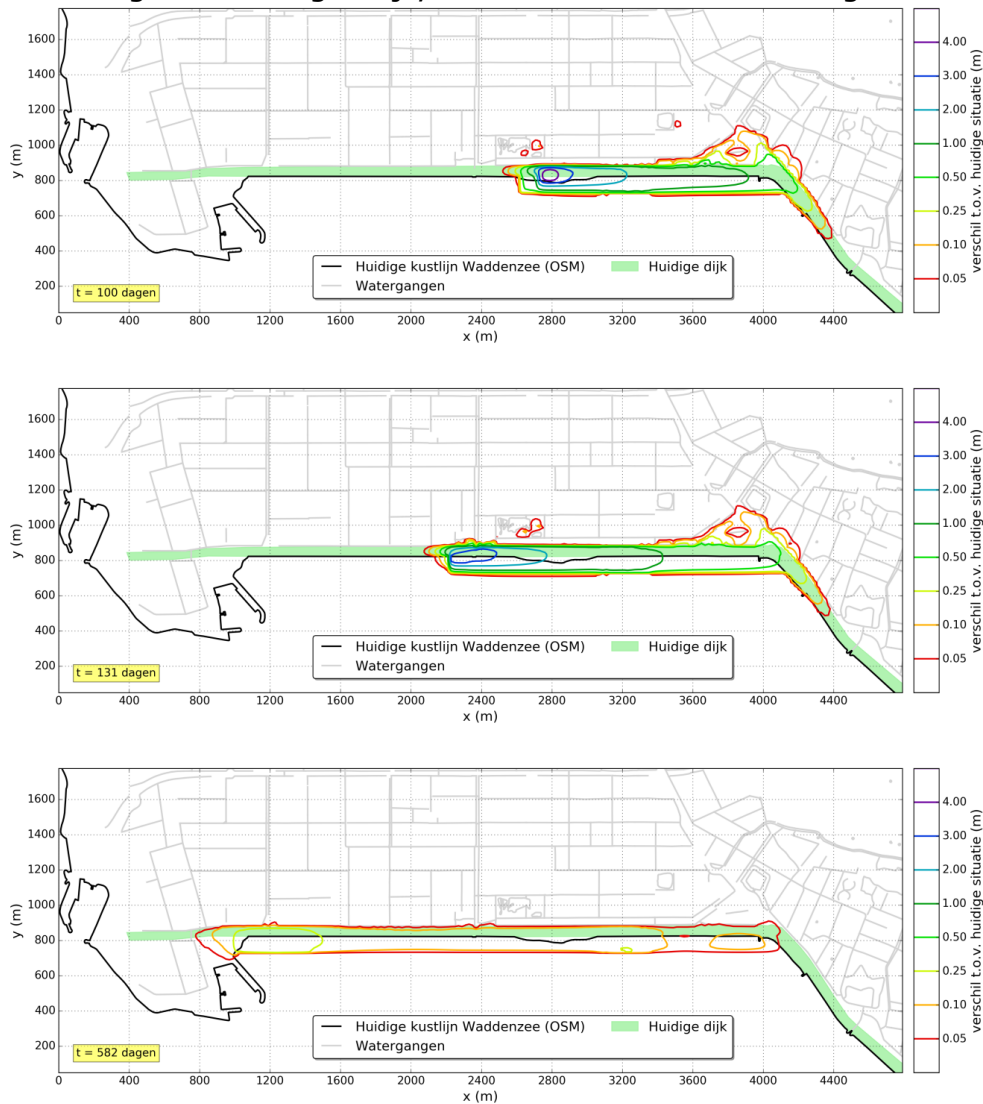


Afbeelding 6.5 Dijk voor duin, vlakdekkend effect freatische grondwaterstand





Afbeelding 6.6 Duin tegen dijk, vlakdekkend effect freatische grondwaterstand



De stijging van de binnendijkse freatische grondwaterstand wordt veroorzaakt door de grotere zoute kweldruk vanuit het veiligheidsduin. In tegenstelling tot de permanente fase bestaat dit water nu niet uit zoet neerslagwater, maar uit zout water. Ervaring in eerdere versterkingsprojecten is dat een nalevering van zout water naar de ondergrond, achterliggende percelen en het watersysteem kan ontstaan. Dit betekent dat de huidige zoetwaterbel onder de percelen wordt verminderd en een grotere zoute kwelstroom ontstaat.

6.3 Afgeleid effect basisscenario

In onderstaande subparagrafen zijn de afgeleide effecten van het basisscenario beoordeeld. Op enkele belangen worden negatieve effecten verwacht. Daarom zijn in de volgende paragraaf alternatieve scenario's ontwikkeld.



6.3.1 Landbouw

De berekende verandering van de grondwaterstand is veelal minder dan 0,05 m, doordat de perceelsdrainage water afvoert. Hierdoor verandert de nat- en droogteschade niet. In de modellering is aangehouden dat de afvoercapaciteit hiervoor voldoende is, dit moet voorafgaand aan de uitvoering worden gecontroleerd in het veld. Een beheersmaatregel is om de perceelsdrainage door te spuiten of eventueel te vervangen.

Het basisscenario heeft toch een negatief effect op de landbouw doordat de kwelstroom wordt gevoed door zout water uit de nieuwe duin. Hierdoor neemt de zoet waterlens onder de percelen af. Dit kan beheerst worden door de kwelstroom te beperken door bemaling, of door minder hoog of op grotere afstand van dijk hydraulisch op te spuiten.

6.3.2 Beschermd natuurmonument Ceres

Het basisscenario heeft een negatief effect op de abiotische randvoorwaarden in beschermd natuurmonument Ceres, omdat de kwelstroom wordt gevoed door zout water uit het veiligheidsduin. Dit heeft een negatief effect op de zoete standplaatscondities die blijkens de aanwezige soorten voorkomen in Ceres. Deze zijn gekoppeld zijn de huidige zoet waterlens, die in dikte afneemt.

Dit kan beheerst worden door de kwelstroom te beperken door bemaling, of door minder hoog of op grotere afstand van dijk hydraulisch op te spuiten.

6.3.3 Huidige dijk

Een hoge grondwaterstand kan leiden tot instabiliteit van de huidige dijk.

Aan de noordzijde sluit het veiligheidsduin aan op sectie 8 van de Waddenzeedijk Texel. Die sectie is dan al versterkt, en heeft dan een grenswaarde voor de grondwaterstand op NAP + 5,0 m. Deze waarde wordt zeer waarschijnlijk kort na de start van de werkzaamheden overschreden. Dit kan worden beheerst door het zand op enige afstand van de dijk hydraulisch aan te brengen, en dan mechanisch tegen de dijk aan te schuiven.

Voor de huidige dijk is geen grenswaarde voor de grondwaterstand bekend. Op basis van ervaring is beoordeeld dat de grenswaarde lager ligt dan NAP + 5,0 m en mogelijk wordt overschreden conform de huidige berekeningen voor duin tegen dijk. Dit is een negatief effect. Dit kan beheerst worden door de interactie tussen het hydraulisch aanbrengen en de huidige dijk nader te analyseren, via bemaling, of door minder hoog of op grotere afstand van dijk hydraulisch op te spuiten.

6.3.4 Overige belangen

Vlakbij de huidige dijk ligt een huis ter plaatse van raai 1. Op basis van de berekeningen treedt een stijging van de freatische grondwaterstand ongeveer 0,1 m (duin voor dijk) of 0,2 m (duin tegen dijk) op in het basisscenario. Deze effecten treden op, omdat de teensloot van de huidige dijk niet doorloopt en op enige afstand ligt. Hiermee wordt de freatische grondwaterstand niet gecontroleerd



en kan deze veranderen als gevolg van het opspuiten van de dijk. Dit kan problemen veroorzaken zoals wateroverlast in de kruipruimte. Dit kan gemitigeerd worden door het oppervlakte water verder uit te breiden, of door drainage aan te leggen nabij het huis.

Een tweede huis ligt op ongeveer 100 m van raai 2. De resultaten van raai 2 geven naar verwachting een goede inschatting van de effecten ter plaatse van dit huis. Op deze locatie is de verandering van de freatische grondwaterstand verwaarloosbaar. Negatieve effecten op dit huis en andere belangen zoals omliggende infrastructuur worden op basis van ervaring niet verwacht.

6.4 Alternatieven

In deze paragraaf zijn op basis van ervaring alternatieve scenario's ontwikkeld om negatieve afgeleide effecten te voorkomen en de gevoeligheid voor keuzes in de aanlegmethode te laten zien, namelijk:

- het hydraulisch aanbrengen tot NAP + 4 m in plaats van NAP + 8 m om de hoeveelheid water te verminderen;
- een halvering van de aanlegsnelheid, waardoor een minder groot gebied in een keer wordt belast;
- het toepassen van bemaling in het eerste watervoerende pakket, om de kwelstroom af te vangen.

De volgende alternatieven zijn bedacht, maar momenteel nog niet doorgerekend omwille van de doorlooptijd van het project, of doordat deze in de praktijk minder snel toegepast worden:

- op enige afstand van de dijk opspuiten en verder mechanisch richting de dijk verplaatsen;
- veiligheidsduin in lagen van bijvoorbeeld 2 m dikte aanbrengen, waardoor het water meer tijd heeft om uit te zakken;
- alleen ondiepe drainage toepassen in plaats van diepere bemaling.

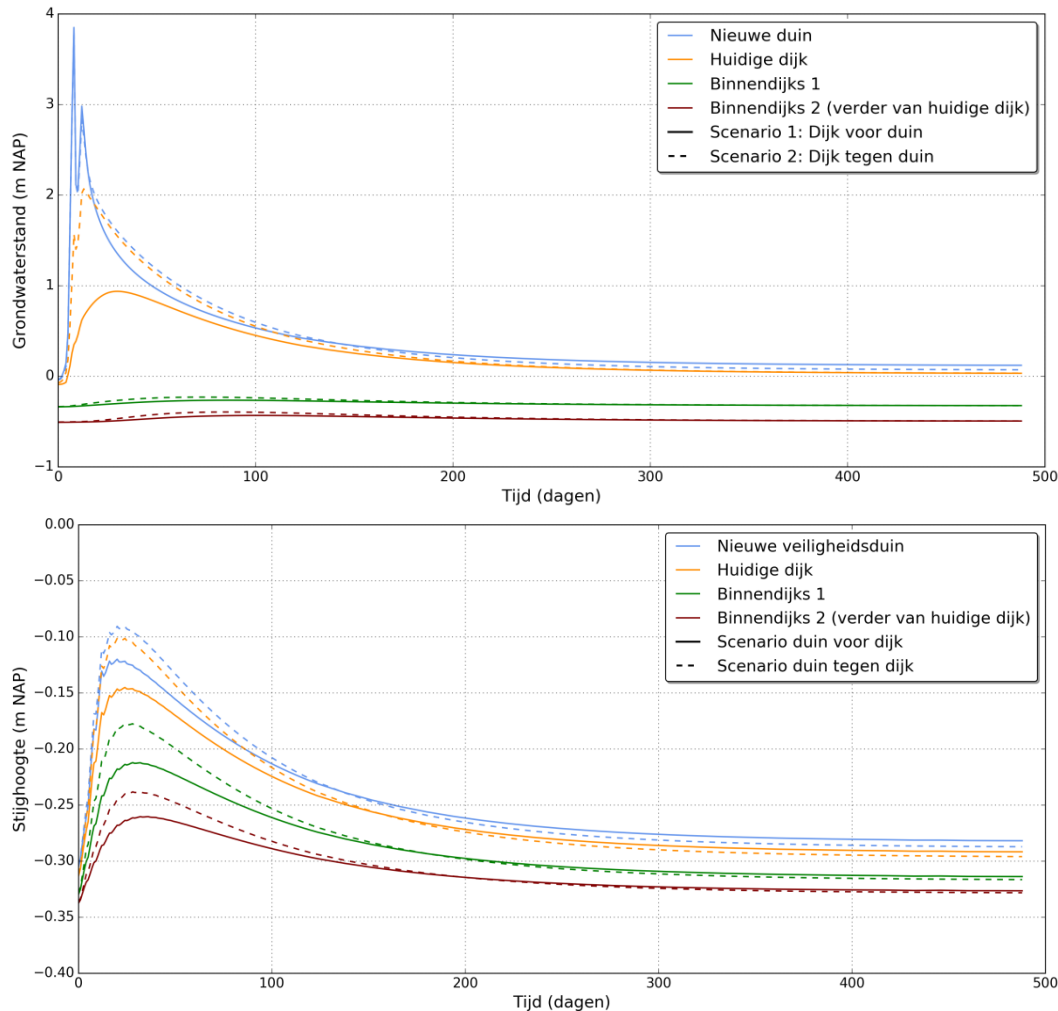
De berekende hydrologische effecten en de afgeleide effecten zijn in onderstaande paragrafen weergegeven.

6.4.1 Hydraulisch aanbrengen tot NAP + 4 m in plaats van NAP + 8 m

Afbeelding 6.7 geeft de berekende effecten in dit alternatieve scenario weer voor raai 1. De y-as is aangepast ten opzichte van afbeelding 6.2. Het berekende binnendijkse effect in het beschermd natuurmonument Ceres is een verhoging van circa 0,05 m, dat is een ongeveer een halvering van het effect ten opzichte van het basisscenario. Dit alternatief laat dus zien dat een vermindering van de effecten mogelijk is, maar dat hydrologische effecten wel zichtbaar blijven. Daarmee is een negatief effect op de natuurwaarden in het beschermd natuurmonument Ceres en de landbouw niet uitgesloten.



Afbeelding 6.7 Berekende grondwaterstand en stijghoogte in de 1^{ste} watervoerende laag in de tijd langs raai 1



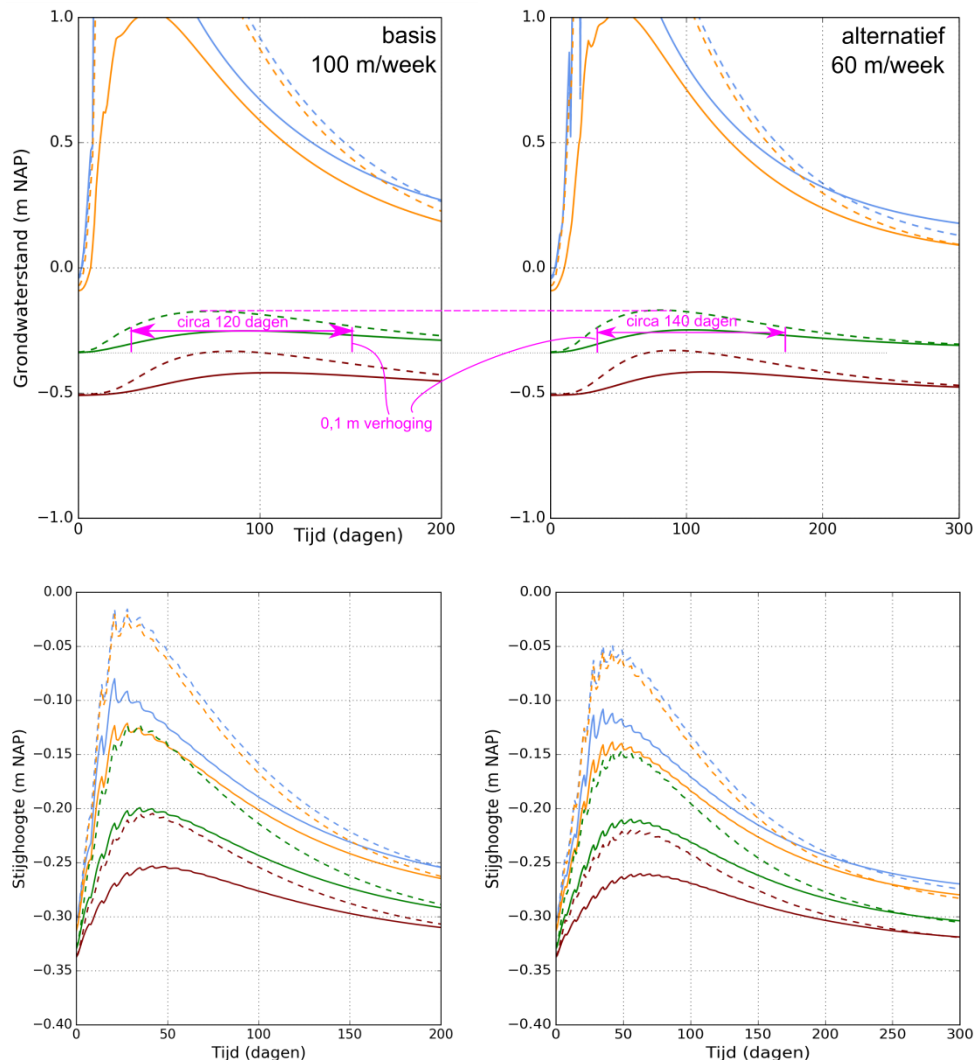
De effecten langs de andere raaien vertonen eenzelfde beeld als bij raai 1 en zijn daarom niet opgenomen.

6.4.2 Een halvering van de aanlegssnelheid

Afbeelding 6.8 geeft een vergelijking weer van de berekende effecten in het basis scenario (links, 100 m/week) en het alternatief met een lagere aanlegssnelheid (rechts, 60 m/week). Via de paarse lijnen is aangegeven dat de top van de berekende effecten gelijk is, de periode met een berekende verhoging van 0,1 m bij een lagere aanlegssnelheid circa 20 dagen langer is. Doordat de werkzaamheden langer nabij de locatie duren, neemt de duur van de effecten toe. Dit is negatief voor de afgeleide effecten. De lagere aanlegssnelheid heeft een klein effect op de stijghoogte in de 1^{ste} watervoerende laag, deze daalt met ca. 0,025 m. Hiermee is de invloed op zoute kwel en opbarsten nagenoeg gelijk in beide situaties.



Afbeelding 6.8 Berekende grondwaterstand en stijghoogte in de tijd langs raai 1



6.4.3 Toepassen bemaling

Via bemaling in het eerste watervoerende pakket kan de kwelstroom naar het achterland worden beheerst. Via actieve bemaling met pompen kan een zelf gekozen peil worden gehandhaafd. Een alternatief is om alleen filters te plaatsen die onder vrij verval afwateren, de bovenzijde van de buis is dan gelijk aan de maximale stijghoogte ter plaatse van het filter.

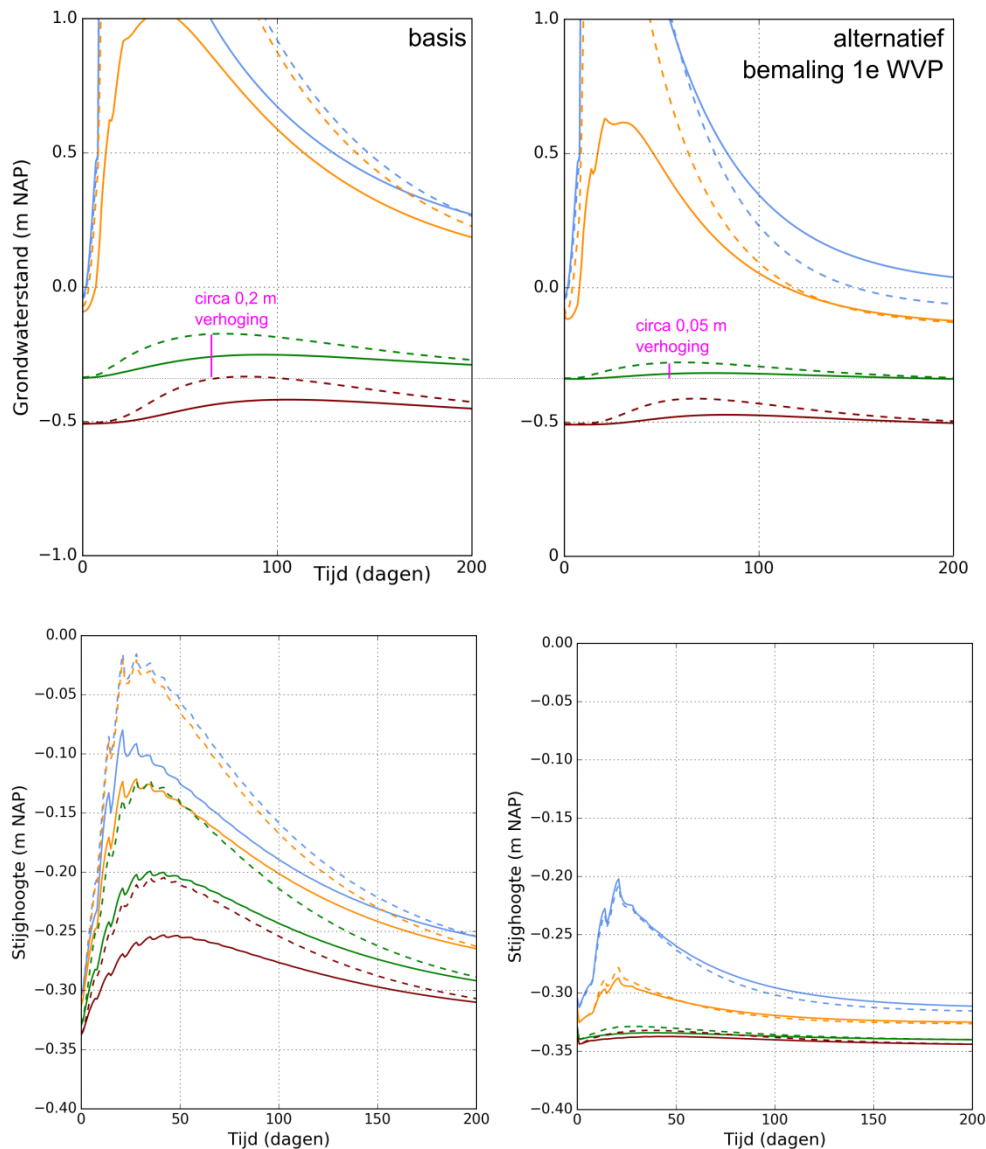
In dit alternatief is er modelmatig voor gekozen om de huidige stijghoogte in het eerste watervoerende pakket ter plaatse van de huidige dijk te handhaven. Afbeelding 6.9 laat zien dat de berekende stijging in het beschermd natuurmonument Ceres van circa maximaal 0,2 m daalt 0,05 m voor de variant duin tegen dijk (stippellijn). Voor de variant duin voor dijk (doorgetrokken lijn) is de berekende stijging in het alternatief minder dan 0,05 m. Dit verschil ontstaat door de horizontale stroming door de huidige dijk naar het achterland. Naar verwachting kan deze stroming via ondiepe bemaling ook worden weggenomen. De stijghoogte wordt beheerst, waardoor verder



landinwaarts de stijghoogte bijna niet verandert ten opzichte van de startsituatie. Hiermee wordt het risico op toename van zoute kwel en opbarsten gemitigeerd.

Naar verwachting treden bij toepassing van bemaling geen afgeleide effecten op, omdat alle hydrologische effecten zijn weg te nemen.

Abbeelding 6.9 Berekende grondwaterstand en stijghoogte in de tijd langs raai 1



6.5 Monitoring

Het uitvoeren van monitoring van de grondwaterstand en -kwaliteit in huidige situatie is een belangrijke factor voor een succesvolle beoordeling van de effecten tijdens de uitvoering. Het waterschap is gestart met een eerste aanzet voor de monitoring, zie paragraaf 2.4. Het is mogelijk dat dit monitoringsnetwerk nog verder wordt uitgebreid in de toekomst.



Op circa 7 locaties achter de dijk worden al enkele jaren de zoutconcentraties in het oppervlaktewater gemeten in het kader van de KRW. Op deze locaties wordt elke 3 jaar maandelijks gemeten. Hierdoor zijn dus steeds 2 jaren waarin niet wordt gemeten. Het is daarom belangrijk om te zorgen dat in het jaar van realisatie en het opvolgende jaar ook bij deze meetpunten wordt gemeten.

6.6 Conclusie en aanbeveling

Op basis van ervaring zijn een basisscenario voor de aanlegfase en verschillende alternatieven bedacht en doorgerekend.

In het basisscenario zijn de berekende effecten voor zowel duin voor dijk als duin tegen dijk het volgende:

- een verhoging van de kweldruk in het achterland, die leidt tot hogere grondwaterstanden (circa 0,2 m in het beschermd natuurmonument Ceres) en/of een toename van de afvoer door de perceelsdrainage in landbouwgebied. In de modellering is aangehouden dat de afvoercapaciteit hiervoor voldoende is, dit moet voorafgaand aan de uitvoering worden gecontroleerd in het veld. Een beheersmaatregel is om de perceelsdrainage door te spuiten of eventueel te vervangen. Als de werkzaamheden worden uitgevoerd in de zomer of een relatief droge winter, dan kan deze verhoging wegvallen in de jaarlijkse natuurlijke fluctuatie. Echter, in een normale en natte winter kan een niet-natuurlijke grondwaterstand ontstaan;
- een toename van de zoutvracht. Dit vermindert de dikte van de zoetwater lens onder de percelen en is daarom een negatief effect voor zowel landbouw als natuur. Het is belangrijk te benoemen dat zoutwateroverlast vertraagd optreedt, in tegenstelling tot wateroverlastproblemen.

Duin voor dijk en duin tegen dijk zijn onderscheidend voor de effecten in de huidige dijk. In de huidige modellering infiltreert het water direct van het veiligheidsduin in de huidige dijk, waardoor bij de variant duin tegen dijk een grondwaterstand wordt berekend in zowel sectie 8 als de huidige dijk die boven de grenswaarde ligt. Dit kan beheerst worden door de interactie tussen het hydraulisch aanbrengen en de huidige dijk nader te analyseren, via bemaling, of door minder hoog of op grotere afstand van dijk hydraulisch op te spuiten.

De doorgerekende alternatieven laten zien dat:

- met een lager hydraulisch aanbrengniveau (NAP + 8 m in plaats van NAP + 4 m) de hydrologische effecten wel zichtbaar blijven, daarmee is er een negatief effect op de natuurwaarden in het beschermd natuurmonument Ceres en de landbouw niet uitgesloten;
- een lagere aanleg snelheid leidt tot eenzelfde maximale verhoging in het achterland, waarbij de tijdsduur toeneemt;
- het toepassen van bemaling in het eerste watervoerende pakket leidt tot een vermindering van de hydrologische effecten. Als ook freatische bemaling wordt toegepast, dan zijn naar verwachting alle effecten uit te sluiten.

Aanbevolen wordt om de aannemer te vragen om:

- vooraf aan te tonen dat zijn aanleg methode niet tot negatieve afgeleide effecten op de omgeving leidt, of dat hij hierover vooraf overeenstemming bereikt met de perceelseigenaren;
- vooraf inzicht te geven in de onzekerheden in deze analyse;



- een monitoringsprogramma te starten inclusief actiewaarden en concrete beheersmaatregelen inclusief een beschouwing van de effectiviteit van deze maatregelen.



7 Conclusie

Doel

Het doel van dit onderzoek is om een nadere berekening te maken van de hydrologische en afgeleide effecten van de aanleg- en gebruiksfase van de Prins Hendrikzanddijk. Dit omvat zowel de waterkwantiteit als -kwaliteit.

Methode

Het geohydrologische effect voor de duin voor dijk en duin tegen dijk oplossing is berekend met een lokaal grondwatermodel dat is gebaseerd op het regionale grondwatermodel van Texel en lokaal uitgevoerd veldwerk. Het model is geschikt voor het maken van verschil berekeningen voor de grondwaterkwantiteit en -kwaliteit.

Het effect is beoordeeld in 2025 en 2085 in vergelijking met de autonome ontwikkeling in diezelfde jaren. Dit omvat zeespiegelrijzing en klimaateffect voor neerslag en verdamping.

Effect grondwaterstand en -kwaliteit

Voor beide oplossingen wijzigt de freatische grondwaterstand met minder dan 0,05 m ten opzichte van de referentiesituatie (zelfde ontwikkeling maar zonder aanleg van de Prins Hendrikzanddijk) ter plaatse van de landbouw percelen en in het beschermd natuurmonument Ceres. Dit effect is kleiner dan het eerder berekende effect (Witteveen+Bos 2013) vanwege de verbeterde modelopzet. De grootte van het invloedsgebied is voor beide scenario's (duin voor dijk en duin tegen dijk) vergelijkbaar. De scenario's hebben beide geen merkbaar effect op de kwelstroom.

De chloride concentratie neemt in 2085 tot circa 600 m afstand van de dijk af, door grondwateraanvulling op het veiligheidsduin. In de situatie met duin voor dijk treedt over een groter gebied verzoeting op dan in de situatie met duin tegen dijk, omdat de Waddenzee verder weg komt te liggen en omdat het veiligheidsduin een groter inzigingsgebied creëert. De verlaging van de concentratie is maximaal circa 12.500 mg/L en neemt af met een toenemende afstand vanaf de Waddenzee. In de Prins Hendrikpolder blijft het freatische grondwater volgens de berekening desondanks brak, namelijk boven de 2.000 mg/l. Ter plaatse van het beschermd natuurmonument Ceres is de grondwaterkwaliteit veelal brak water (2.000 - 5.000 mg/l). De afname van de zoutflux betekent dat de kansen voor de ontwikkeling van een lokale zoetwaterbel toenemen.

Afgeleid effect op landbouw en natuur

Beide scenario's hebben geen negatief effect voor de landbouwpercelen, omdat geen merkbare verandering van de freatische grondwaterstand optreedt; de kwelstroom niet wijzigt en de chloride concentratie afneemt.

Beide scenario's hebben geen negatief effect op de abiotische randvoorwaarden in het beschermd natuurmonument Ceres. In beide scenario's wijzigt de grondwaterkwantiteit niet merkbaar. De berekende chloride concentratie in het freatisch grondwater neemt af, maar blijft nog steeds brak. Er is geen negatief effect op de zoete standplaatscondities die blijkens de aanwezige soorten voorkomen in Ceres, omdat deze niet gekoppeld zijn aan de brakke kwelstroom maar aan de zoet



waterlens. Doordat het freatisch brak blijft, blijven overgangen van brak naar zoet in het gebied aanwezig.

Aanlegfase

Op basis van ervaring zijn een basisscenario voor de aanlegfase en verschillende alternatieven bedacht en doorgerekend. Een nadere beoordeling van de effecten moet door de aannemer worden gemaakt. In het basisscenario zijn de berekende effecten voor zowel duin voor dijk als duin tegen dijk het volgende:

- een verhoging van de kweldruk in het achterland, die leidt tot hogere grondwaterstanden (circa 0,2 m in beschermd natuurmonument Ceres) en/of een toename van de afvoer door de perceelsdrainage in landbouwgebied. In de modellering is aangehouden dat de afvoercapaciteit hiervoor voldoende is, dit moet voorafgaand aan de uitvoering worden gecontroleerd in het veld. Een beheersmaatregel is om de perceelsdrainage door te spuiten of eventueel te vervangen. Als de werkzaamheden worden uitgevoerd in de zomer of een relatief droge winter, dan kan deze verhoging wegvallen in de jaarlijkse natuurlijke fluctuatie. Echter, in een normale en natte winter kan een niet-natuurlijke grondwaterstand ontstaan;
- een toename van de zoutvracht, ook door nalevering vanuit het veiligheidsduin. Dit vermindert de dikte van de zoetwater lens onder de percelen en is daarom een negatief effect voor zowel landbouw als natuur.

Duin voor dijk en duin tegen dijk zijn onderscheidend voor de effecten in de huidige dijk. In de huidige modellering infiltreert het water direct van het veiligheidsduin in de huidige dijk, waardoor bij de variant duin tegen dijk een grondwaterstand wordt berekend in zowel sectie 8 als de huidige dijk die boven de grenswaarde ligt. Dit kan beheerst worden door de interactie tussen het hydraulisch aanbrengen en de huidige dijk nader te analyseren, via bemaling, of door minder hoog of op grotere afstand van dijk hydraulisch op te spuiten.

De doorgerekende alternatieven laten zien dat:

- met een lager hydraulisch aanbrengniveau (NAP + 8 m in plaats van NAP + 4 m) de hydrologische effecten wel zichtbaar blijven, daarmee is er een negatief effect op de natuurwaarden in het beschermd natuurmonument Ceres en de landbouw niet uitgesloten;
- een lagere aanleg snelheid leidt tot eenzelfde maximale verhoging in het achterland, waarbij de tijdsduur toeneemt;
- het toepassen van bemaling in het eerste watervoerende pakket leidt tot een vermindering van de hydrologische effecten. Als ook freatische bemaling wordt toegepast, dan zijn naar verwachting alle effecten uit te sluiten.

Aanbevolen wordt om de aannemer te vragen om:

- vooraf aan te tonen dat zijn aanleg methode niet tot negatieve afgeleide effecten op de omgeving leidt, of dat hij hierover vooraf overeenstemming bereikt met de perceelseigenaren;
- hiervoor is het vereist om gedetailleerdere berekeningen te maken voor de aanlegfase dan in deze rapportage. De rapportage moet inzicht geven in de onzekerheden in deze analyse;
- een monitoringsprogramma te starten inclusief actiewaarden en concrete beheersmaatregelen inclusief een beschouwing van de effectiviteit van deze maatregelen.



8 Referenties

1. Alterra, 2011, Grondwaterregime op basis van karteerbare kenmerken, rapport nummer 2010-41, d.d. 19 februari 2011.
2. Geodelft, 2001, Geotechnisch lengteprofiel.
3. HHNK, 2015, bestand Datamining_HHNK_waterpeilen.lpk aangeleverd op 15 september 2015 per e-mail.
4. KNMI 2014, KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt.
5. KNMI 2015, Seizoenoverzicht zomer 2015, geraadpleegd via <http://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maand-en-seizoensoverzichten/2015/zomer> op 14 september 2015.
6. TNO, 2015, archief gegevens van Dinoloket, gedownload via <https://www.dinoloket.nl/> in september 2015.
7. Wiertsema en Partners, 2015a, Geotechnisch onderzoek, definitief, d.d. 30 juni 2015.
8. Wiertsema en Partners, 2015b, Aanvulling en errata, d.d. 7 augustus 2015.
9. Wiertsema en Partners, 2015c, rapportage waterkwaliteit, d.d. 14 oktober 2015.
10. Witteveen+Bos, 2011, Klimaatonderzoek Texel, d.d. 30 november 2011, kenmerk HHN35-1/kolm/007.
11. Witteveen+Bos, 2013, notitie 'geohydrologisch effect zandige oplossing Prins Hendrikpolder', d.d. 22 november 2013.
12. Witteveen+Bos, 2014, rapport afleiden hydraulische randvoorwaarden met Hydra-K, d.d. 11 september 2014, kenmerk EDM70-14-210/14-017.062.
13. Witteveen+Bos 2015. Bijlage MER Natuur, februari 2015.



Bijlage I Geohydrologische achtergrond informatie

Lokaal grondonderzoek

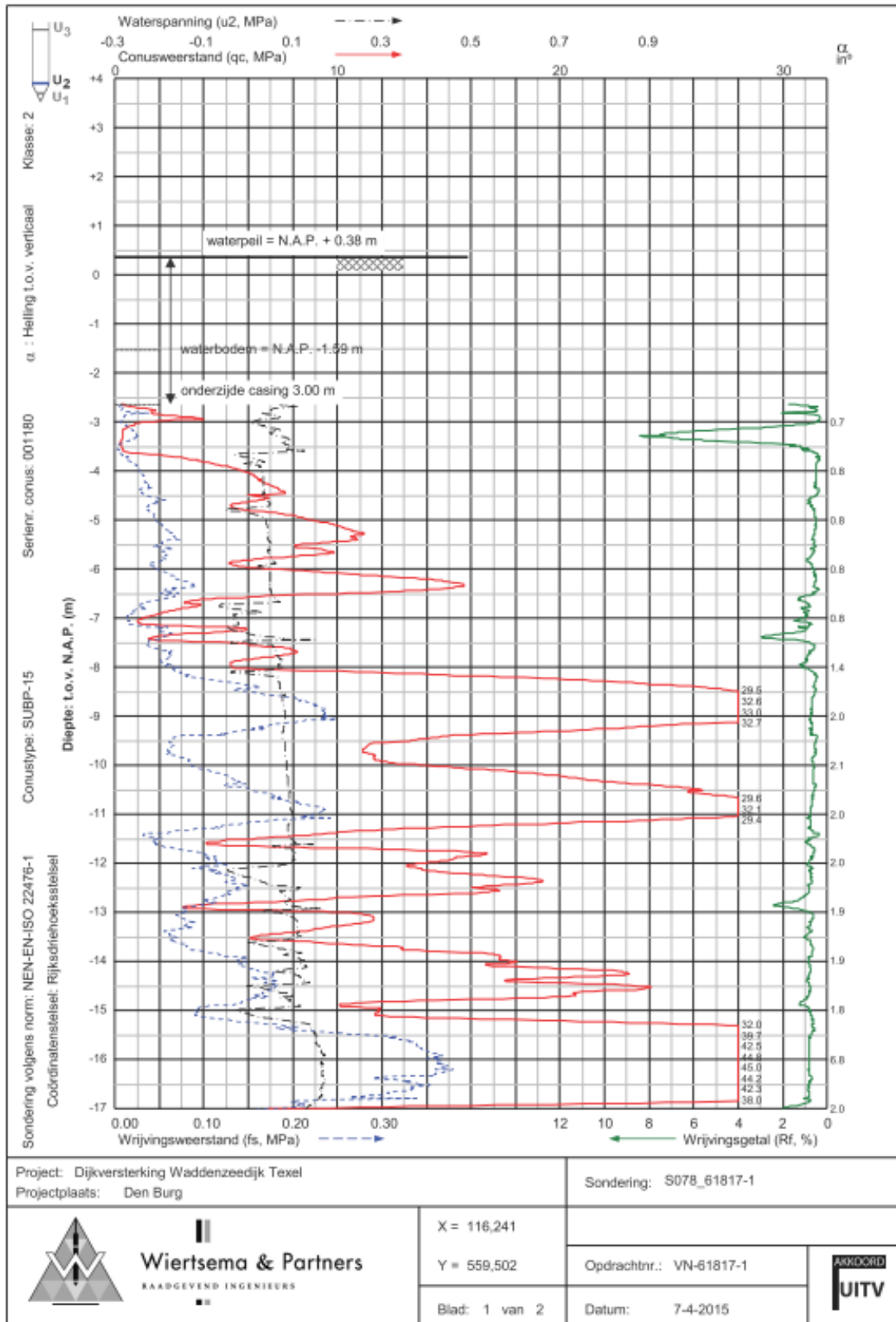
Deze bijlage bevat enkele sonderingen en een boring in het modelgebied. Afbeelding I.1 geeft de locaties weer op kaart.

Afbeelding I.0.1 Kaart locaties sonderingen en boring



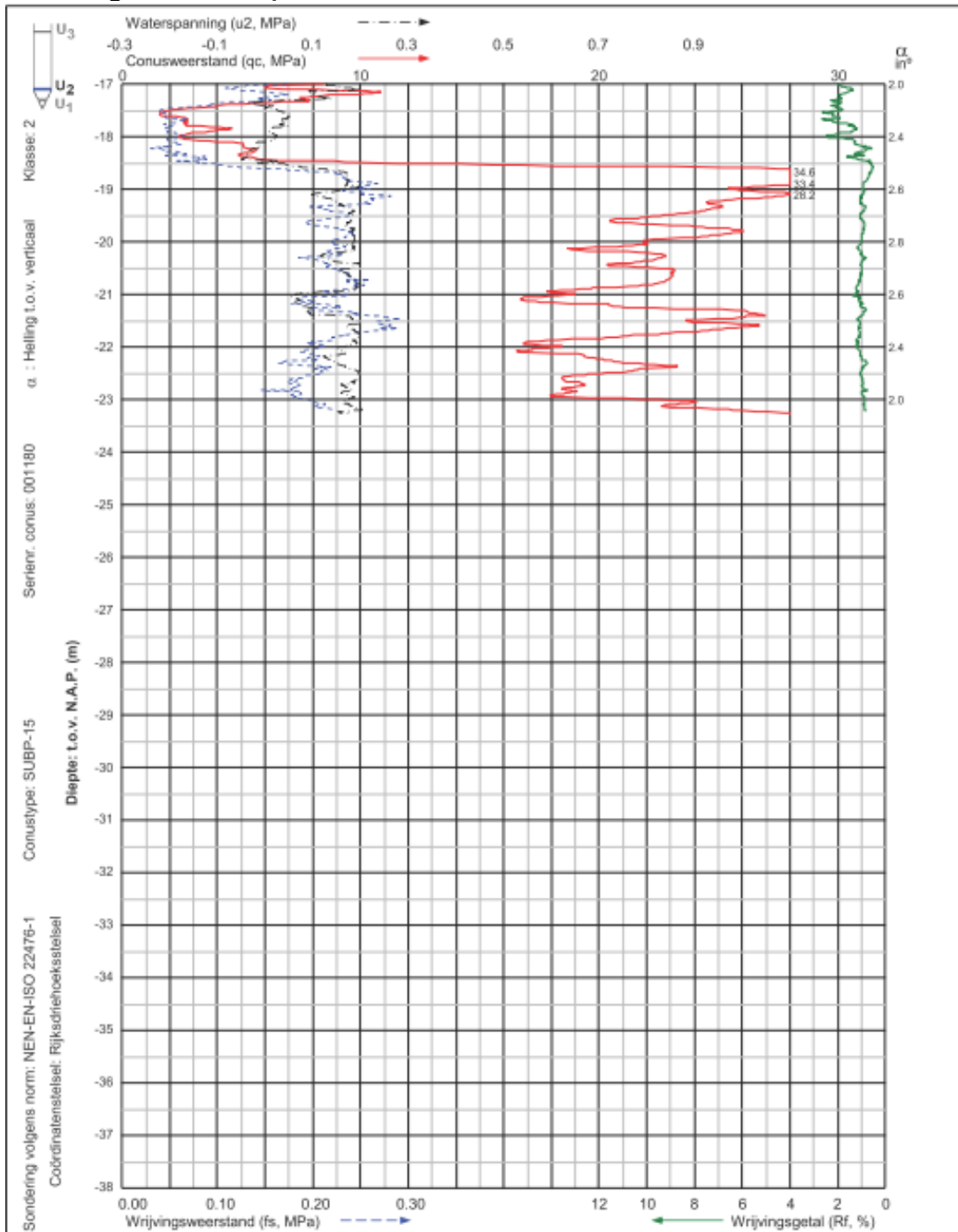


Sondering S078 blad 1/2





Sondering S078 blad 2/2



Project: Dijkversterking Waddenzeedijk Texel
 Projectplaats: Den Burg

Sondering: S078_61817-1



Wiertsema & Partners
 RAADGEVEND INGENIEURS

X = 116,241

Y = 559,502

Blad: 2 van 2

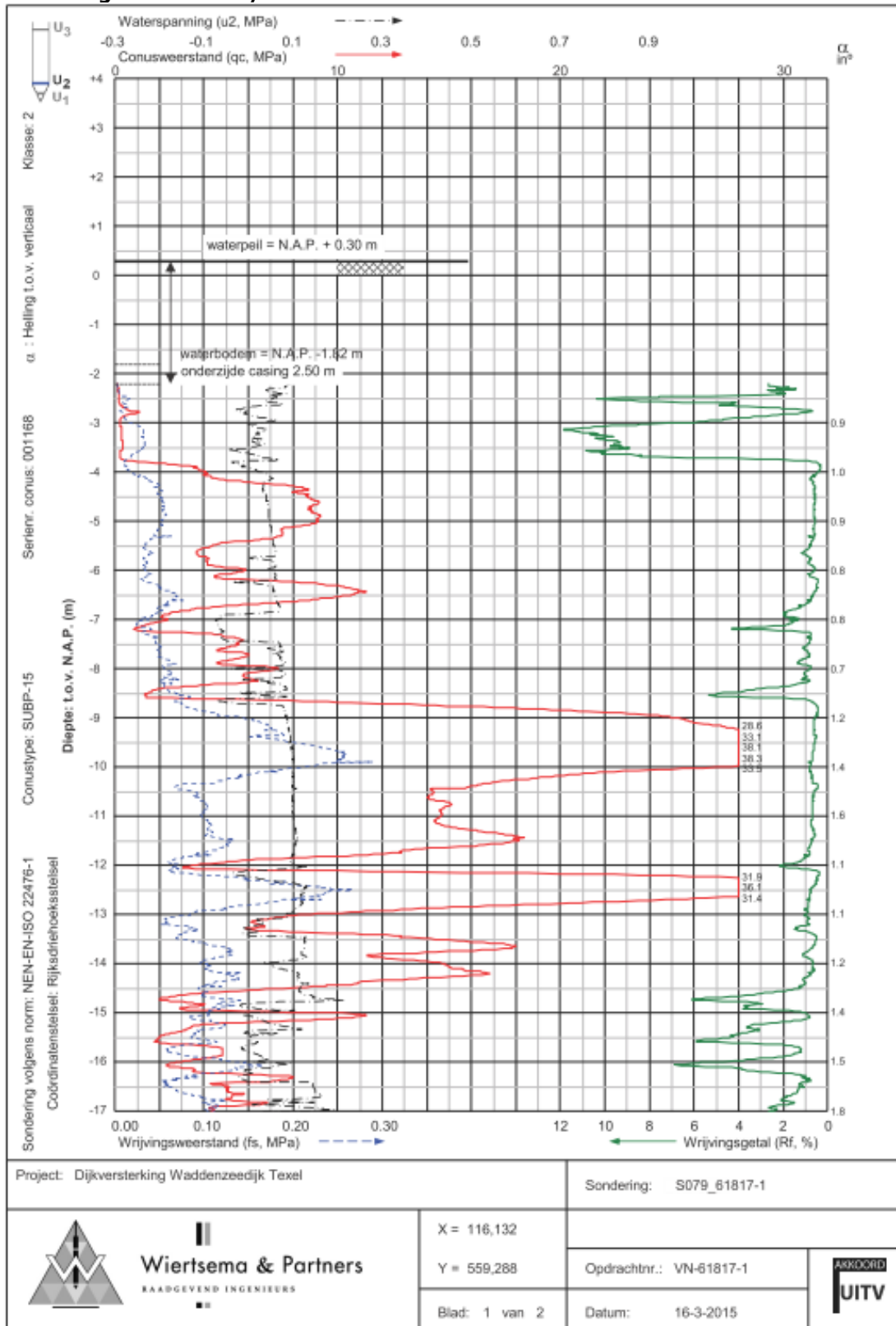
Opdrachtnr.: VN-61817-1

Datum: 7-4-2015



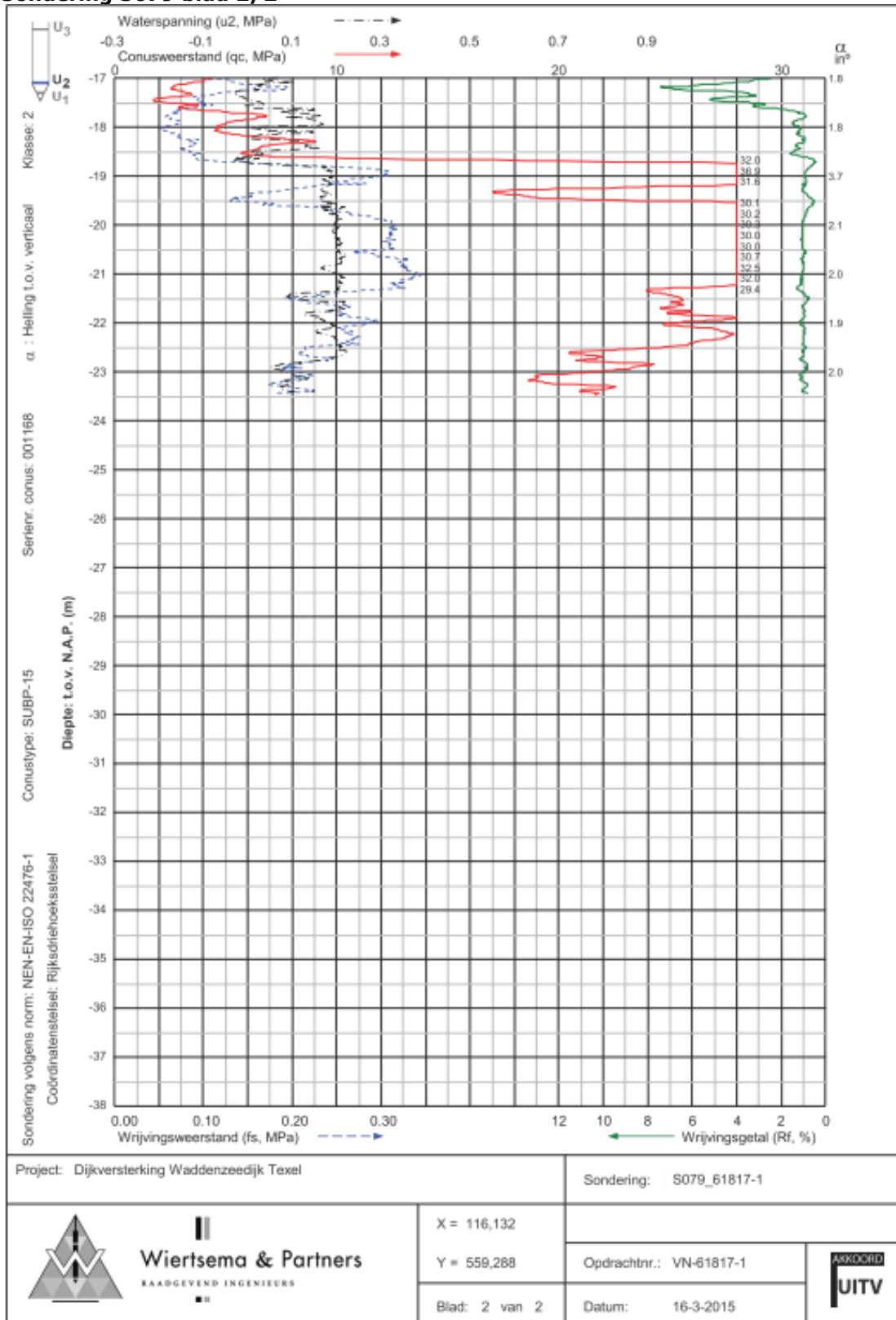


Sondering S079 blad 1/2





Sondering S079 blad 2/2



Project: Dijkversterking Waddenzeedijk Texel

Sondering: S079_61817-1



Wiertsema & Partners
RAADGEVEND INGENIEURS

X = 116,132

Y = 559,288

Blad: 2 van 2

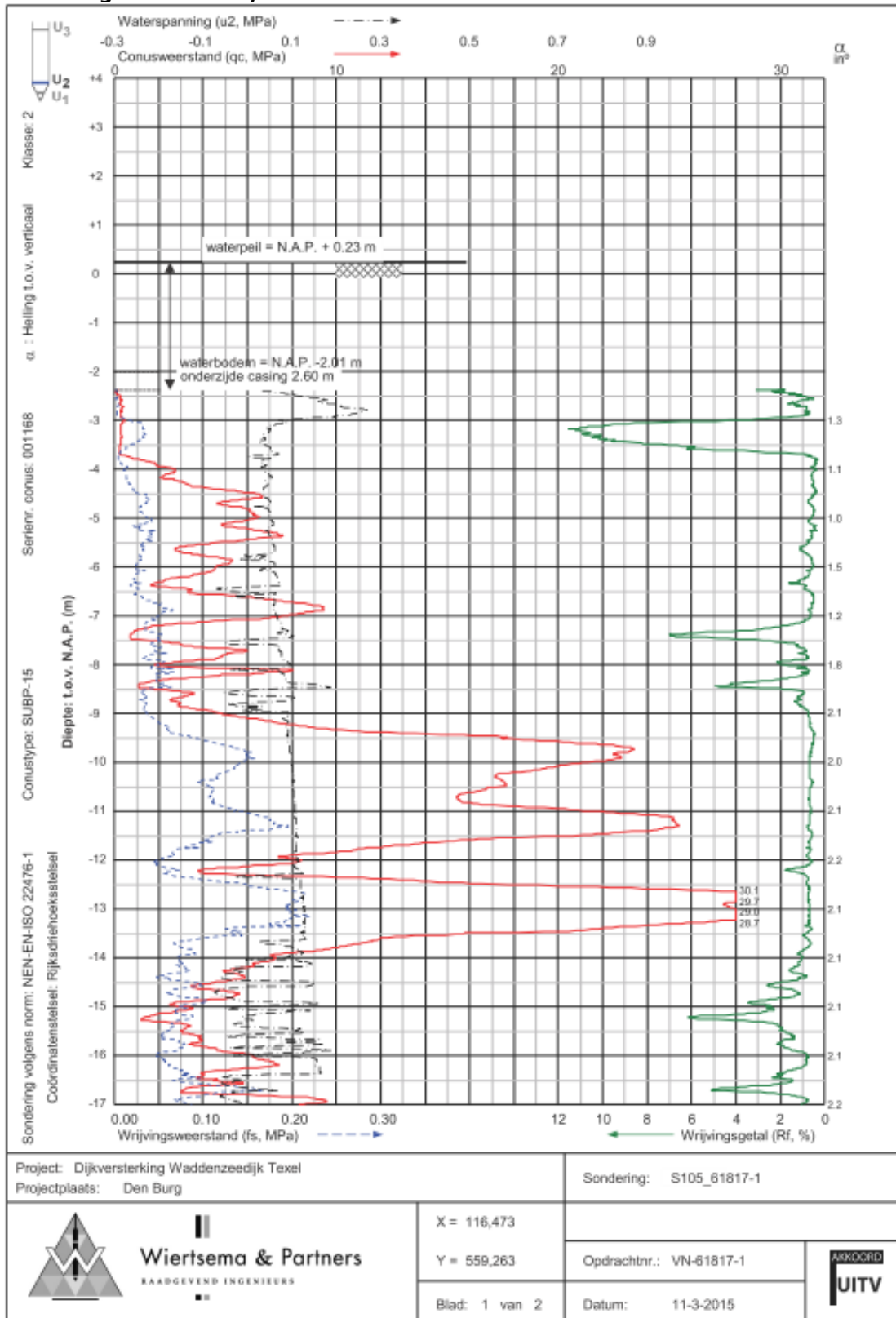
Opdrachtnr.: VN-61817-1

Datum: 16-3-2015



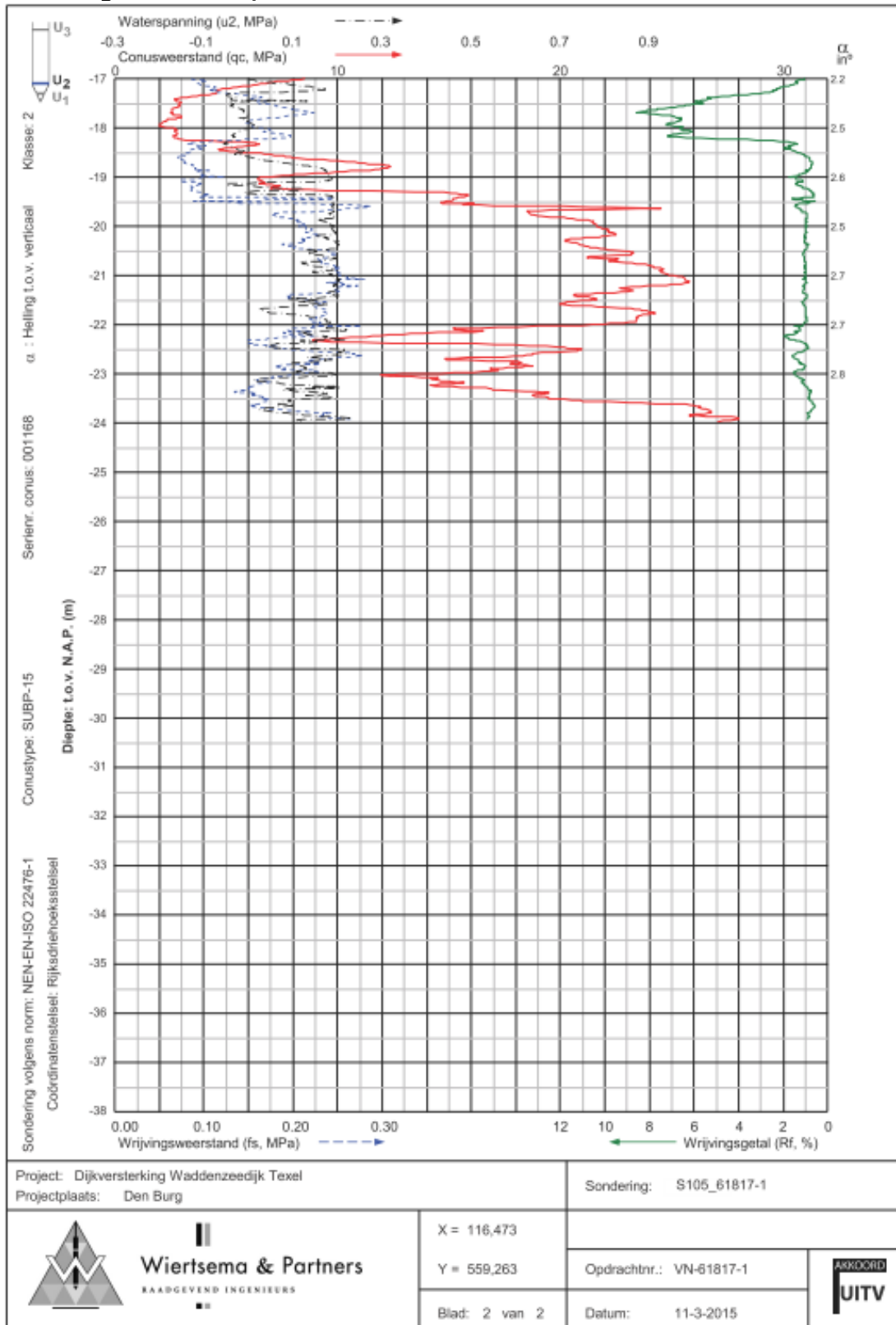


Sondering S105 blad 1/2





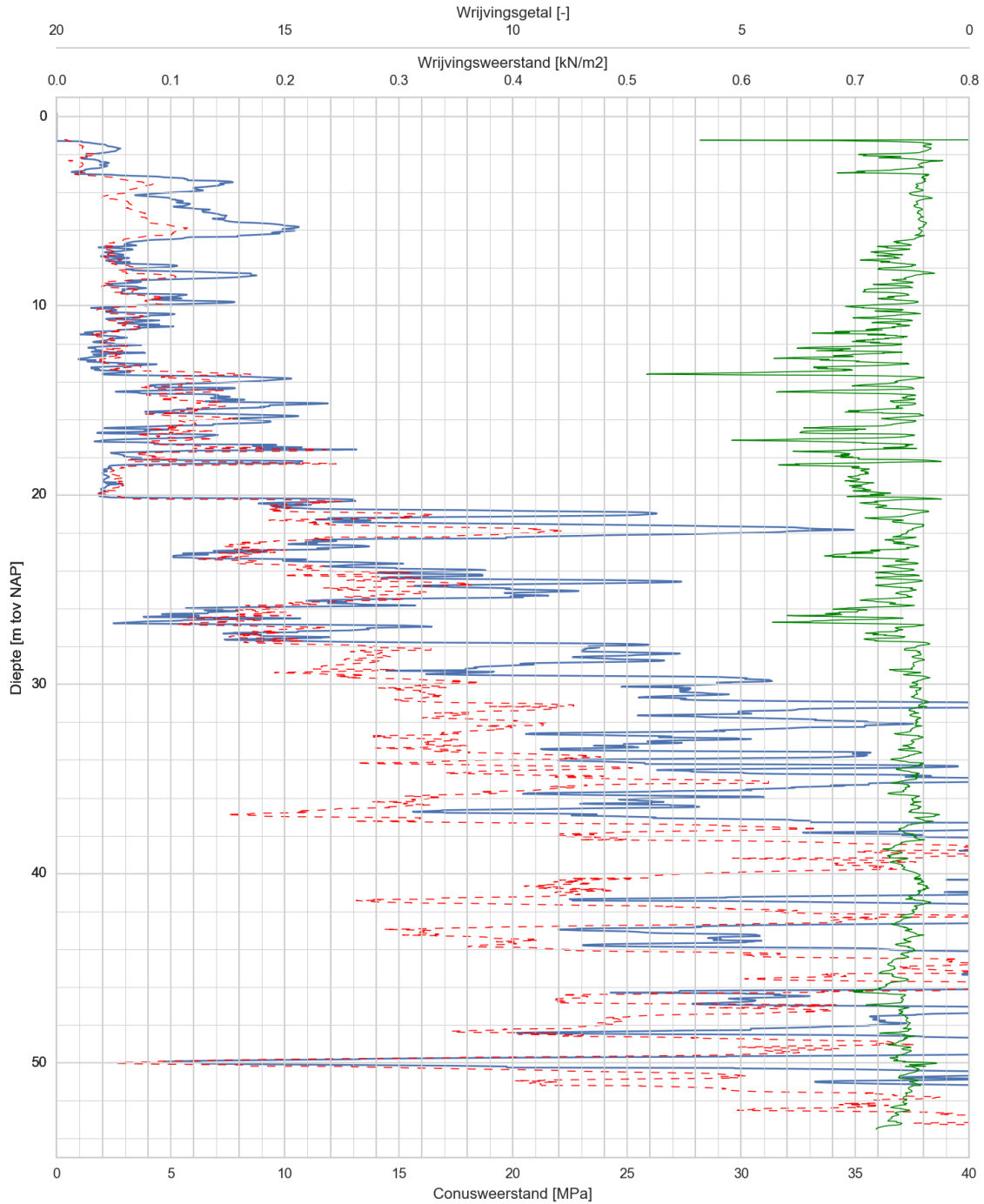
Sondering S105 blad 2/2





Sondering S09D00174

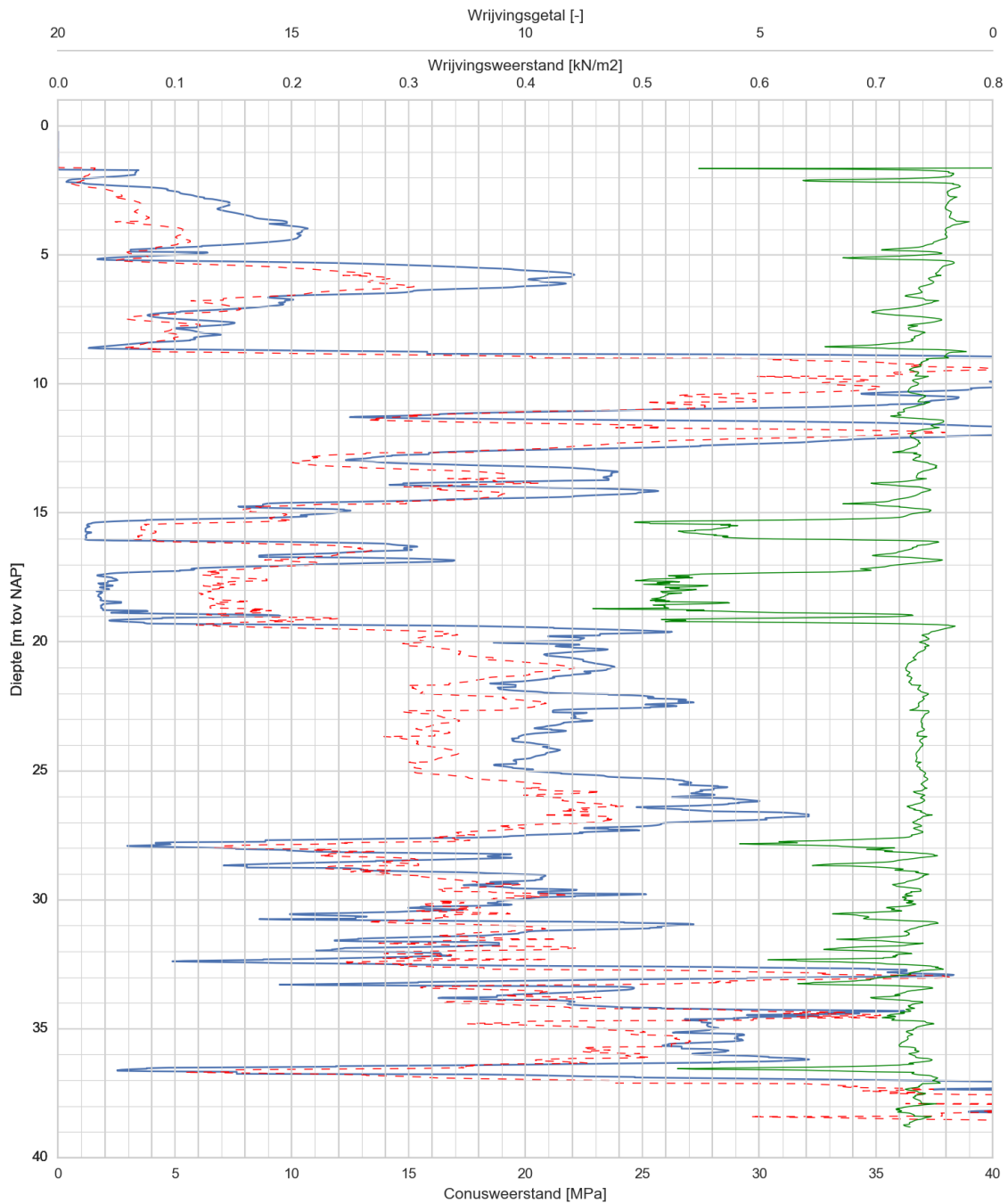
S09D00174





Sondering S09D00175

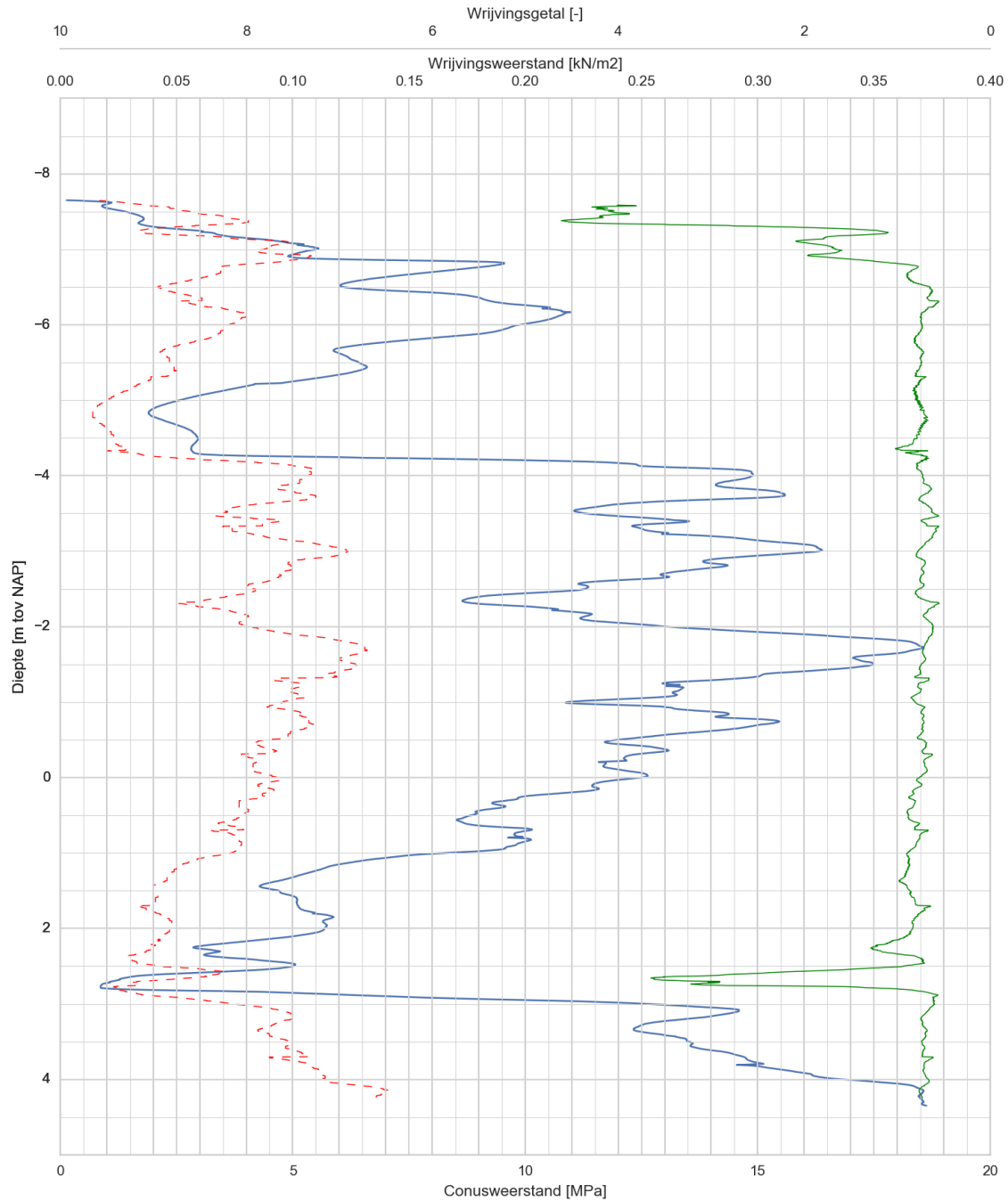
S09D00175





Sondering S09D00236

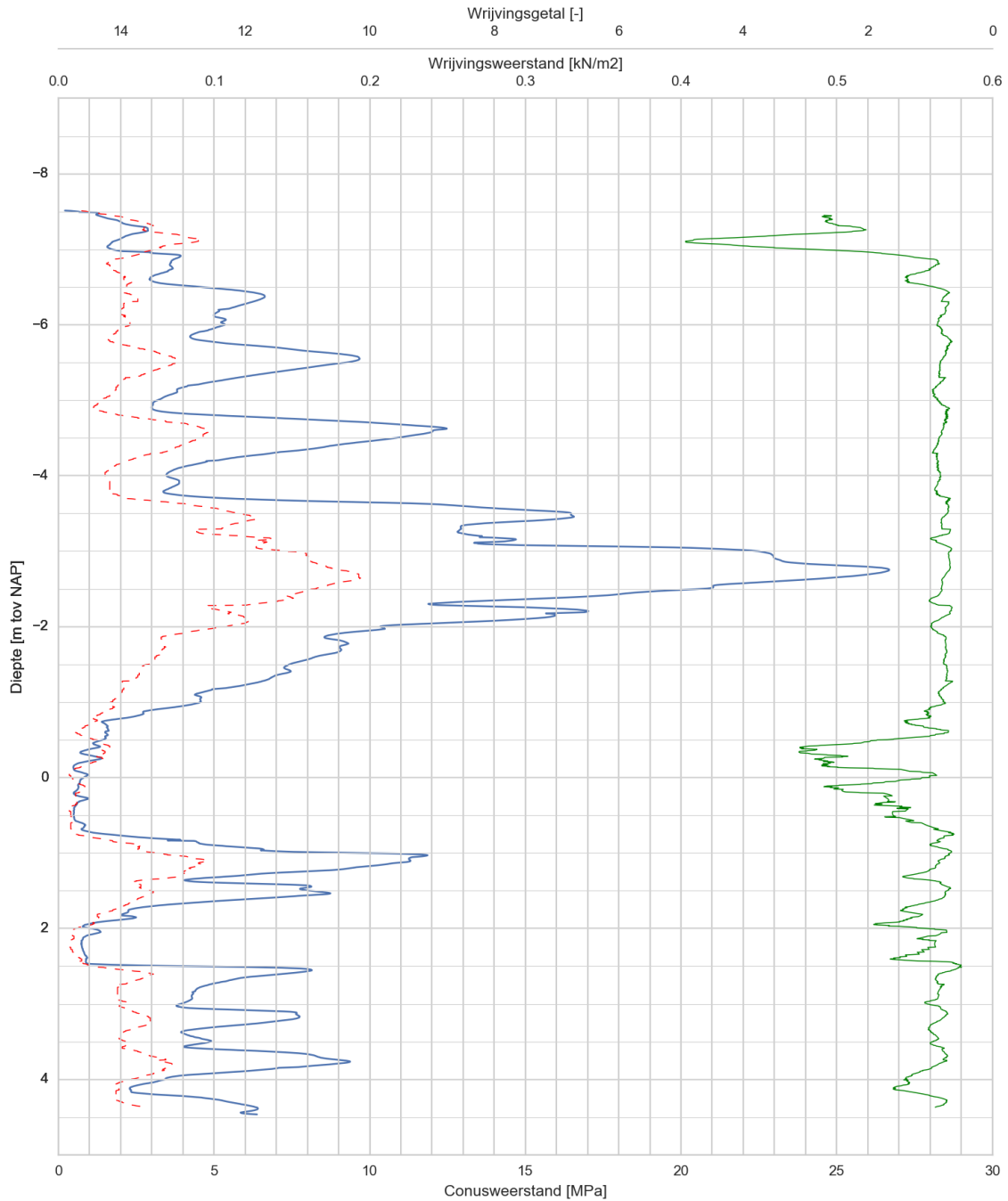
S09D00236





Sondering S09D00239

S09D00239



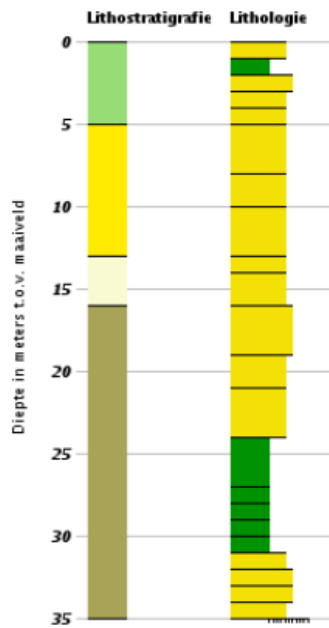


Boormonsterprofiel en interpretatie B09D0268

Coördinaten: 114916, 559251

Maaiveld: 0,01 m t.o.v. NAP

Dieptetraject t.o.v. Maaiveld: 0,00 m - 35,00 m





Kenmerken regionaal grondwatermodel

Tabel I.1 Gemiddelde parameter model Witteveen+Bos (2013) tot NAP -62 m

bovenkant (m NAP)	k_h (m/dag)	k_v (m/dag)	c (dagen), omgerekend van k_v
0	5	0.01	150
-1.5	5	0.01	150
-3	5	0.01	400
-7	5	0.01	500
-12	5	0.0025	4000
-22	30	0.75	13.33333
-32	30	7.5	1.333333
-42	30	7.5	1.333333
-52	30	7.5	1.333333
-62	1	0.25	-248

Tabel I.2 Gemiddelde parameters voor 2 locaties in regionaal model (Witteveen+Bos 2011)

van (m NAP)	tot (m NAP)	k_h (m/dag)	k_v (m/dag)
4,0	3,0	5,0	1,25
3,0	0,0	5,0	1,25
0,0	-1,5	5,0	0,01
-1,5	-3,0	5,0	0,01
-3,0	-7,0	4,478099	0,05
-7,0	-12,0	5,0	0,01
-12,0	-22,0	4,004277	0,01
-22,0	-32,0	3,0	0,75
-32,0	-42,0	16,5	4,1
-42,0	-52,0	30,0	7,5
-52,0	-62,0	30,0	7,5
-62,0	-72,0	0,505	0,13
-72,0	-82,0	30,0	7,5
-82,0	-92,0	30,0	7,5
-92,0	-102,0	30,0	7,5
-102,0	-122,0	4,0	1,0
-122,0	-142,0	4,0	1,0
-142,0	-162,0	4,0	1,0
-162,0	-182,0	4,0	1,0
-182,0	-202,0	4,0	1,0
-202,0	-222,0	30,0	7,5
-222,0	-242,0	30,0	7,5
-242,0	-262,0	10,0	2,5
-262,0	-282,0	1,0	0,25
-282,0	-302,0	10,0	2,5



Tabel I.3 Analyse lokale peilbuizen

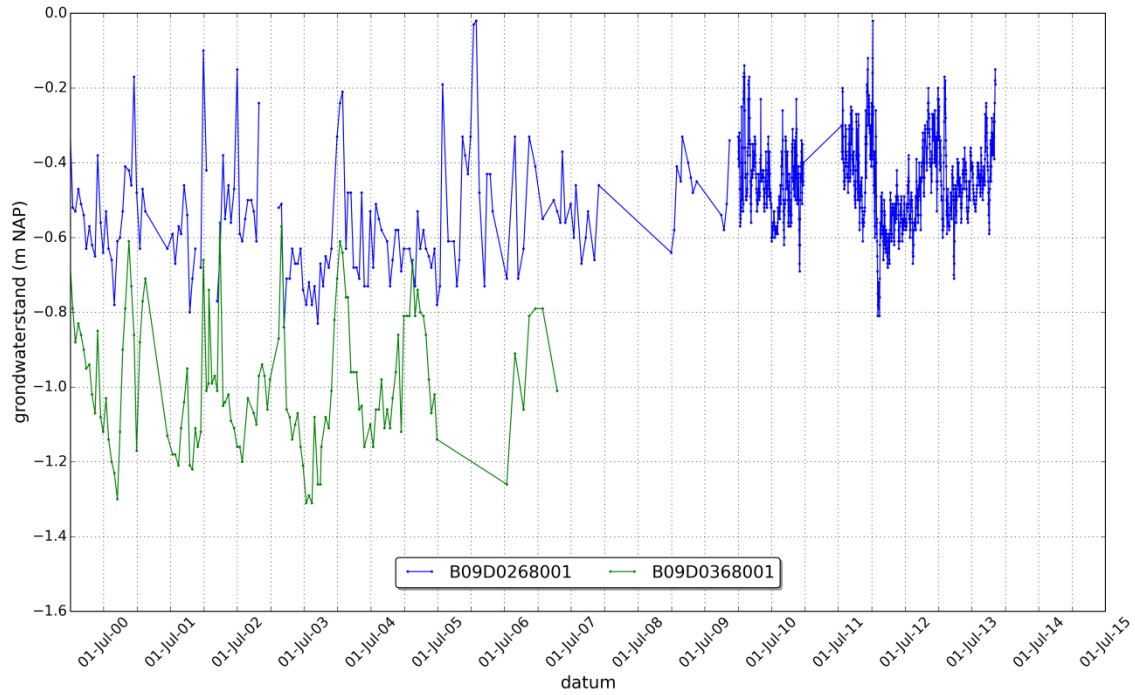
ID	afstand Waddenzee (m)	afstand oppervlaktewater (m)	bovenkant filter (m NAP)	onderkant filter (m NAP)	maaiveld (m NAP)	getijde invloed?	invloed neerslag?
PB138	65	15	-0,13	-1,13	1,61	miniem	minimaal
PB139	70	40	-0,35	-1,35	1,31	miniem	afwijkend
PB140 ⁹	115	7	-2,30	-3,30	0,21	<5	minimaal
PB141	180	4	-0,51	-1,51	-0,04	? ¹⁰	goed
PB142	53	2	-0,49	-1,49	-0,50	<5	minimaal
PB143	14	43	-0,40	-1,40	6,43	<5	minimaal
PB144	167	10	-1,69	-2,69	-0,67	<5	afwijkend
PB145	65	5	-1,50	-2,50	-0,53	<5	goed
PB146	100	1	-1,32	-2,32	-0,80	<10	goed
PB146	100	1	-3,32	-4,32	-0,80	>10	goed
PB147	50	3	-0,52	-1,52	0,13	niet	goed
PB147	50	3	-3,52	-4,52	0,13	>10	goed
PB148	17	37	-0,45	-1,45	6,68	<5	minimaal
PB149	59	0	-0,60	-1,50	-0,47	niet	goed
PB150	141	10	-1,25	-2,25	-1,32	?10	goed
PB151	51	4	-0,44	-1,44	0,42	<5	minimaal
PB152	18	36	-0,25	-1,25	6,51	niet	niet
PB153	66	30	0,15	-0,85	0,29	<5	goed
PB154	64	1	-1,73	-2,73	-0,39	<510	goed
PB155	51	4	-0,54	-1,54	0,41	>10	minimaal
PB156	143	1	-1,15	-2,15	-0,06	<10	minimaal
PB157	51	5	-1,06	-2,06	0,37	<10	minimaal
PB158	17	39	-0,66	-1,66	6,80	>10	minimaal
PB159	47	27	-1,02	-2,02	0,64	<5	goed
PB160	235	8	0,06	-0,94	0,47	<510	goed
PB163	106	44	-0,01	-1,01	4,34	<510	goed
PB164	25	66	-0,05	-1,05	0,86	<5	goed
PB201	176	3	-8,45	-9,45	-0,09	<5	goed
PB202	53	3	-7,62	-8,62	-0,46	miniem	minimaal
PB203	21	33	-5,61	-6,61	7,69	miniem	afwijkend
PB204	142	10	-3,21	-4,21	-1,31	<5	minimaal
PB205	51	8	-3,44	-4,44	0,42	10	goed
PB206	11	45	-2,36	-4,16	3,98	<5	minimaal
PB207	142	1	-2,31	-3,31	-0,07	<5	minimaal
PB208	51	5	-2,25	-3,25	0,43	<5	afwijkend
PB209	10	46	-2,41	-3,41	3,90	<5	goed

⁹ Herijking vereist, verschil op controle datum was 0,13 cm.

¹⁰ Niet duidelijk of het effect van het getijde zichtbaar was.



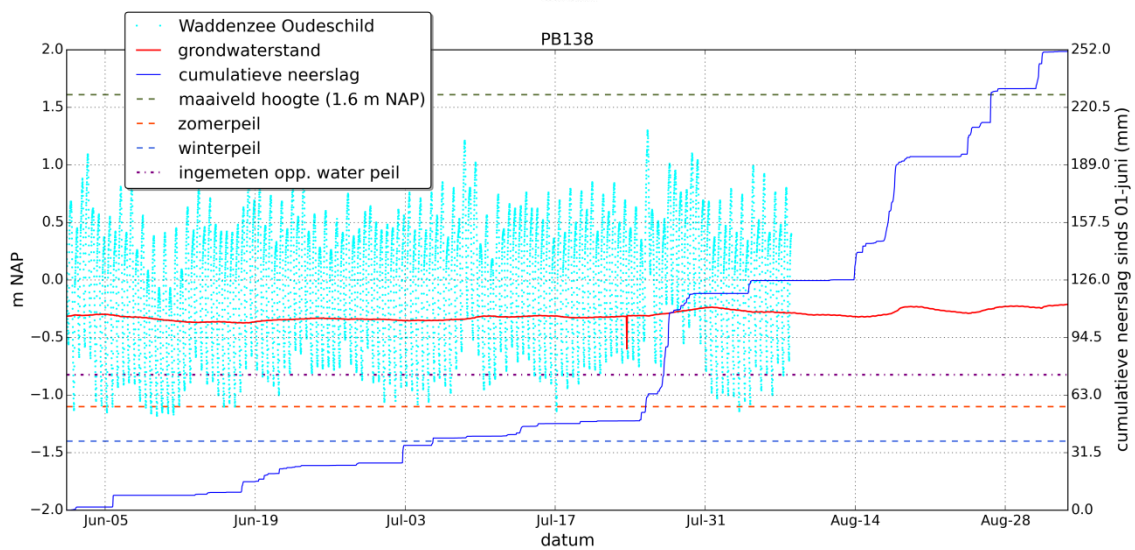
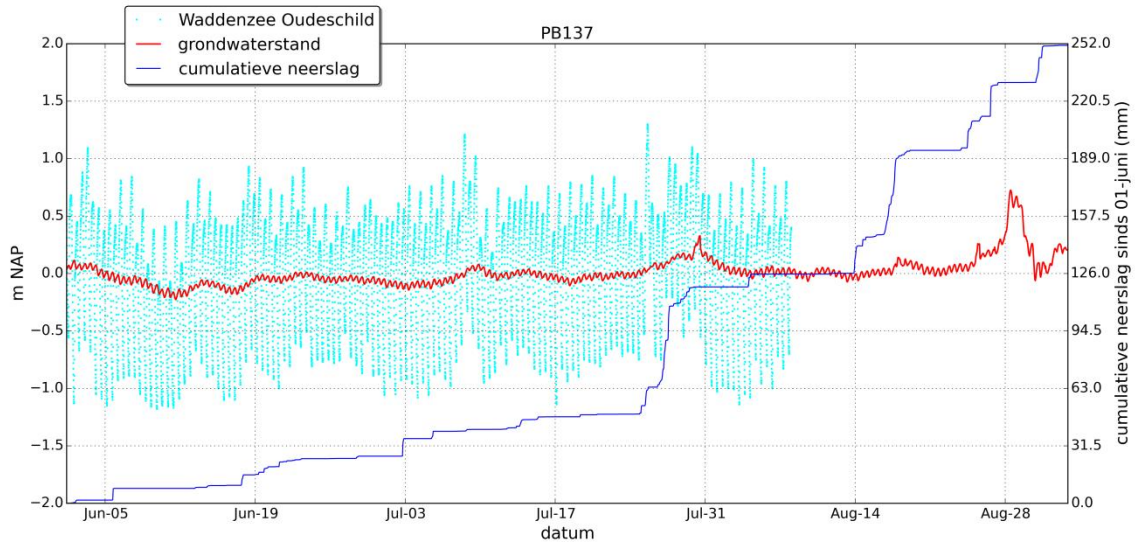
Peilbuis Dinoloket

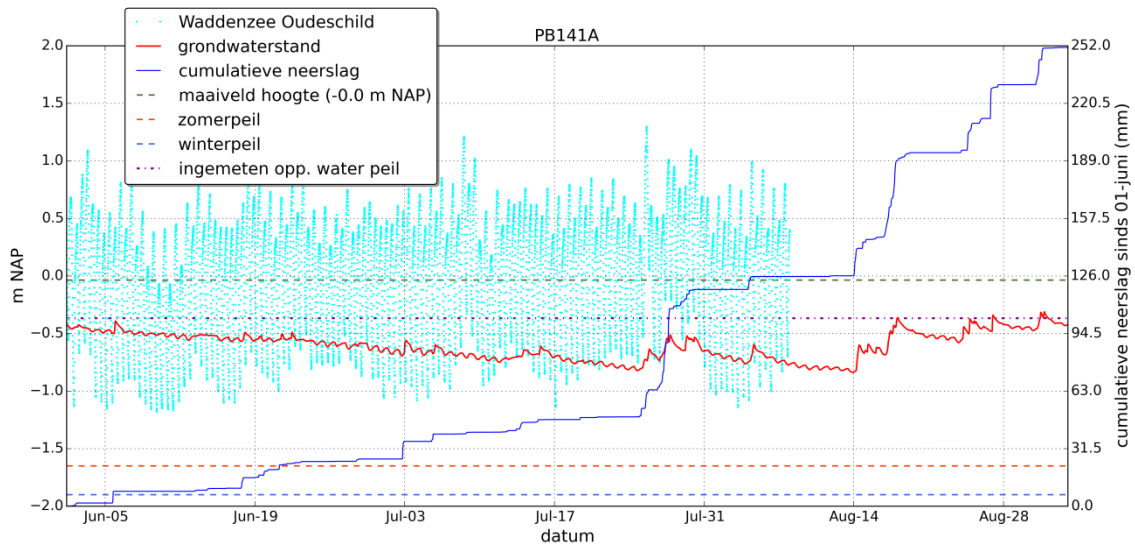
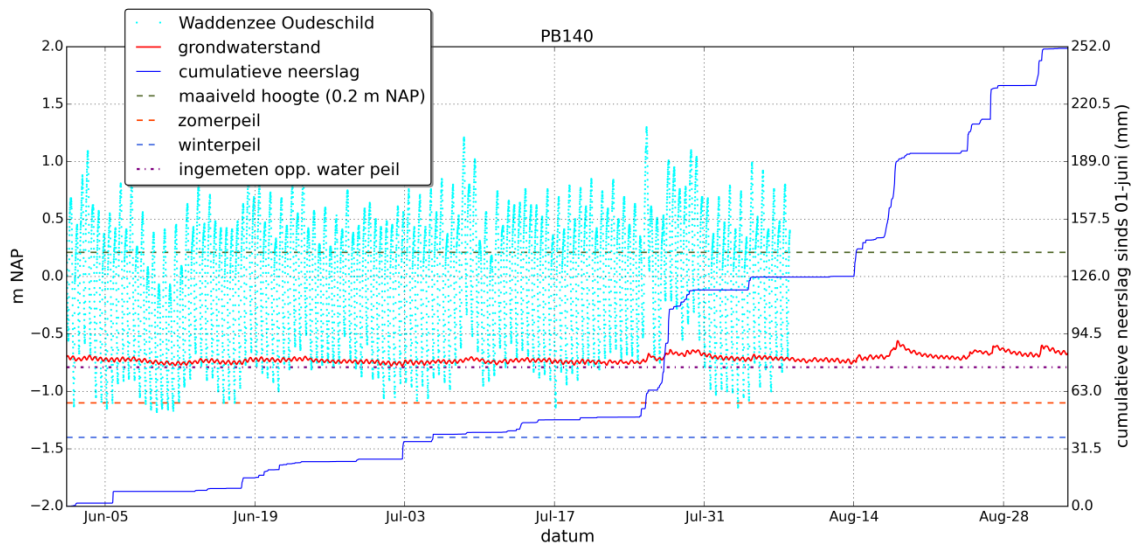
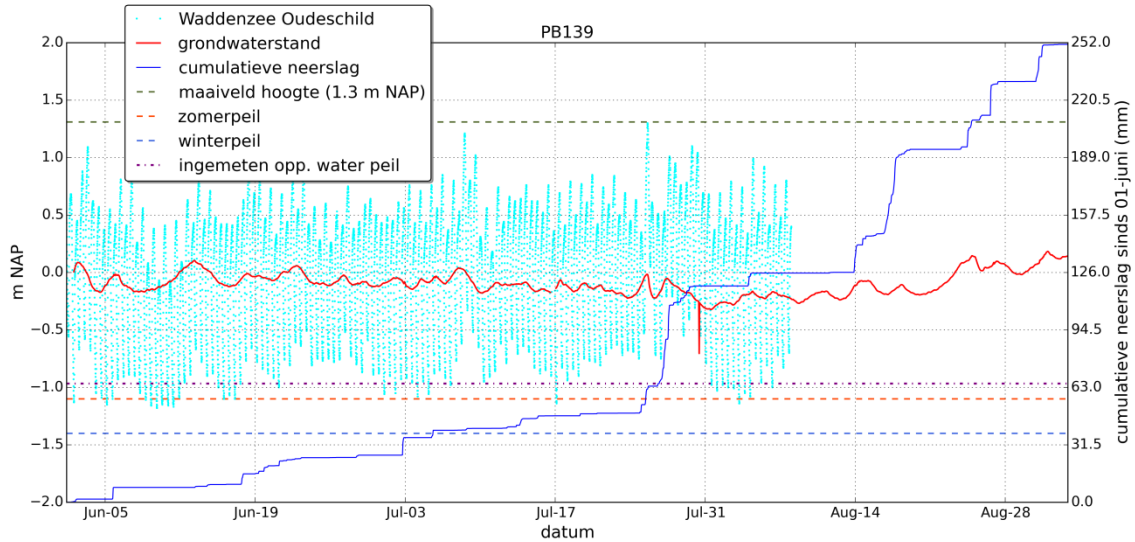


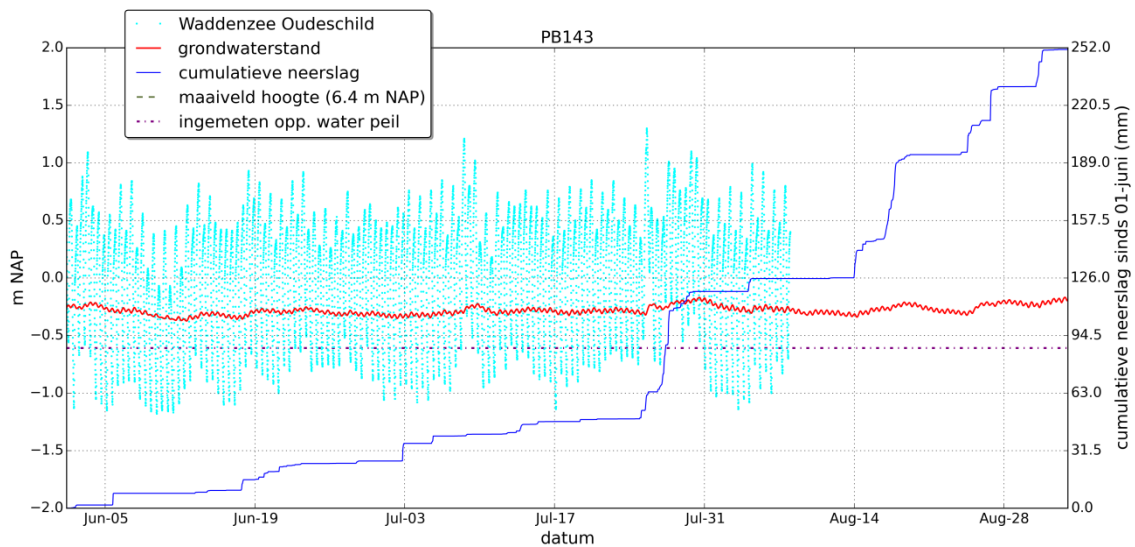
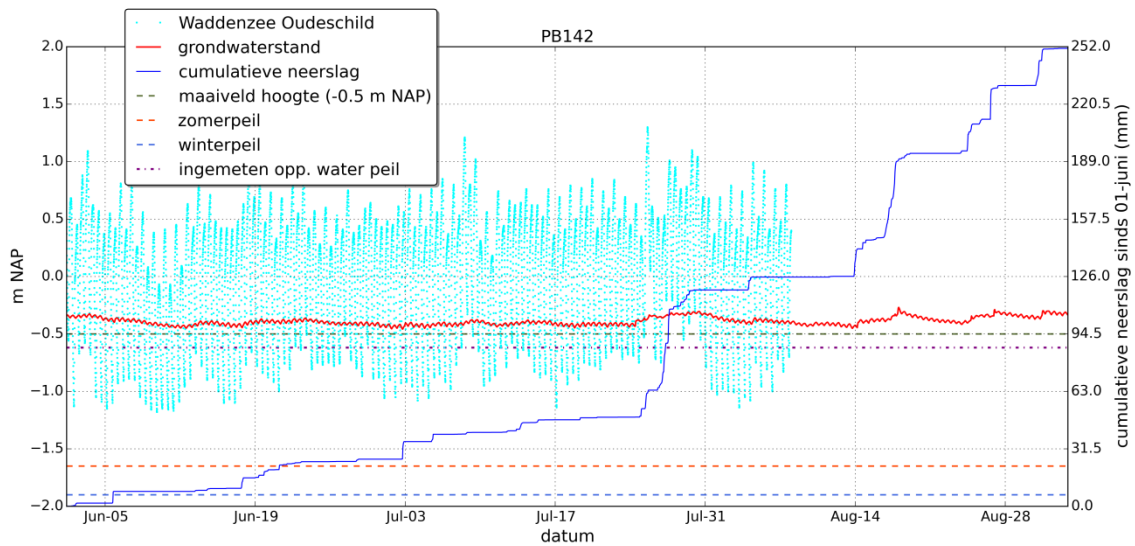
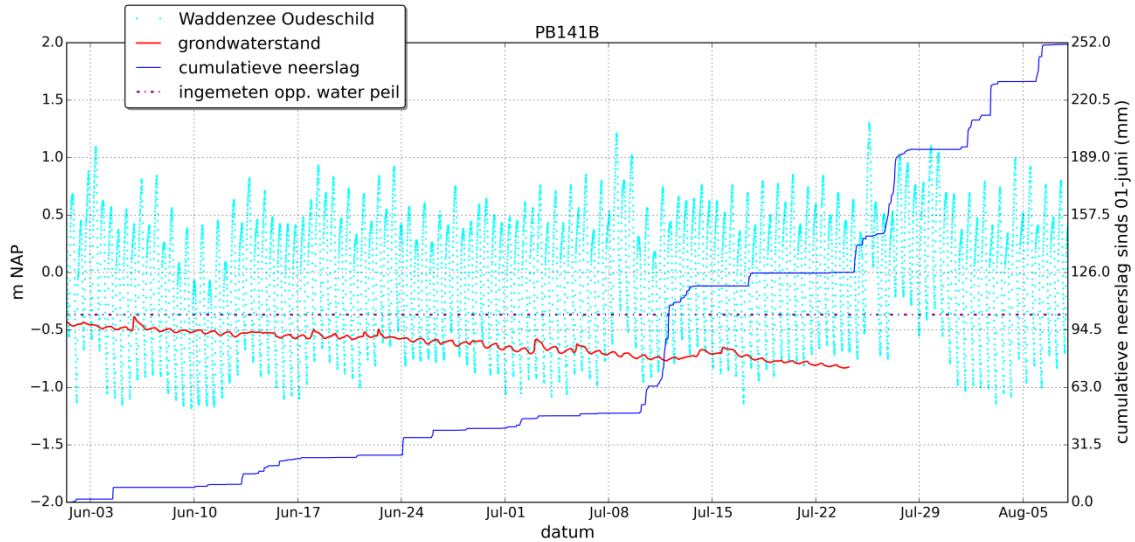


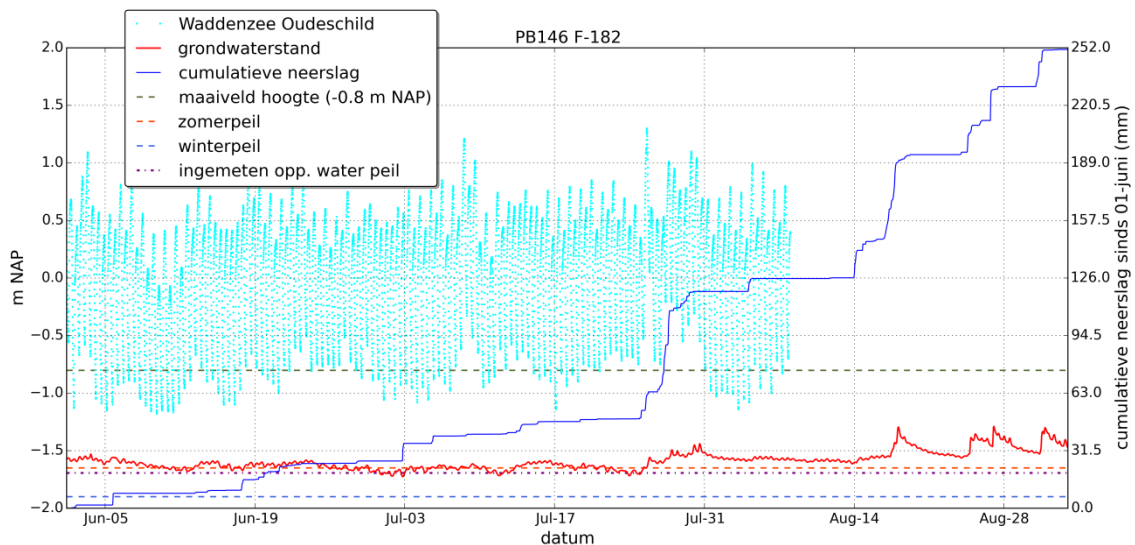
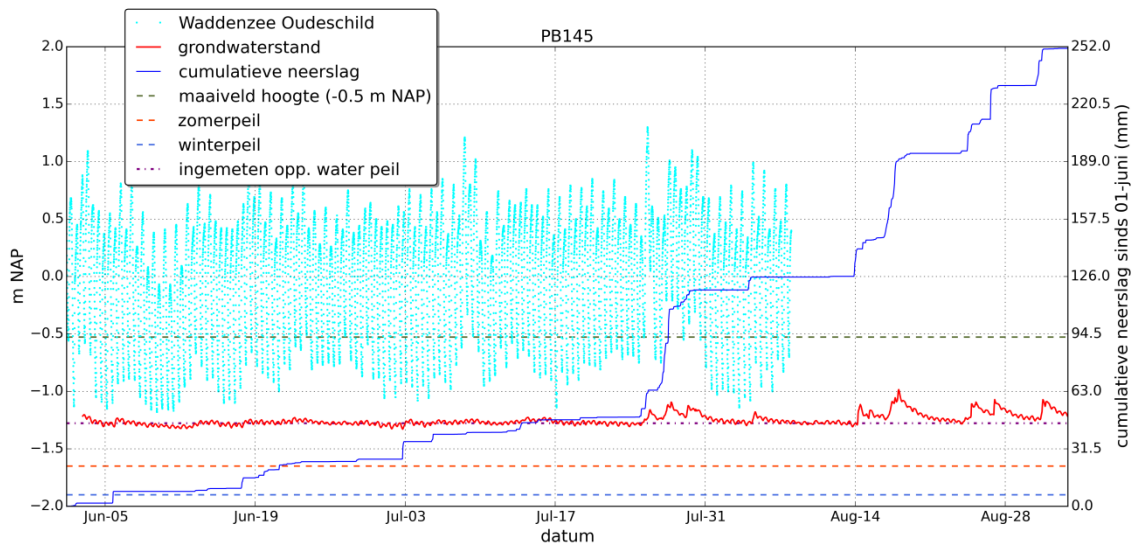
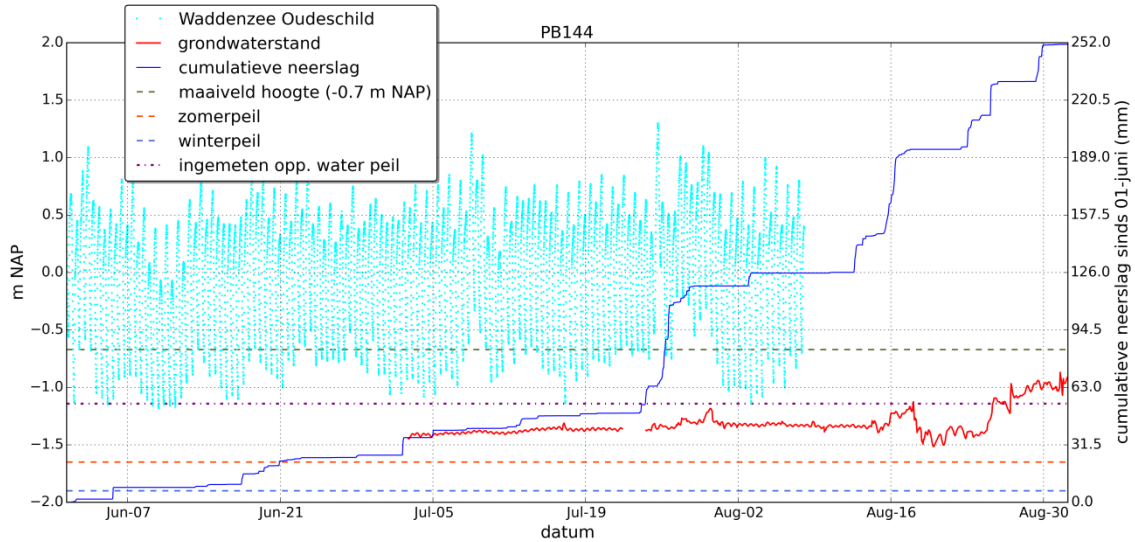
Lokale peilbuizen

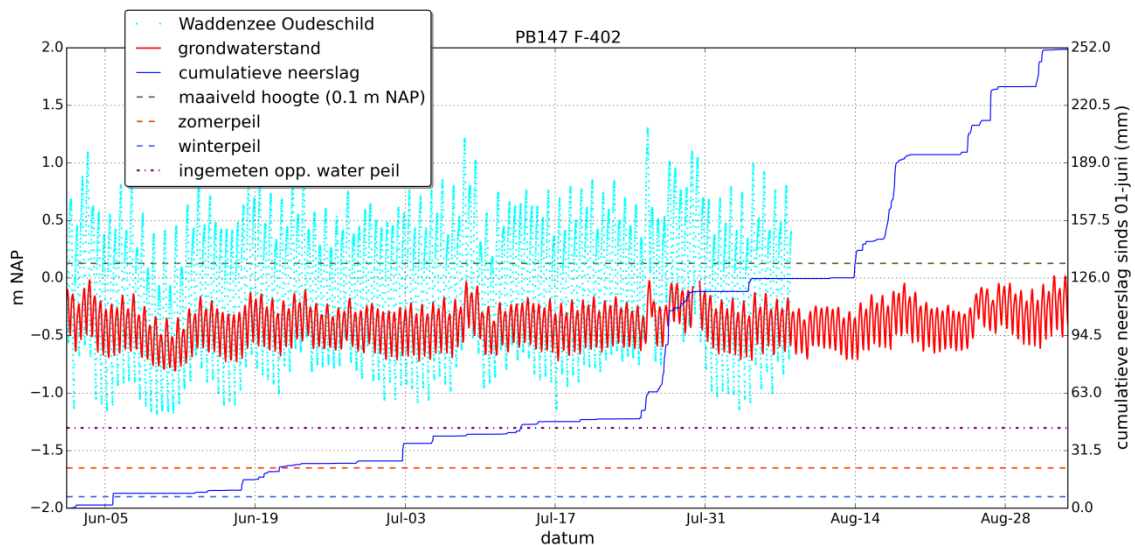
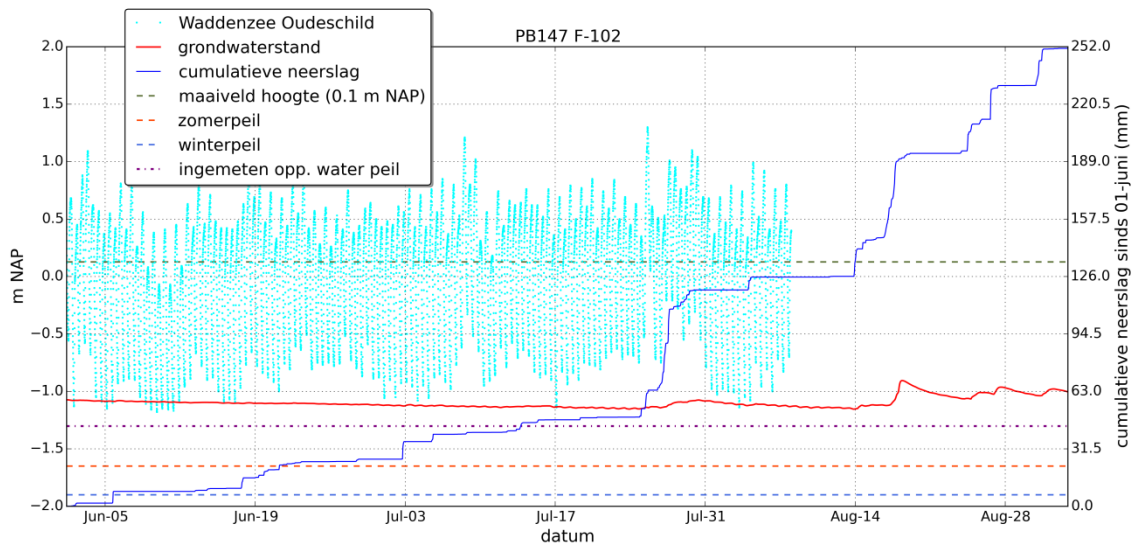
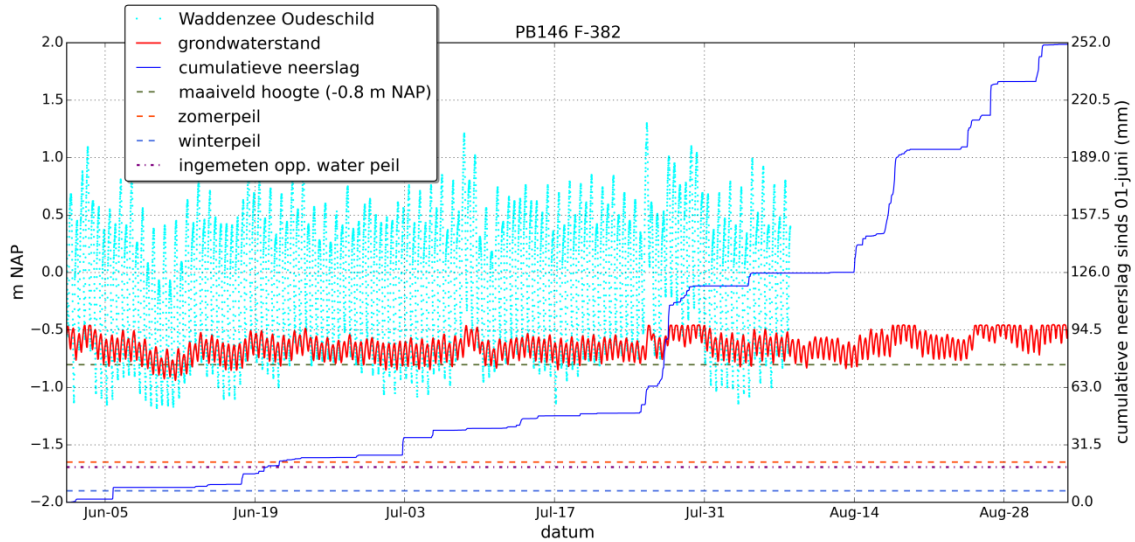
Weergegeven zomer- en winterpeil is streefpeil, niet afgeleide waterpeil uit analyse AHN. Het ingemeten oppervlakte water peil is het waterpeil in de meest nabijgelegen watergang van de beschouwde peilbuis. De peilen zijn afkomstig uit een analyse van het AHN2 ingevlogen in maart 2011 (HHNK 2015).

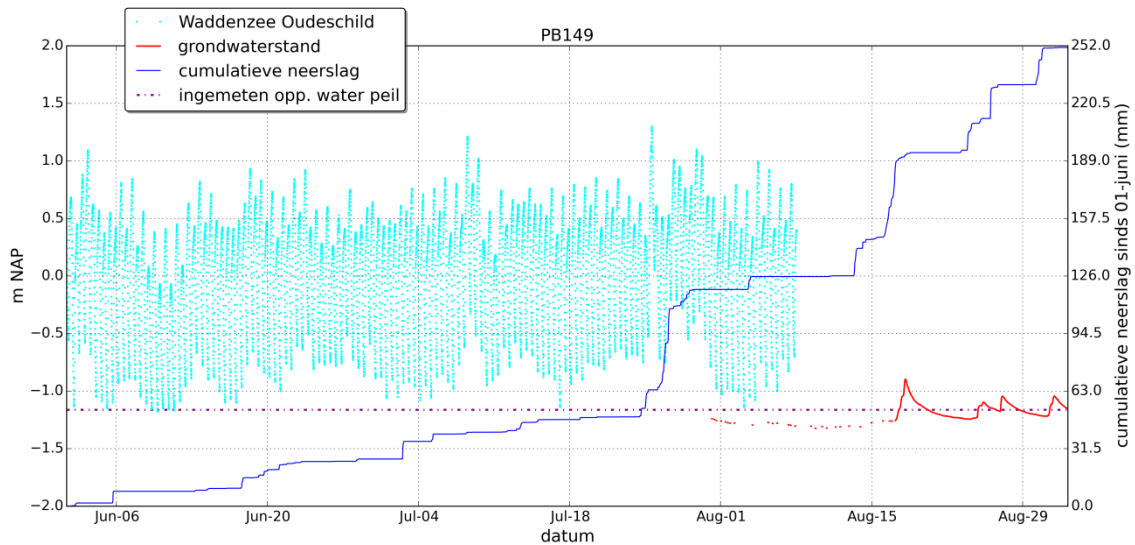
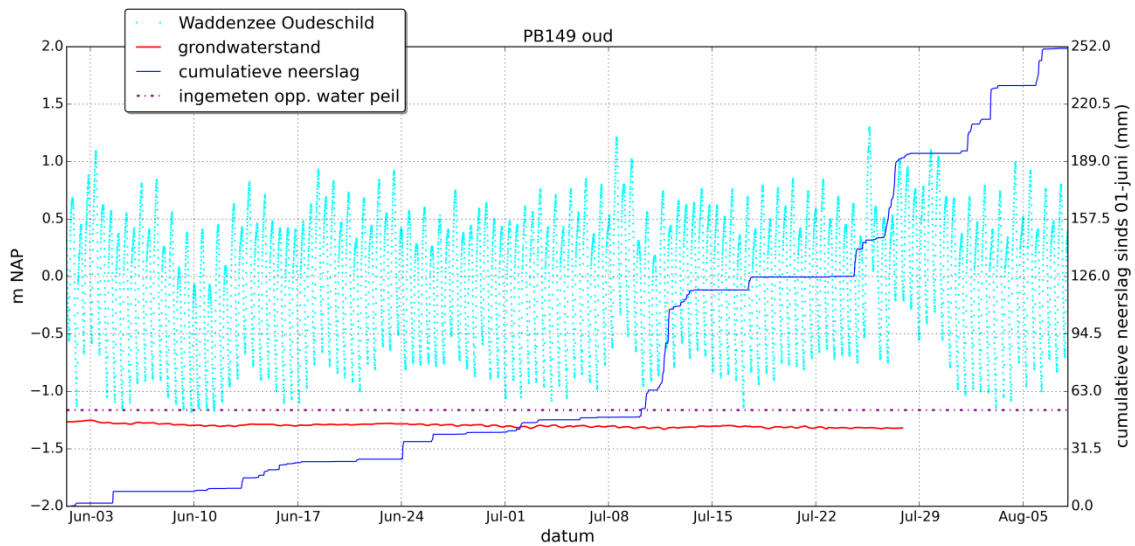
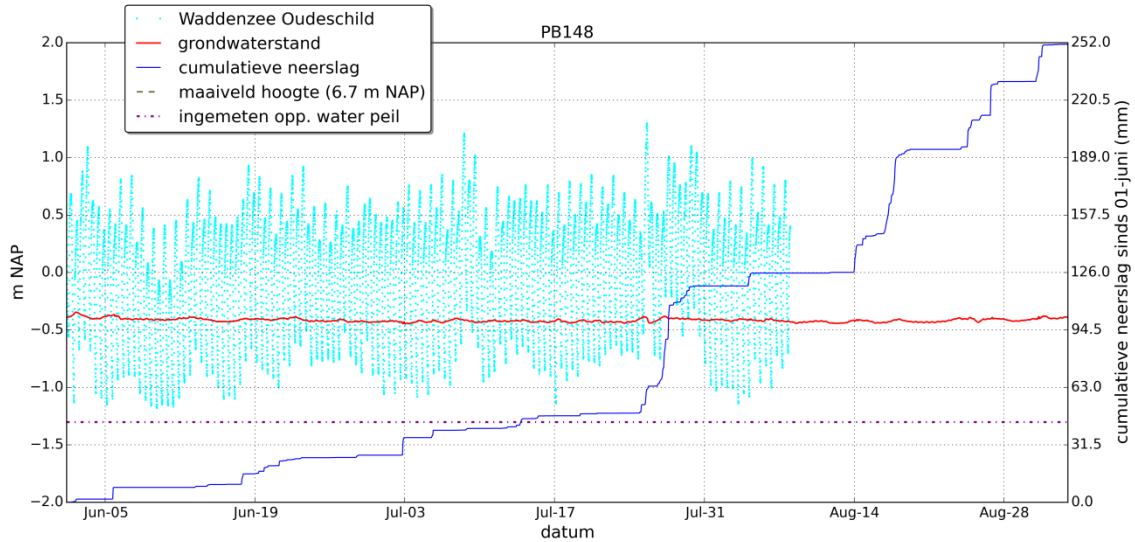


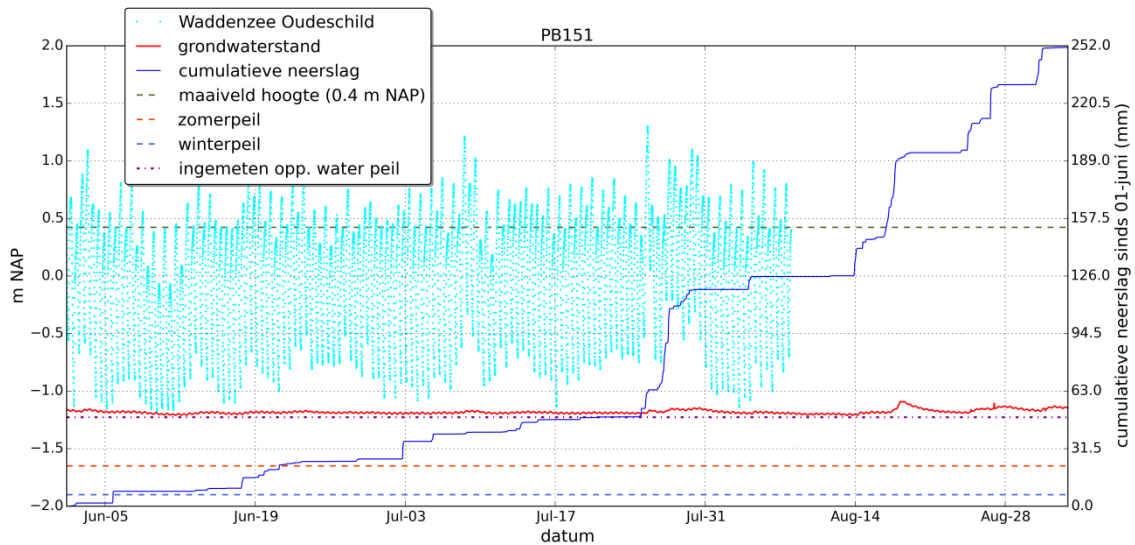
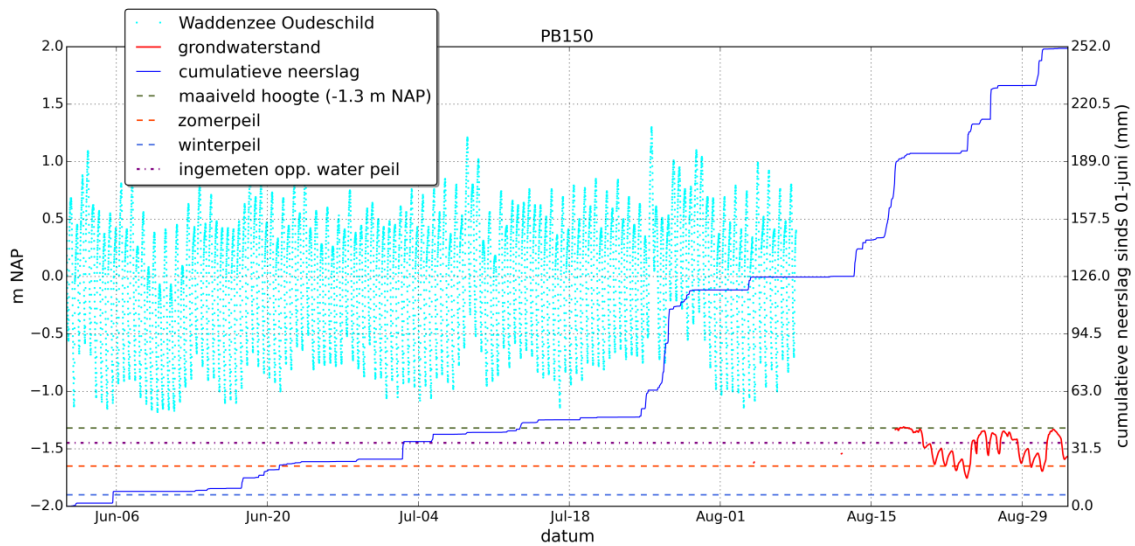
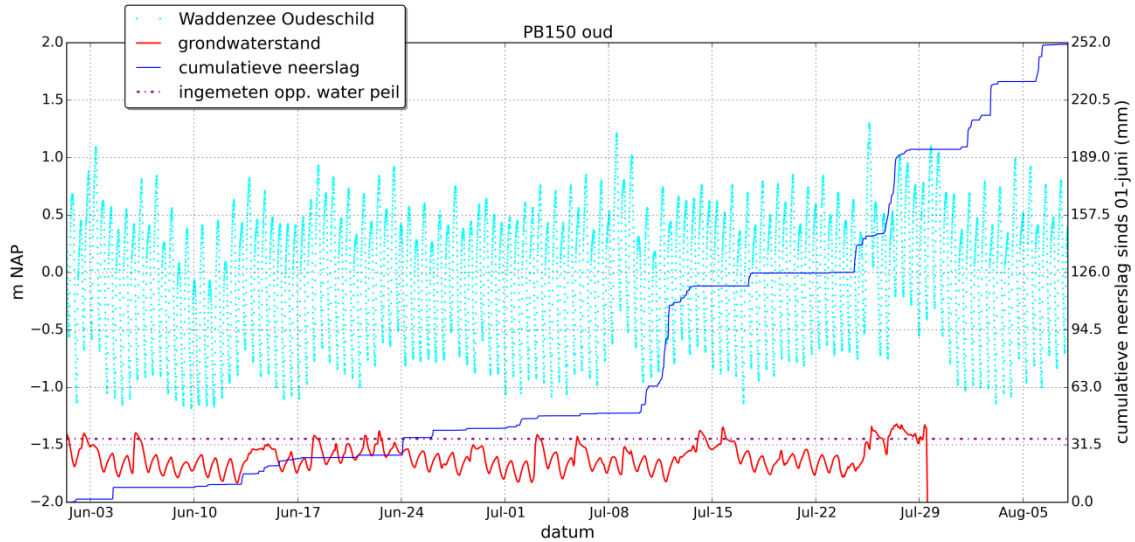


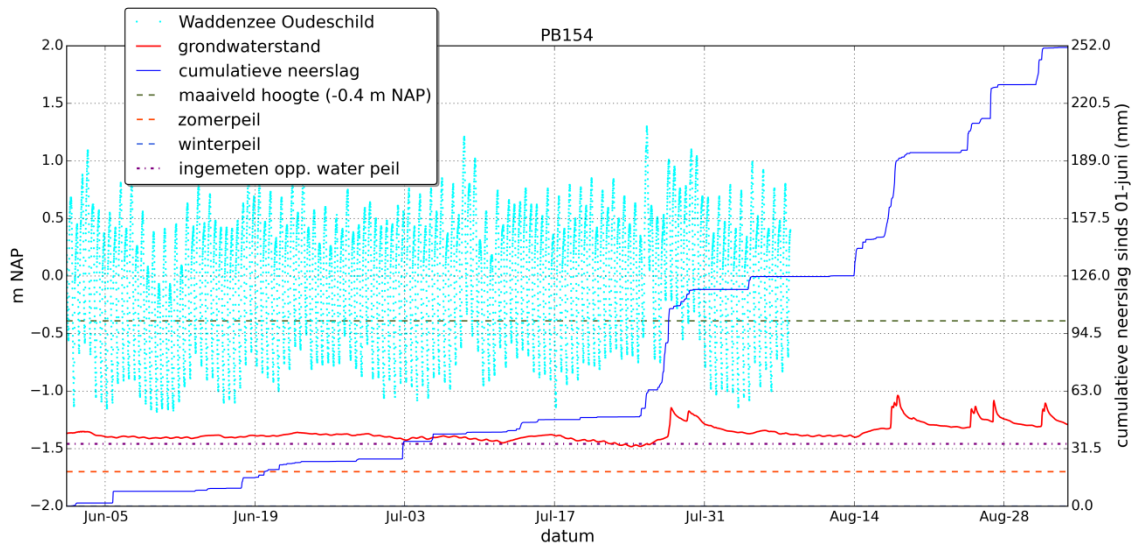
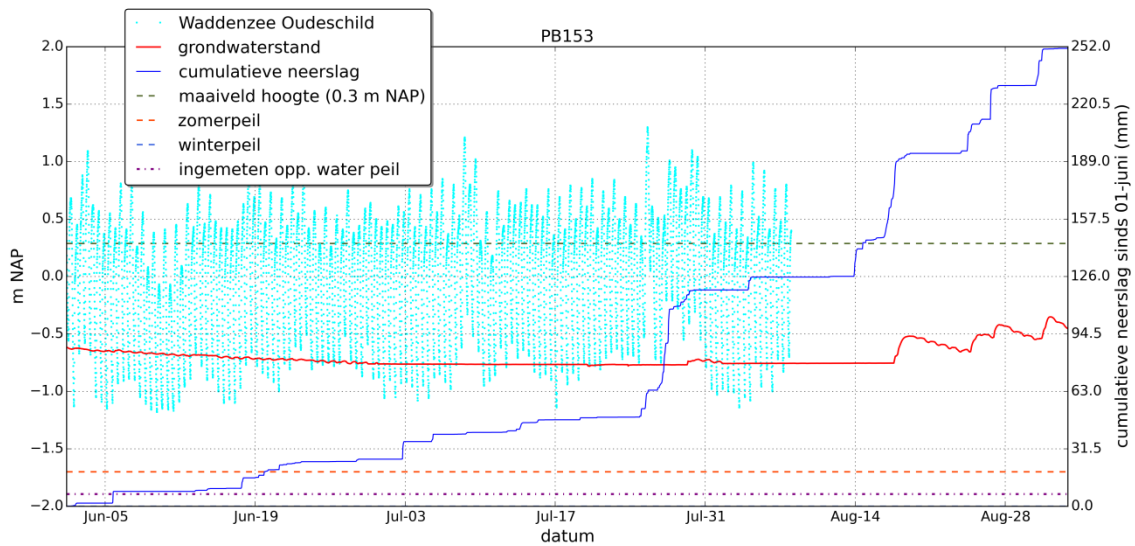
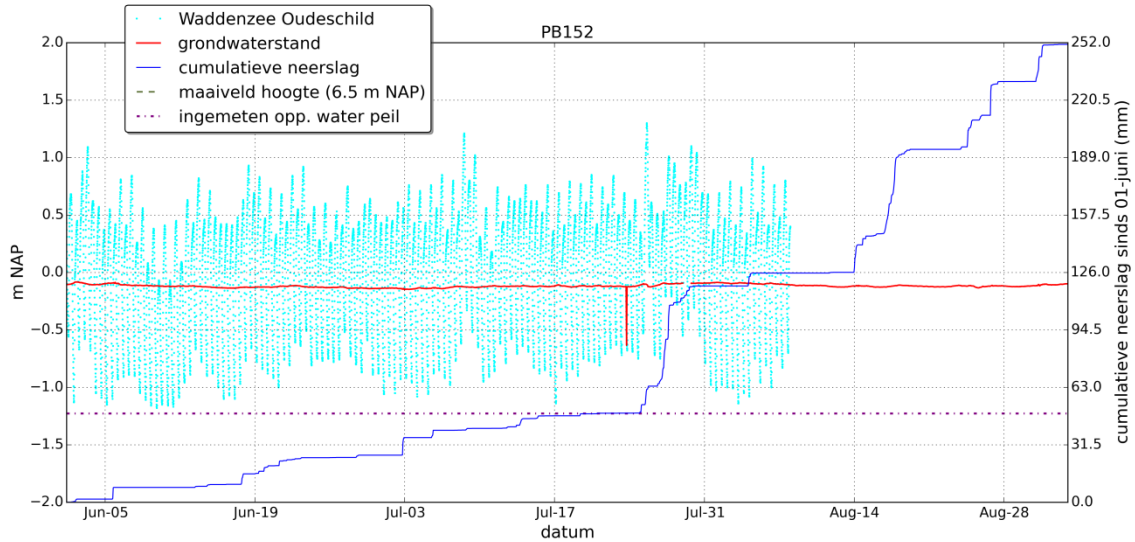


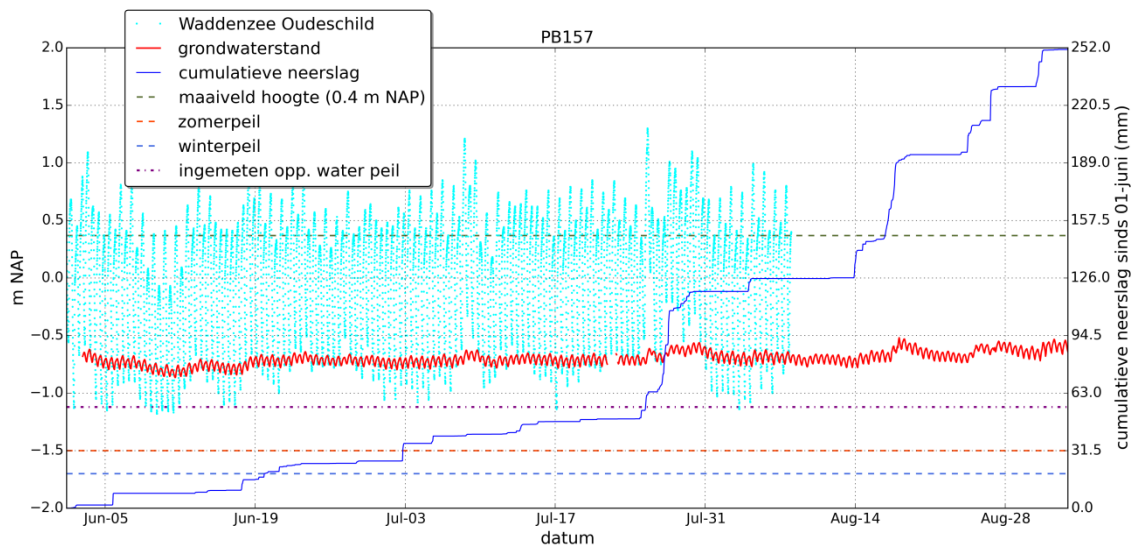
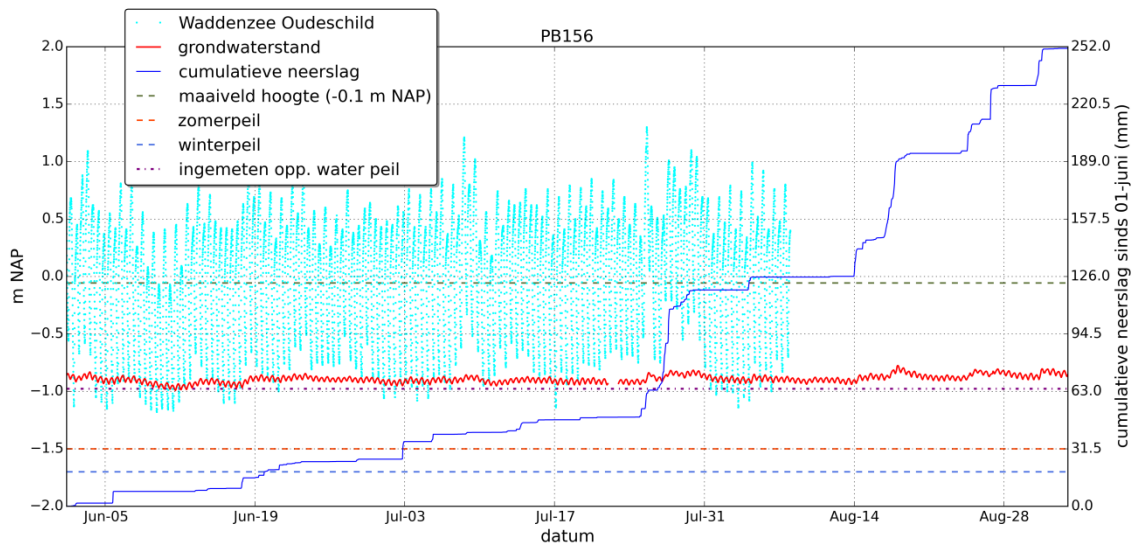
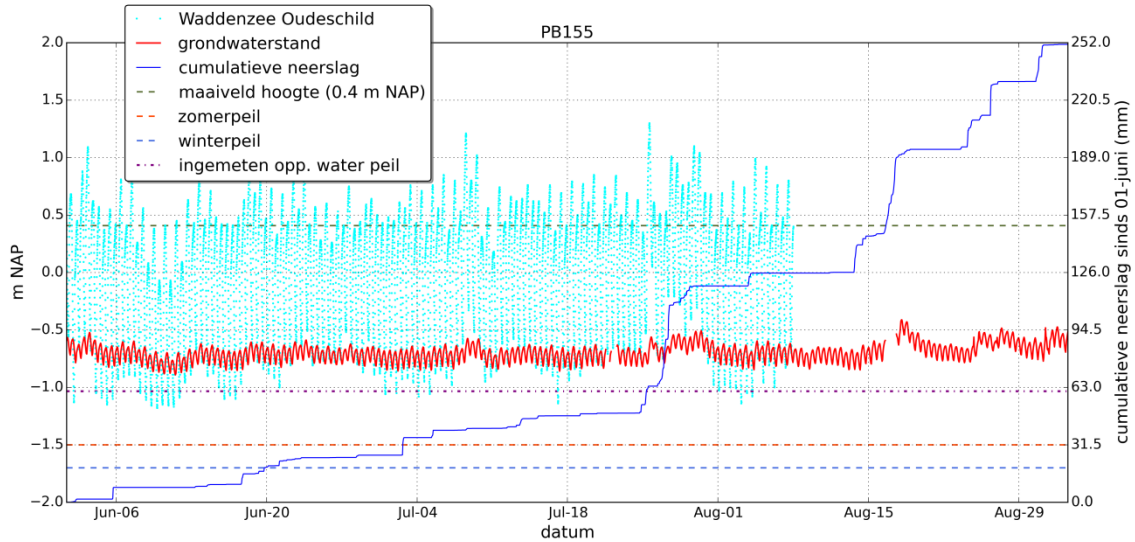


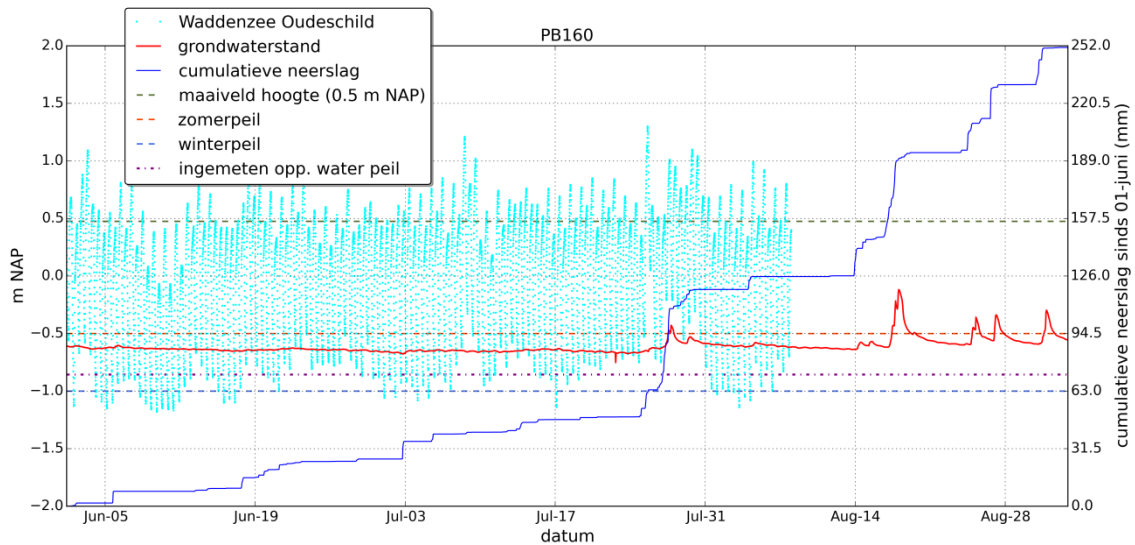
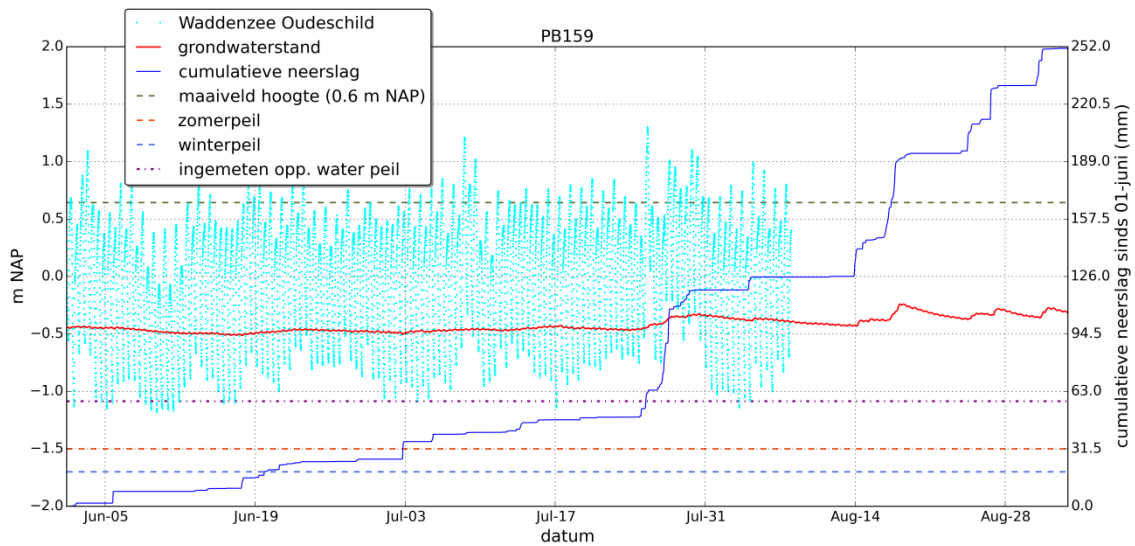
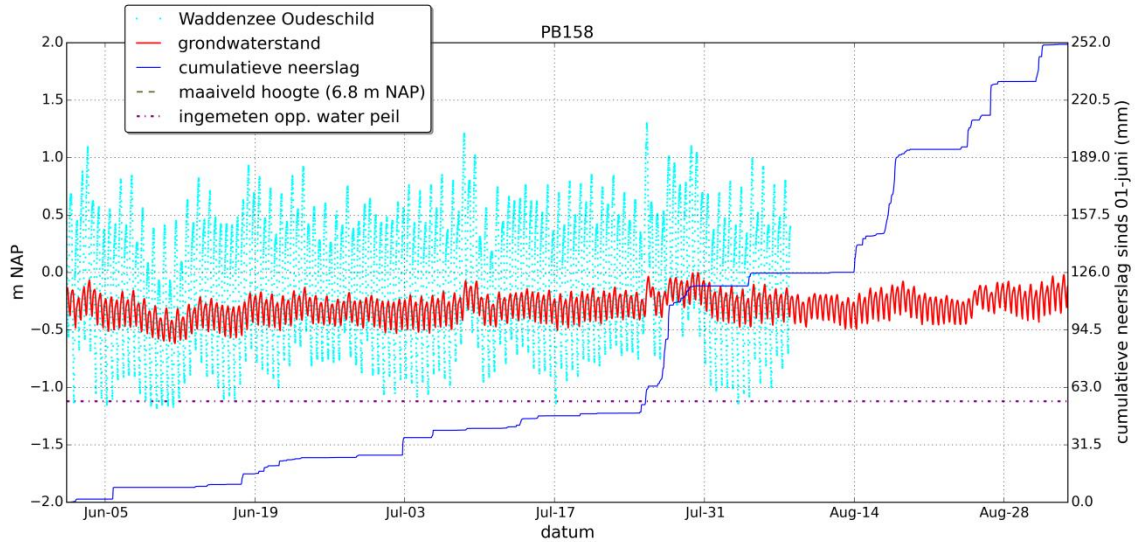


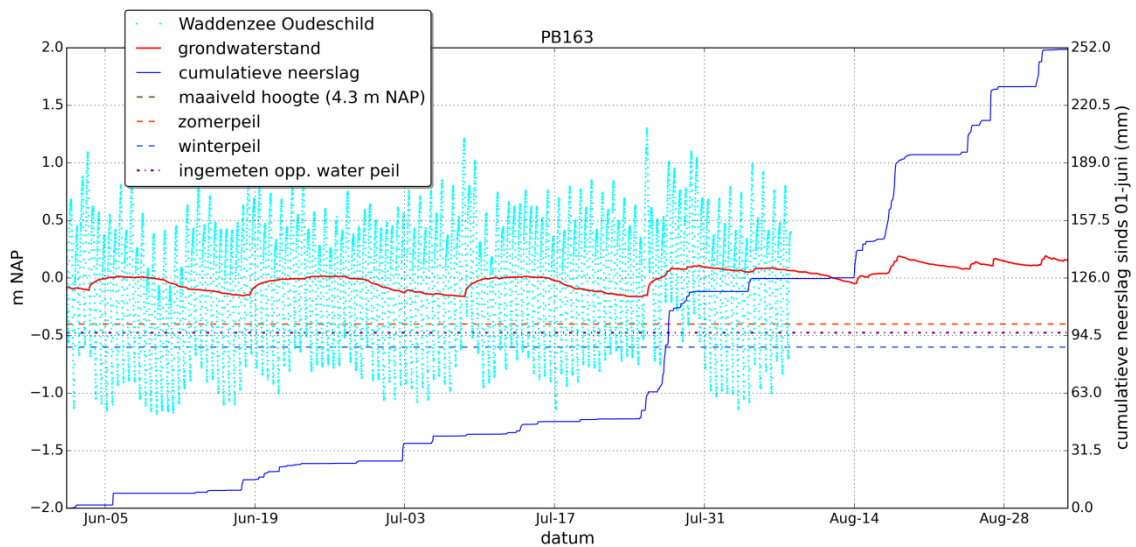
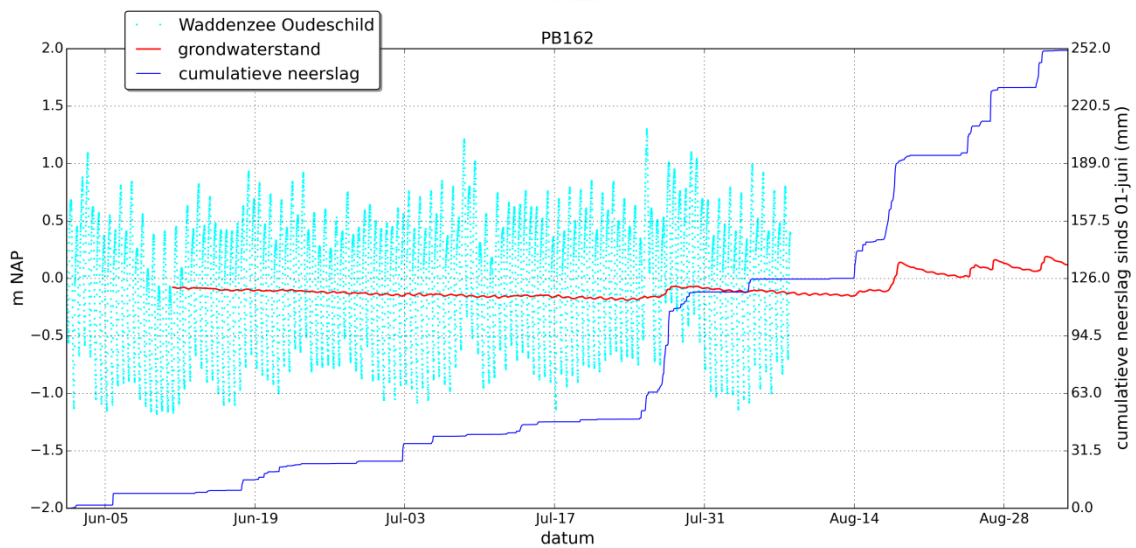
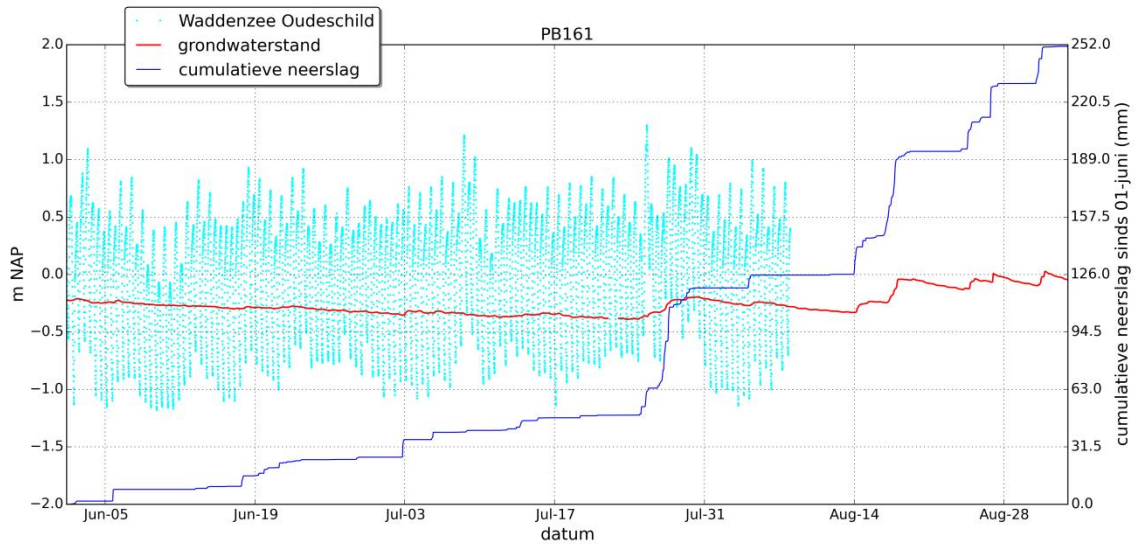


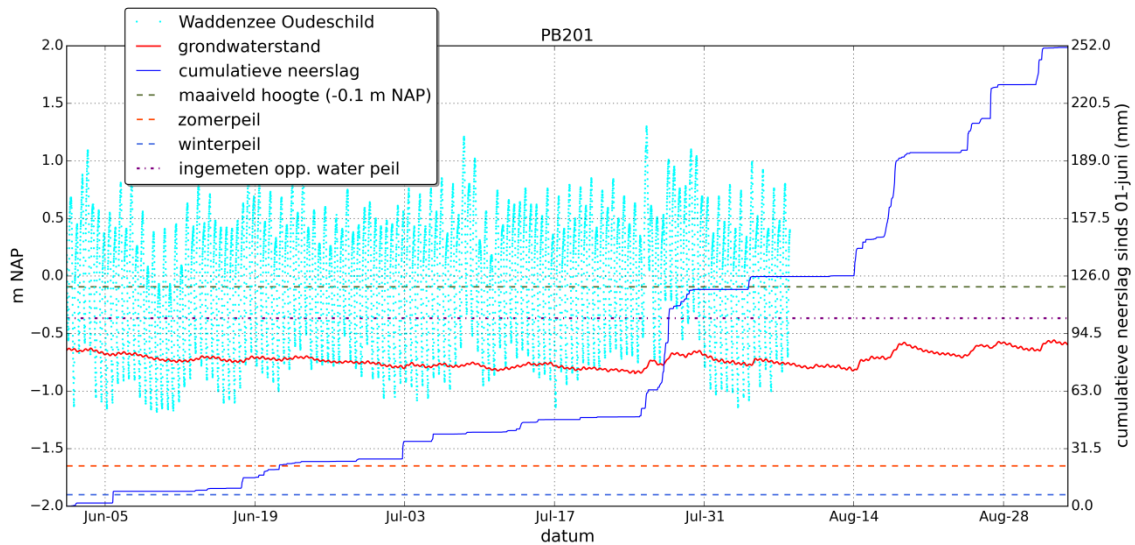
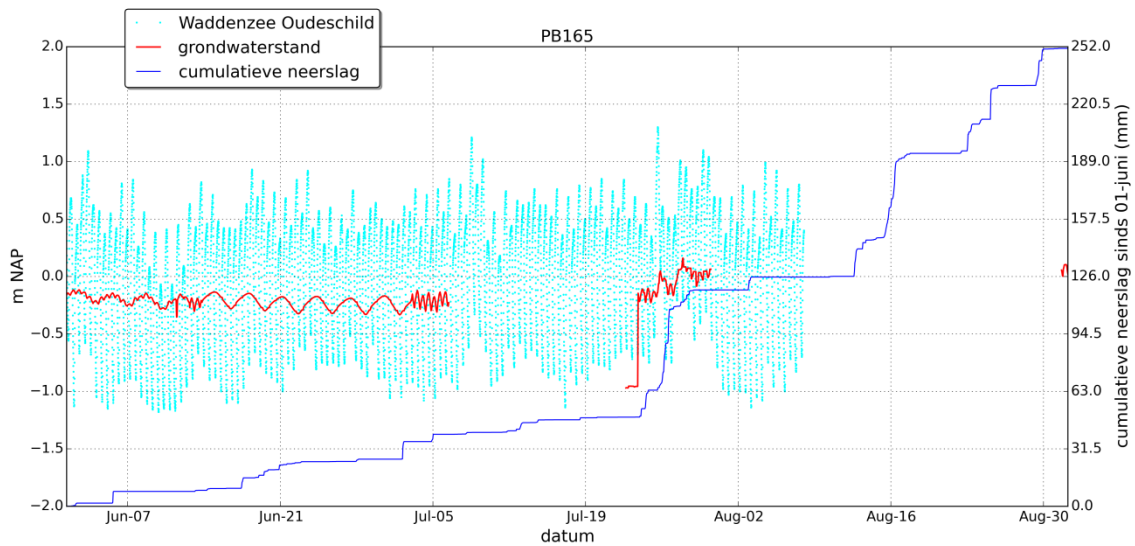
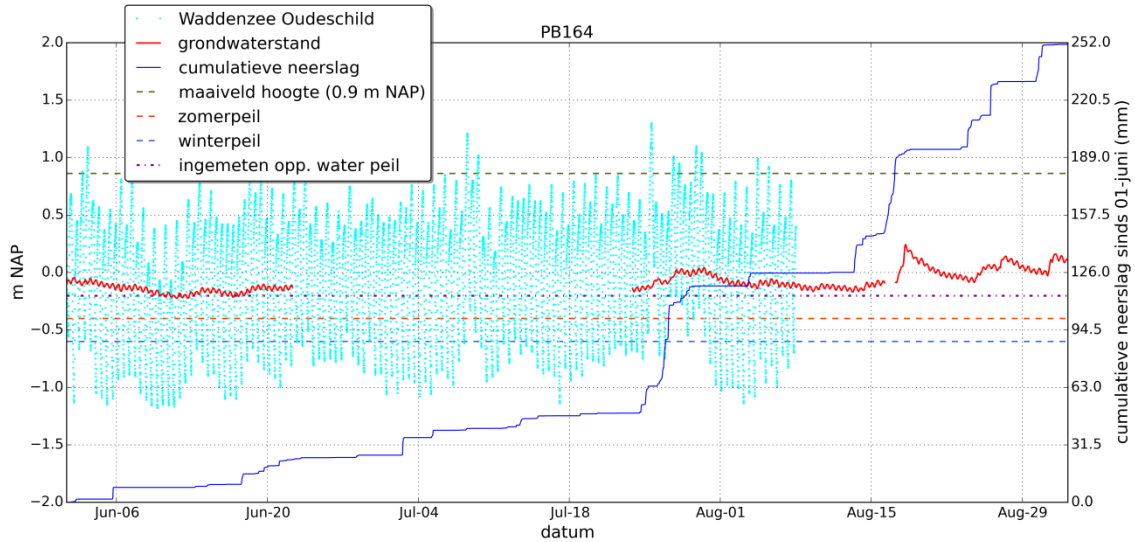


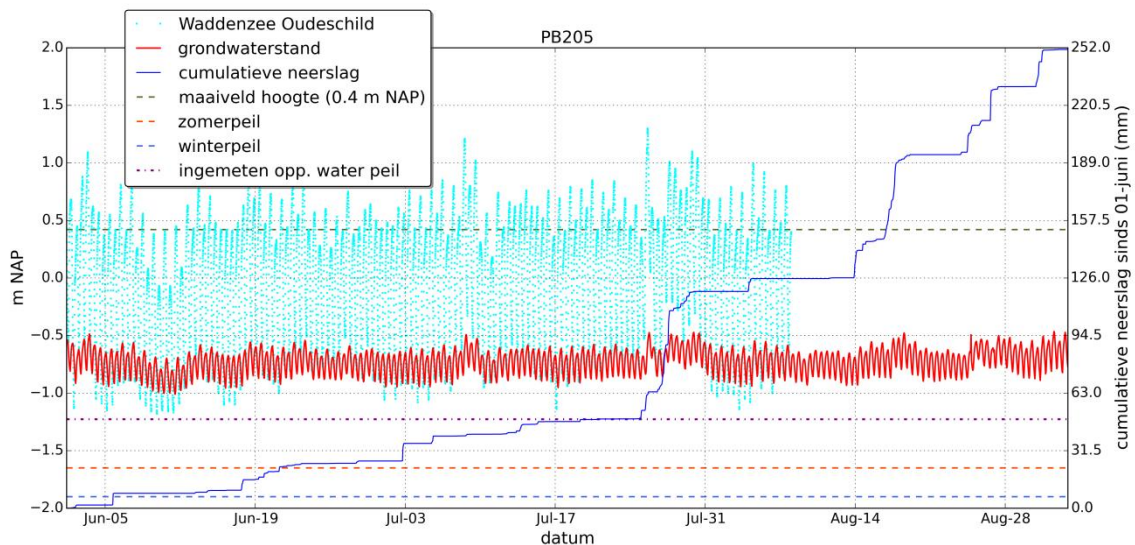
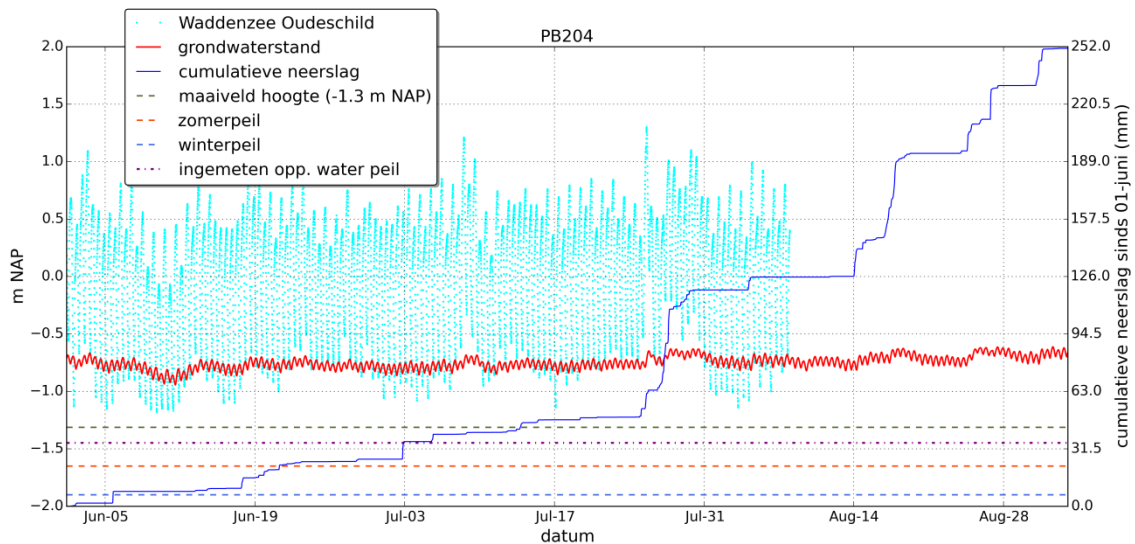
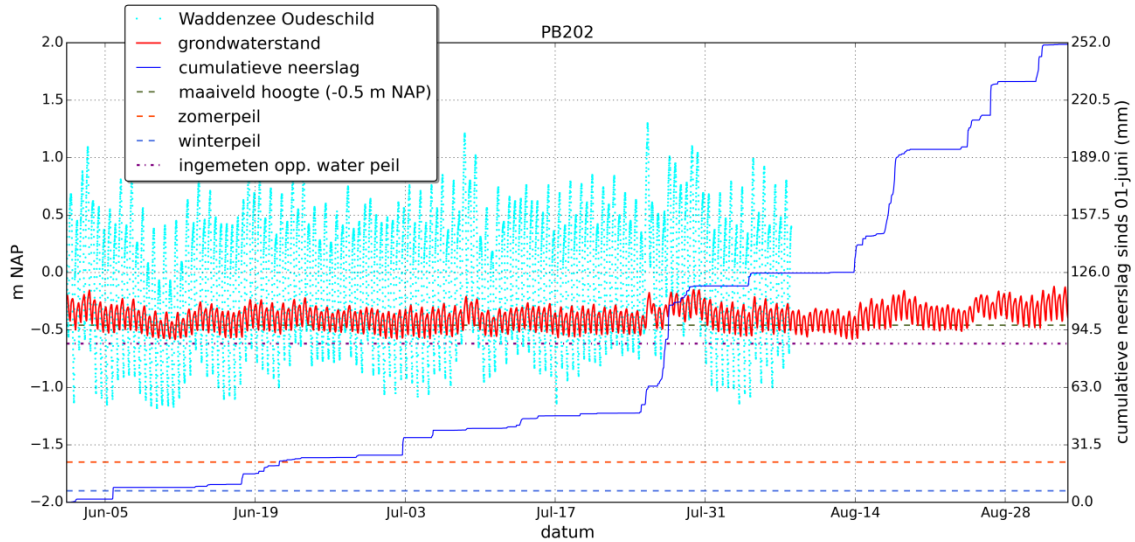


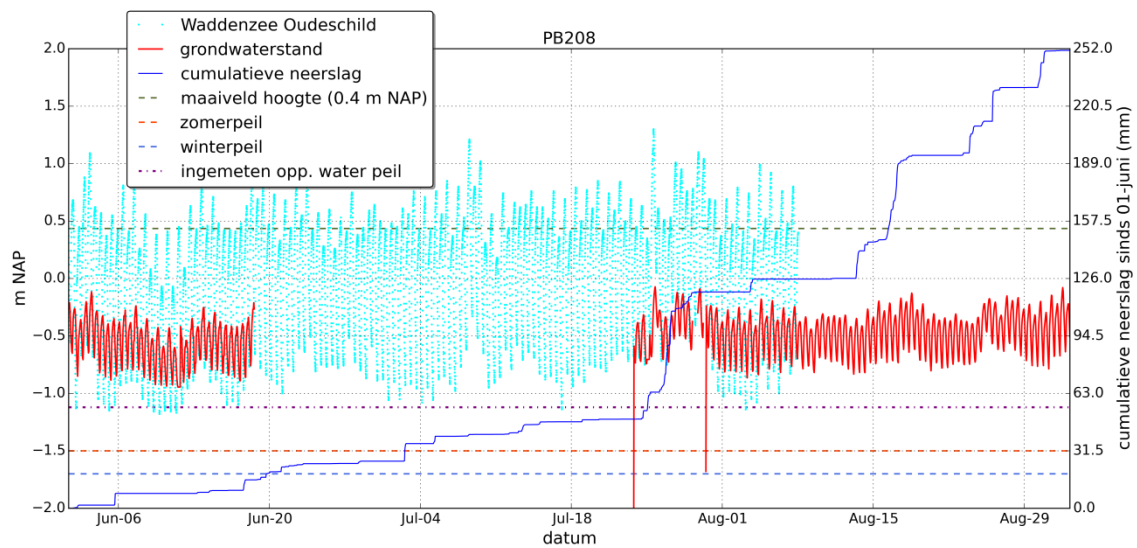
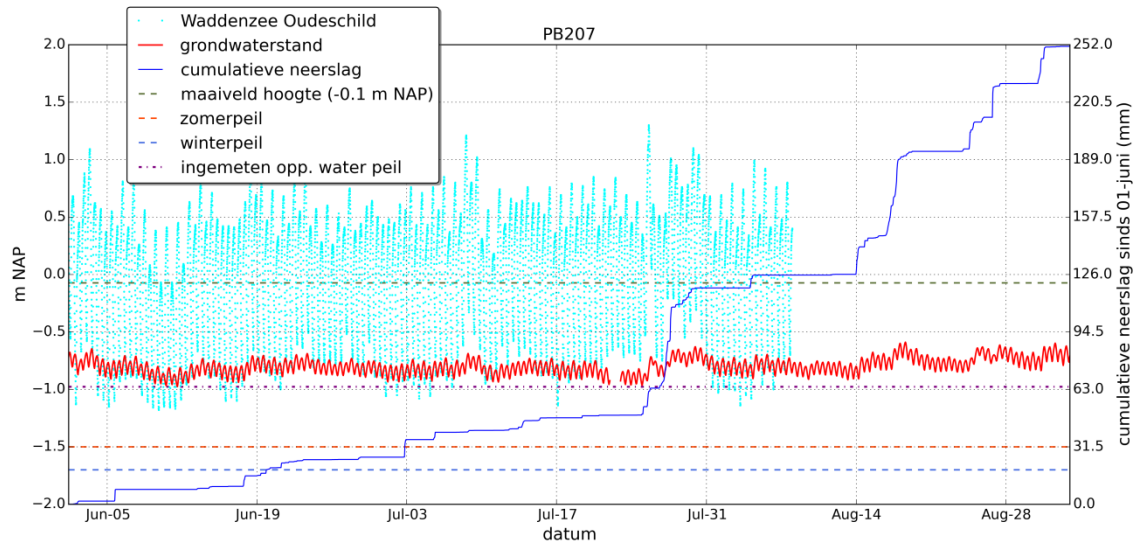










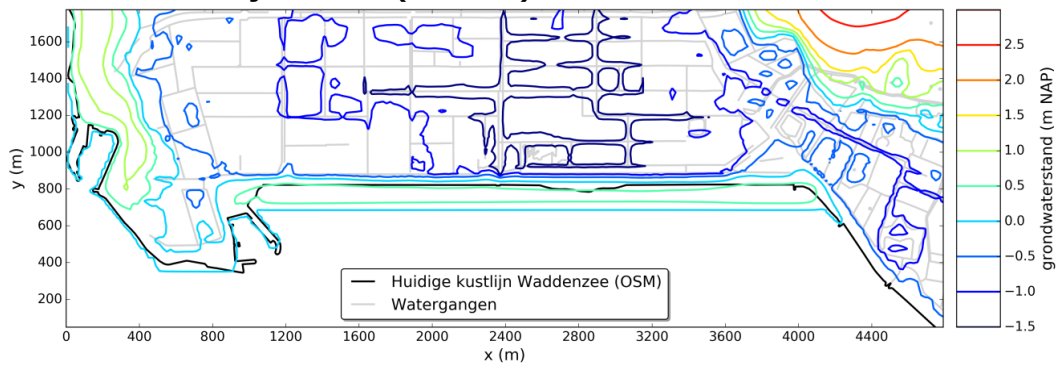




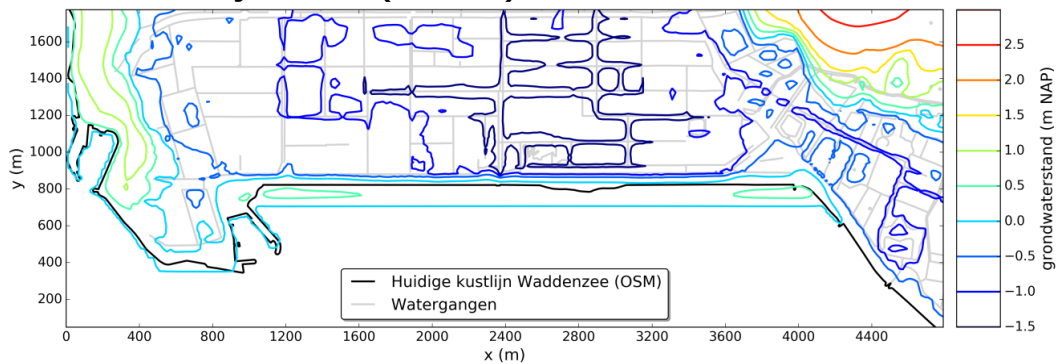
Bijlage II Aanvullende Modelresultaten

Freatische grondwaterstand in 2025

Abbeelding II.1 Berekende freatische grondwaterstand gemiddelde situatie duin voor dijk in 2015 (NAP +m)



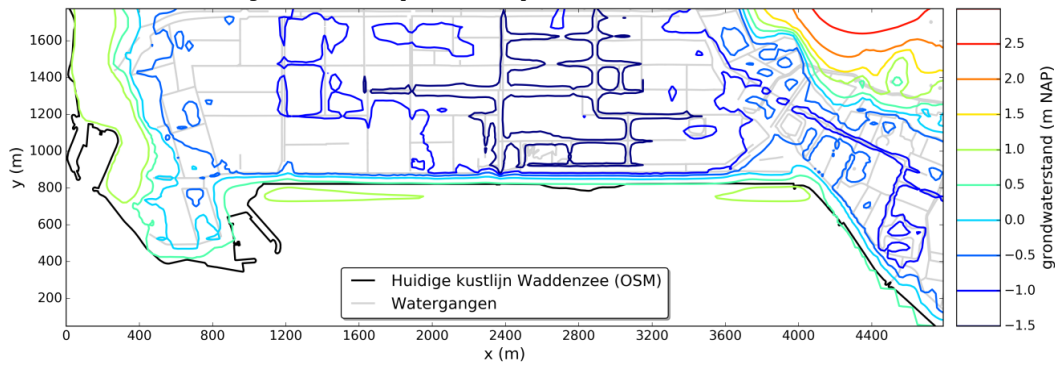
Abbeelding II.2 Berekende freatische grondwaterstand gemiddelde situatie duin tegen dijk in 2025 (NAP +m)



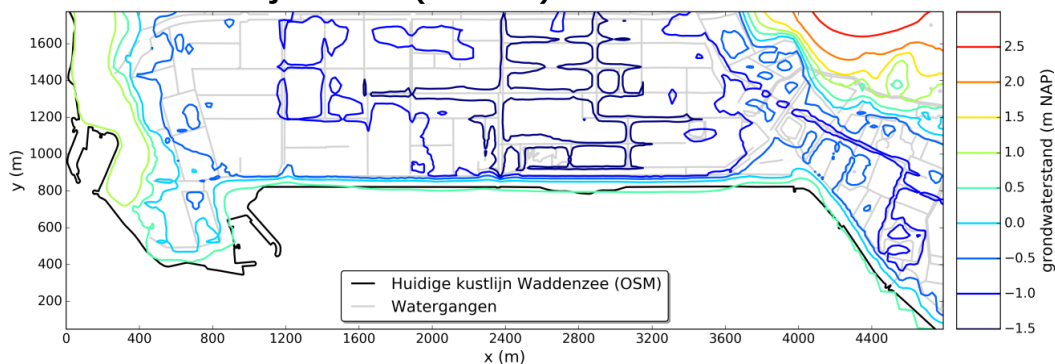


Freatische grondwaterstand in 2085

Afbeelding II.3 Berekende freatische grondwaterstand gemiddelde situatie duin voor dijk in 2085 (NAP +m)

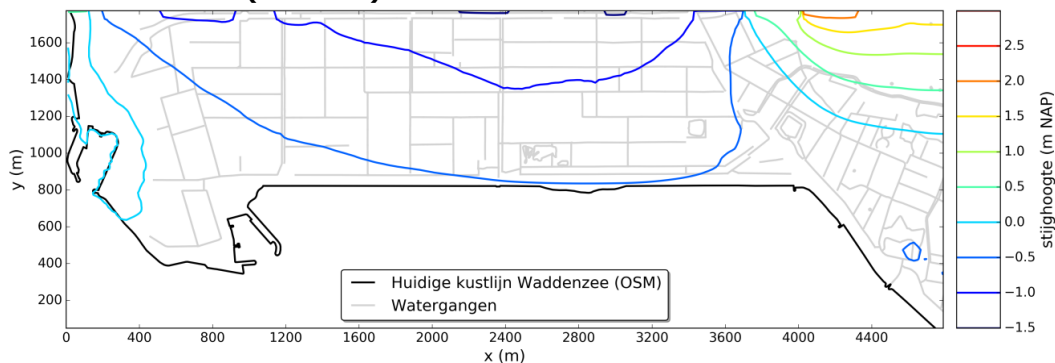


Afbeelding II.4 Berekende freatische grondwaterstand gemiddelde situatie duin tegen dijk in 2085 (NAP +m)



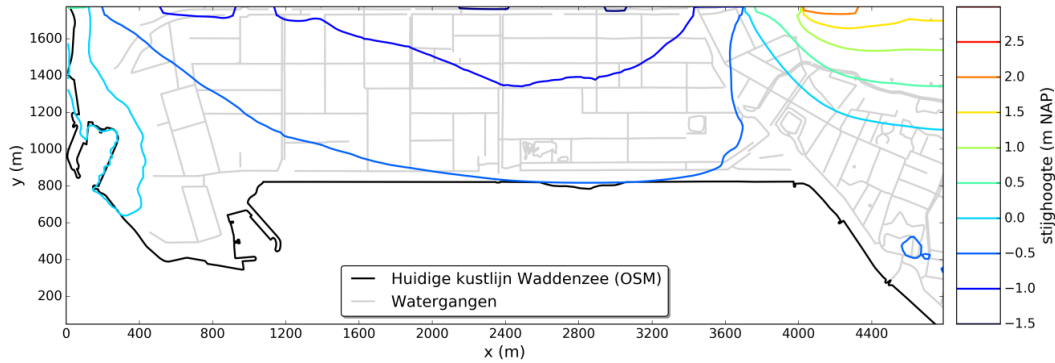
Stijghoogte 1e zandlaag in 2025

Afbeelding II.5 Berekende stijghoogte gemiddelde situatie duin voor dijk in 2025 (NAP +m)



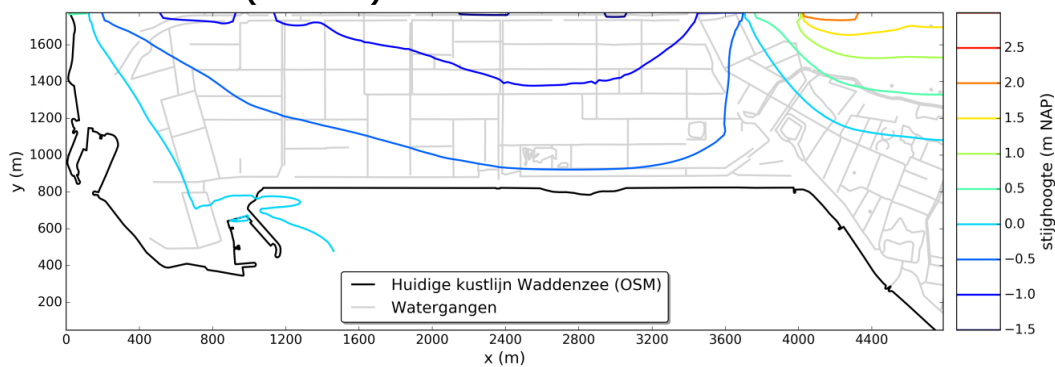


Afbeelding II.6 Berekende stijghoogte gemiddelde situatie dijk tegen duin in 2025 (NAP +m)

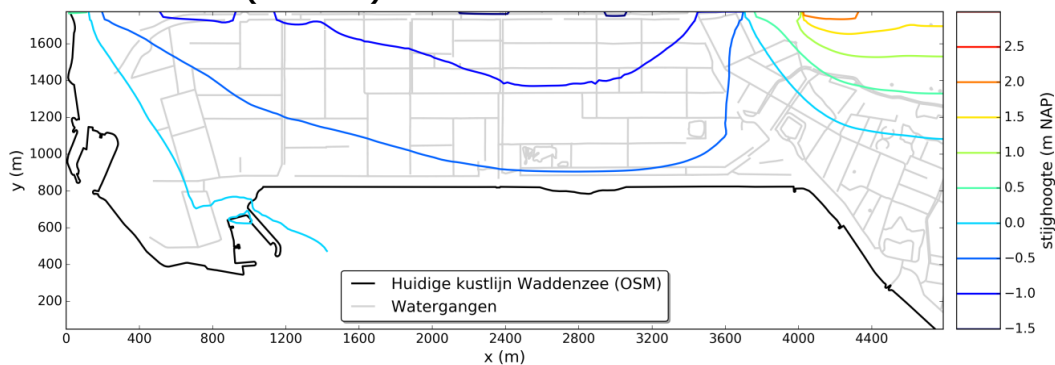


Stijghoogte 1e zandlaag in 2085

Afbeelding II.7 Berekende stijghoogte gemiddelde situatie duin voor dijk in 2085 (NAP +m)



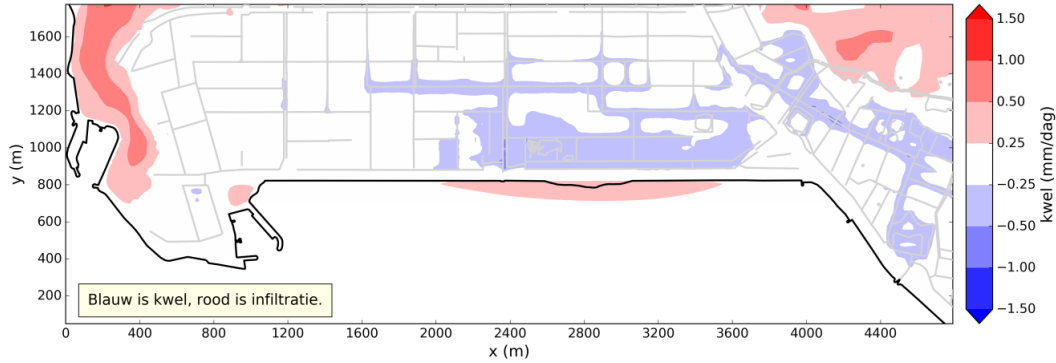
Afbeelding II.8 Berekende stijghoogte gemiddelde situatie duin tegen dijk in 2085 (NAP +m)



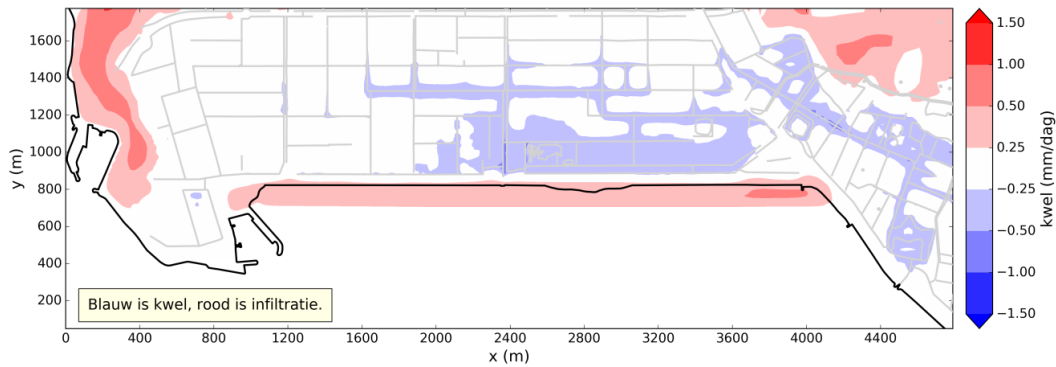


Kwel/infiltratie in 2025

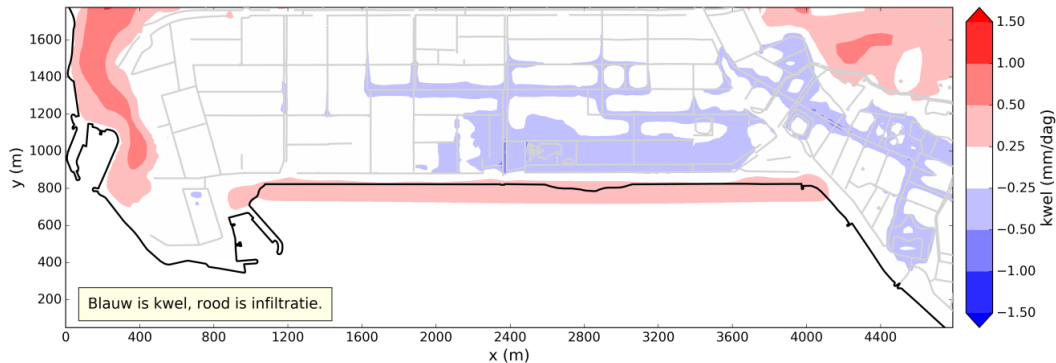
Afbeelding II.9 Referentie situatie, kwel/infiltratie in 2025



Afbeelding II.10 Dijk voor duin, kwel/infiltratie in 2025



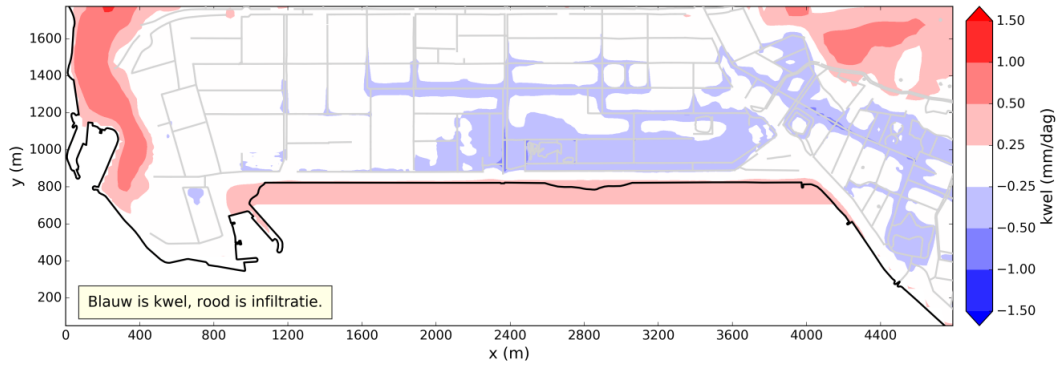
Afbeelding II.11 Dijk tegen duin, kwel/infiltratie in 2025



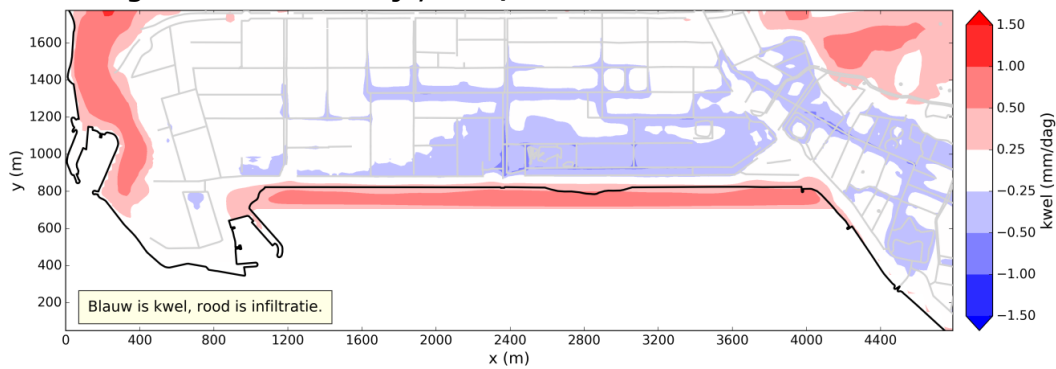


Kwel/infiltratie in 2085

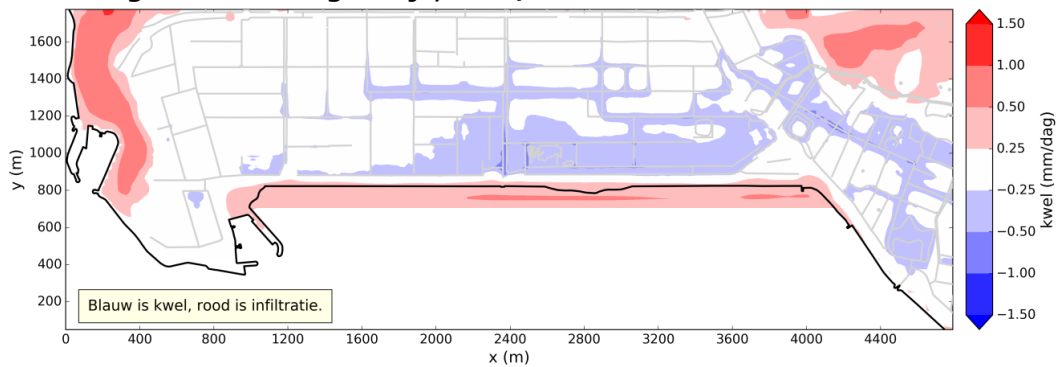
Afbeelding II.12 Referentie situatie, kwel/infiltratie in 2085



Afbeelding II.13 Duin voor dijk, kwel/infiltratie in 2085



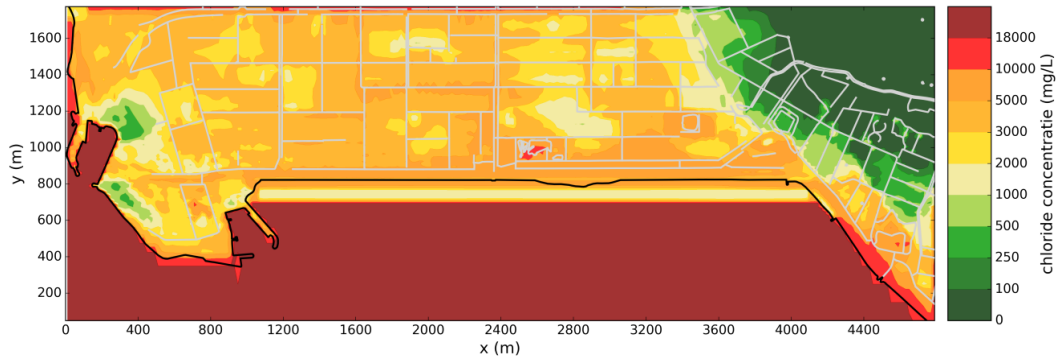
Afbeelding II.14 Duin tegen dijk, kwel/infiltratie in 2085



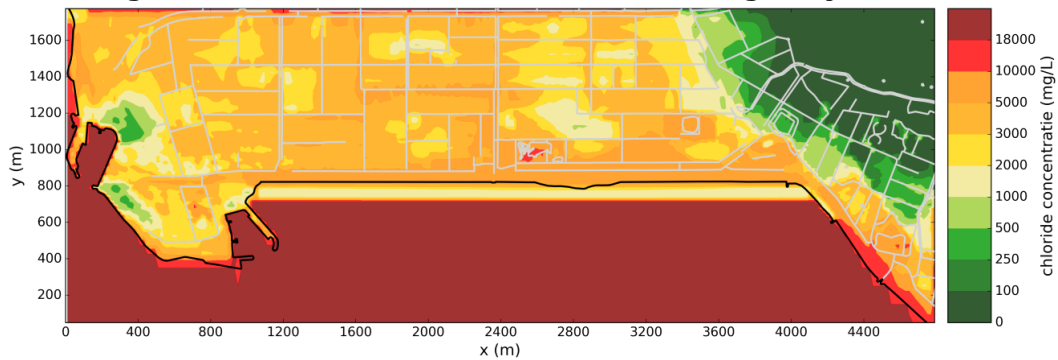


Concentratie chloride in 2085

Afbeelding II.15 Absolute concentratie chloride duin voor dijk in 2025

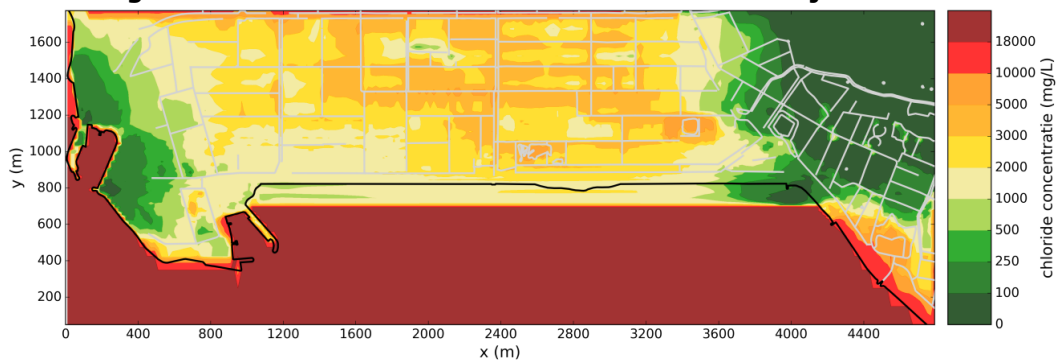


Afbeelding II.16 Absolute concentratie chloride duin tegen dijk in 2025



Concentratie chloride in 2085

Afbeelding II.17 Absolute concentratie chloride duin voor dijk in 2085





Afbeelding II.18 Absolute concentratie chloride duin tegen dijk in 2085

