Docnr102

RAPPORT

Grondwatermodel Kruisland

Klant: Brabant Water

Referentie: BI8614-RHD-XX-ZZ-RP-Z-0001

Status: 1/Definitief

Datum: 29 juli 2024

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX Amersfoort
Water & Maritime
Trade register number: 56515154

Telefoon: +31 88 348 20 00
Fax: +31 33 463 36 52
Email: info@rhdhv.com
Website: royalhaskoningdhv.com

Titel document:	Grondwatermodel Kruisland
Ondertitel:	Grondwatermodel Kruisland
Referentie:	BI8614-RHD-XX-ZZ-RP-Z-0001
Status:	1/Definitief
Datum:	29 juli 2024
Projectnaam:	BI8614
Projectnummer:	BI8614
Auteur(s):	5.1.2.e en 5.1.2.e
Opgesteld door:	5.1.2.e en 5.1.2.e
Gecontroleerd door:	5.1.2.e
Datum:	25-07-2024
Goedgekeurd door:	5.1.2.e
Datum:	25-07-2024

Classificatie
Projectgerelateerd

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V.. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat.

Royal HaskoningDHV

Inhoud

1	**Inleiding**	**4**
1.1	Aanleiding en voorgeschiedenis	4
1.2	Doel van het onderzoek	4
1.3	Leeswijzer	4
2	**Modelconcept op hoofdlijnen**	**5**
2.1	Hydrologische Gereedschapskist	5
2.2	Provinciale Brabantmodel2023	6
2.3	Kruislandmodel	7
3	**Modelopzet Kruislandmodel**	**8**
3.1	Modelgrenzen	8
3.2	Programmatuur	8
3.3	Resolutie (ruimte en tijd)	9
3.4	Tijdstappen	9
3.5	Randvoorwaarden	10
3.6	Berekening grondwateraanvulling	10
3.7	Begintoestand	11
3.8	Aannames grondwatermodel	11
4	**Verbeteringen en aanvullingen Kruislandmodel**	**12**
4.1	Ondergrondmodel H3O Voorkempen en Ondergrondmodel Zuid-NL	12
4.2	Lagenmodel	13
4.3	Grondwaterwinning Kruisland	16
4.4	Waalreklei	17
4.5	Oosterhout zanden rond Kruisland	20
4.6	Bergingscoëfficiënt	22
4.7	Oppervlaktewatersysteem	23
4.8	Detailinformatie uit LESA's	25
4.8.1	Oudland	27
4.8.2	Rozenven	28
4.8.3	Halsters Laag	29
4.8.4	Molenbeek en Spuitendonks bosje	30
4.8.5	Gastels Laag	31
4.8.6	Zoomland	32
4.9	Beregening uit grondwater	33

Royal HaskoningDHV

5	**Kalibratie**	**34**
5.1	Methode en werkwijze op hoofdlijnen	34
5.2	Monte Carlo analyse	34
5.3	Genetisch Algoritme	37
5.4	Gebruikte meetdata grondwaterstanden en stijghoogten	38
5.5	Kalibratie	38
5.5.1	Waalreklei 1	38
5.5.2	Doorlaatvermogen Formatie van Oosterhout	40
5.5.3	Oosterhoutklei	41
5.5.4	Stramproy klei	42
5.6	Opschaling waterlopen	43
5.7	Bepaalde ijkfactoren	45
5.8	Kalibratieresultaat	47
6	**Validatie**	**50**
6.1	Pompproef Kruisland	50
6.1.1	Doorlatendheid en weerstand	50
6.1.2	Verlagingen rond de pompproeflocatie	50
6.1.3	Verandering in de tijd	52
6.2	Eerder uitgevoerde pompproeven	55
6.3	Berekende grondwaterstanden in natuurgebieden	57
6.4	Afvoer	62
6.5	Beregening uit grondwater	64
7	**Huidige situatie**	**68**
7.1	Berekende grondwaterregime	68
7.2	Kwel en infiltratie	71
7.3	Herkomst van het water	71
8	**Berekende effecten grondwaterwinning Kruisland**	**73**
8.1	Inleiding	73
8.2	Gemiddelde verandering in stijghoogten	73
8.3	Veranderingen in grondwaterstand	76
8.4	Verandering in kwel (opwaartse grondwaterstroming)	81
8.5	Afvoer naar de waterlopen en drains	82
8.6	Berekende verandering in stromingsrichting	83
8.7	Effecten op landbouw	85
8.7.1	Natschade	85
8.7.2	Droogteschade	86
8.8	Effecten op aantrekken zout grondwater	87

8.9 Effecten op beekafvoer 93
8.10 Effecten op aanvoerbehoefte 96

9 Conclusies 97

Bronnen 98

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de modelopzet, kalibratie en resultaten van het grondwatermodel Kruisland. Dit model is opgezet voor het berekenen van de effecten van de voorgenomen grondwaterwinning Kruisland in West-Brabant.

1.1 Aanleiding en voorgeschiedenis

De basis van het grondwatermodel is het provinciale Brabantmodel. In dit model zitten de basisgegevens over ondergrond, oppervlaktewater, landgebruik, onttrekkingen en meteorologie.

De eerste verkennende berekeningen voor Kruisland zijn gedaan met een model dat het West-Brabantmodel wordt genoemd. Hiermee is de meest optimale locatie voor de nieuwe grondwaterwinning bepaald (Royal HaskoningDHV, 2018). Daarna is een nieuwe versie van het West-Brabantmodel gemaakt, gebaseerd op het inmiddels vernieuwde Brabantmodel. Belangrijkste aanpassing in dit grondwatermodel was een verbeterde schematisatie van de ondergrond met versie REGIS II (Royal HaskoningDHV, 2019). De andere schematisatie van de Waalreklei gaf wezenlijk andere berekende effecten in grondwaterstand ten gevolge van grondwaterwinning.

In het kader van de m.e.r. is een update van het grondwatermodel nodig, zodat de geohydrologische effecten worden berekend met een grondwatermodel waarin de laatste inzichten zijn verwerkt. Dit wordt het Kruislandmodel genoemd. Het voorliggend rapport beschrijft de modelopzet en kalibratie.

1.2 Doel van het onderzoek

Het doel is om een grondwatermodel te maken dat voldoende betrouwbaar de effecten kan berekenen op grondwaterstanden, stijghoogten, kwel en stroombanen ten gevolge van een nieuwe grondwaterwinning in Kruisland. De effecten van de winning worden in het m.e.r. beschreven. Voorliggend rapport is een achtergrondrapport ten behoeve van het m.e.r.

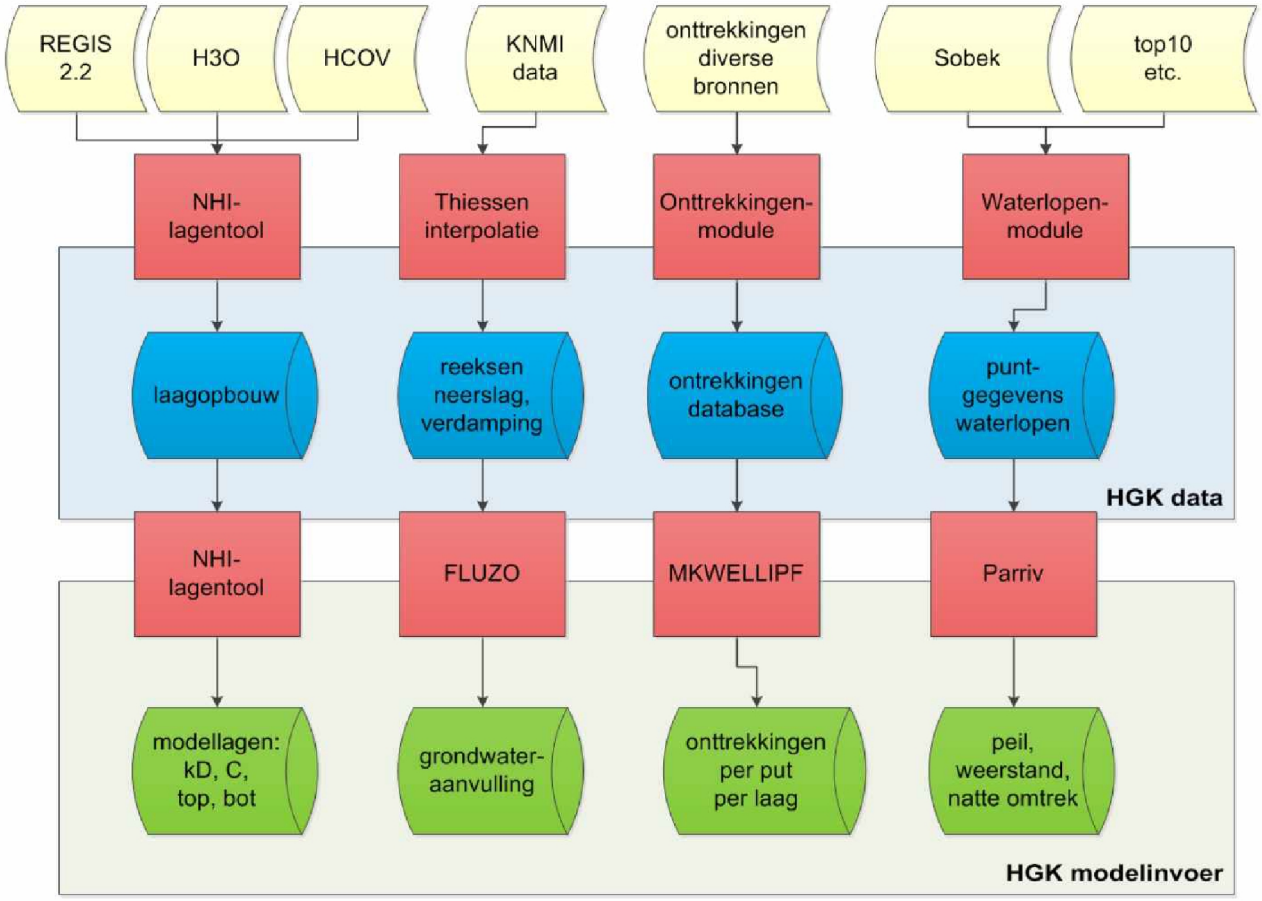
1.3 Leeswijzer

Dit rapport begint met een beschrijving van het modelconcept op hoofdlijnen, zoals het gebruik van de Hydrologische Gereedschapskist (hoofdstuk 2). In hoofdstuk 3 wordt nader ingegaan op de conceptuele modelopzet van het Kruisland. Hoofdstuk 4 beschrijft de verbeteringen die in het model zijn aangebracht, met toevoeging van meer lokale en actuele informatie. De kalibratie is in verschillende fasen uitgevoerd en wordt stapsgewijs in hoofdstuk 5 beschreven. In hoofdstuk 6 wordt de validatie beschreven, zoals een vergelijking met de pompproefresultaten, de berekende afvoer door het oppervlaktewater en het effect van beregening. De laatste hoofdstukken van het rapport presenteren de berekeningsresultaten van het gekalibreerde model: hoofdstuk 7 voor de huidige situatie zonder de winning Kruisland en hoofdstuk 8 voor de effecten van de nieuwe winning. Dit rapport wordt afgesloten met conclusies in hoofdstuk 9.

2 Modelconcept op hoofdlijnen

2.1 Hydrologische Gereedschapskist

Het grondwatermodel is opgezet volgens de concepten van de Hydrologische Gereedschapskist (HGK). Voor de provincie Noord-Brabant is een modelinstrumentarium opgezet dat gebruik maakt van verschillende componenten: Figuur 2-1: (1) de basisgegevens in geel, (2) samengevoegde en consistent gemaakte data in blauw, (3) preprocessoren die de basisgegevens omzetten naar modelinvoer in rood en (4) de modelinvoer in groen. Samen wordt dit de Hydrologische Gereedschapskist (HGK) genoemd.

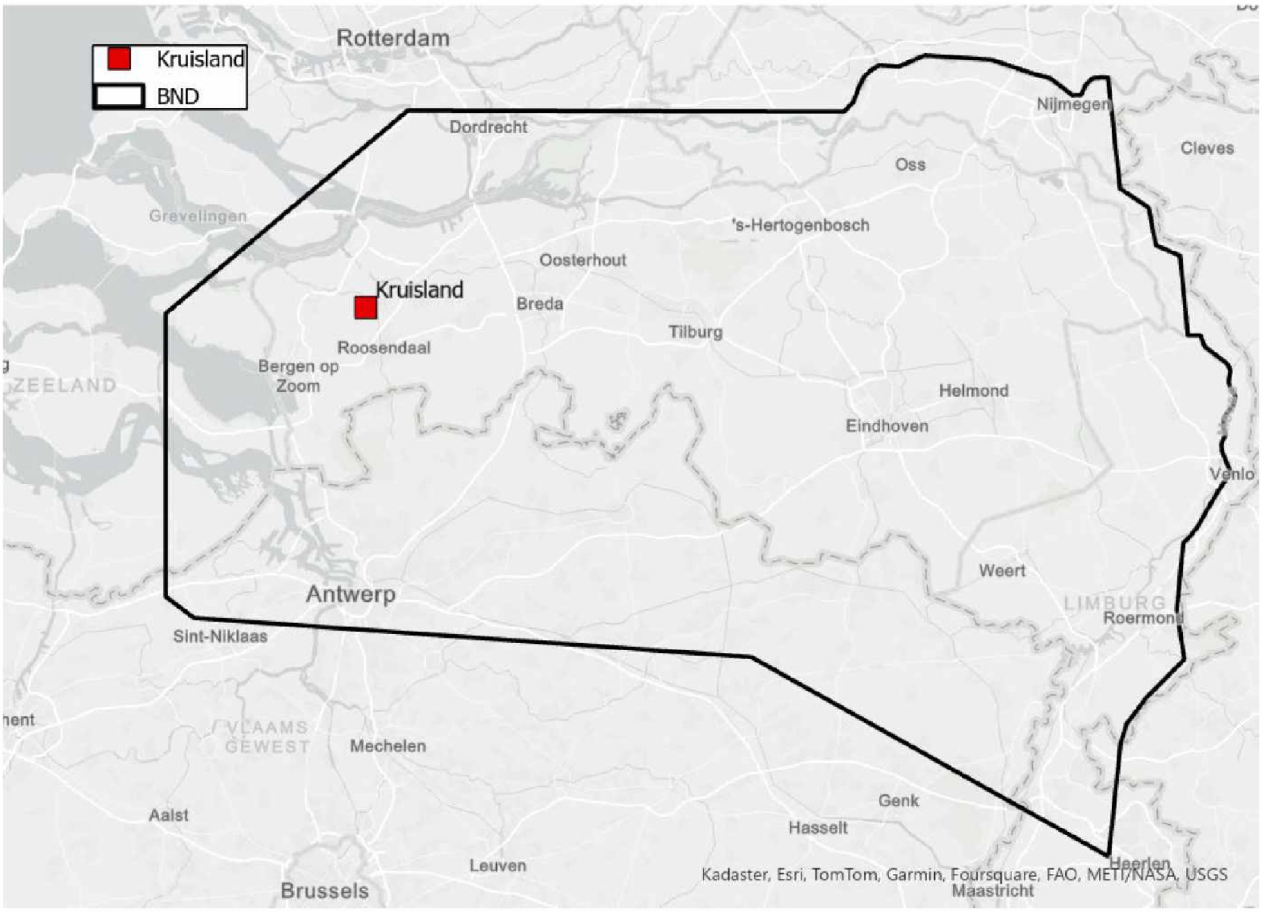


Figuur 2-1: Het modelinstrumentarium van het Brabant model volgens de principes van de HGK

Het Brabantmodel is voor het laatst grondig aangepast in 2018-2019 (Royal HaskoningDHV, 2019). In dit rapport is de opzet van het gehele modelinstrumentarium uitgebreid beschreven. In voorliggend rapport wordt ingegaan op de veranderingen en verbeteringen die voor het Kruislandmodel zijn gemaakt.

2.2 Provinciale Brabantmodel2023

Het Kruislandmodel dekt een ruim gebied in West-Brabant om de winning Kruisland heen. Voor het bepalen van de stijghoogten op de rand van het grondwatermodel wordt gebruik gemaakt van het grotere provinciale model. Dit model dekt de gehele provincie en een ruime zone hieromheen (Figuur 2-2). Het provinciale model uit 2018 (Royal HaskoningDHV, 2019) is geactualiseerd met een nieuw ondergrondmodel zodat dit goed aansluit op het Kruislandmodel. Daarnaast is het model geactualiseerd met gegevens over neerslag, verdamping en grondwateronttrekkingen tot en met het jaar 2019. Dit noemen we het Brabantmodel2023.



Figuur 2-2: Modelgrenzen van het Brabantmodel

Het Brabantmodel2023 heeft een resolutie van 250 meter. Met het model kan een representatieve gemiddelde grondwaterstand worden berekend gebaseerd op de periode 2009-2016. De opbouw en parameters van de modellagen zijn gebaseerd op het Ondergrondmodel Zuid-Nederland (OZNL) en het H3O model Voorkempen (H3OVK). Het model bevat alle winningen van Brabant Water en Evides, industriële winningen en de beregeningsputten voor de landbouw.

2.3 Kruislandmodel

Het Kruislandmodel is gemaakt om de effecten van de mogelijk toekomstige grondwaterwinning Kruisland in beeld te brengen. Het model kan gezien worden als een uitsnede van het grotere Brabantmodel, waarbij een aantal verfijningen en verbeteringen zijn aangebracht.

Tijdens de zoektocht naar een nieuwe grondwaterwinning is eerder een grondwatermodel gemaakt. Met dit model zijn effecten van mogelijke winningslocaties in beeld gebracht. Dit model was gebaseerd op het ondergrondmodel REGIS II en het model was niet gekalibreerd. Voor het uitvoeren van de Landschappelijk Ecologische Systeemanalyses (LESA's) zijn vergelijkingen gemaakt tussen berekende en gemeten grondwaterstanden en stijghoogten. Hieruit bleek dat er soms nog grote afwijkingen voorkwamen. Voor de LESA's is aanvullend veldwerk uitgevoerd en zijn aanbevelingen gedaan voor verbetering van het model. Deze aanbevelingen zijn overgenomen en verwerkt in het nieuwe Kruislandmodel.

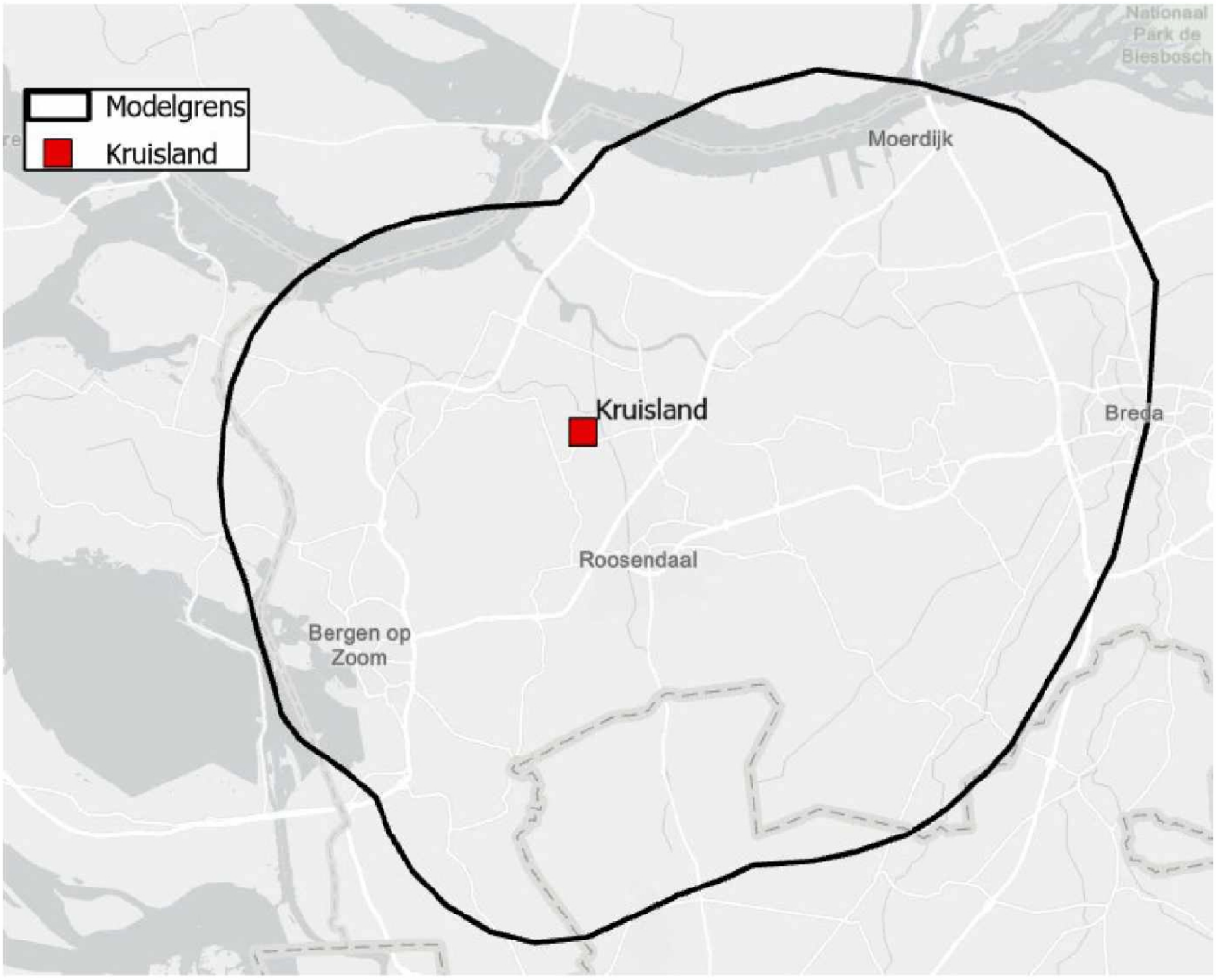
De belangrijkste aanpassingen van het Kruislandmodel ten opzichte van het Brabantmodel2018 zijn:
- MODFLOW6 programmatuur zodat 3D gerekend kan worden;
- Een nieuw ondergrondmodel (H3O Voorkempen);
- Uitbreiding van het aantal modellagen;
- Geactualiseerde peilenkaart voor het poldergebied;
- Toevoegen van gedetailleerde data in natuurgebieden (leemlagen, waterpeilen);
- Het bepalen van de beregeningshoeveelheden voor de jaren 2017-2019.

Hoofdstuk 4 gaat nader in op deze verbeteringen.

3 Modelopzet Kruislandmodel

3.1 Modelgrenzen

Het modelgebied omvat een ruim gebied om de winning Kruisland (Figuur 3-1).



Figuur 3-1: Modelgrenzen van het Kruislandmodel

Het modelgebied is zo bepaald dat de vooraf verwachte effecten van de winning Kruisland niet verder reiken dan de modelgrens. Hiervoor is een berekening uitgevoerd met het provinciale Brabantmodel. In dit model is het effect van de winning Kruisland doorgerekend. De modelgrens is zo ver weg gelegd dat deze binnen de 2 cm contourlijn van het berekende effect in het bepompte pakket ligt.

3.2 Programmatuur

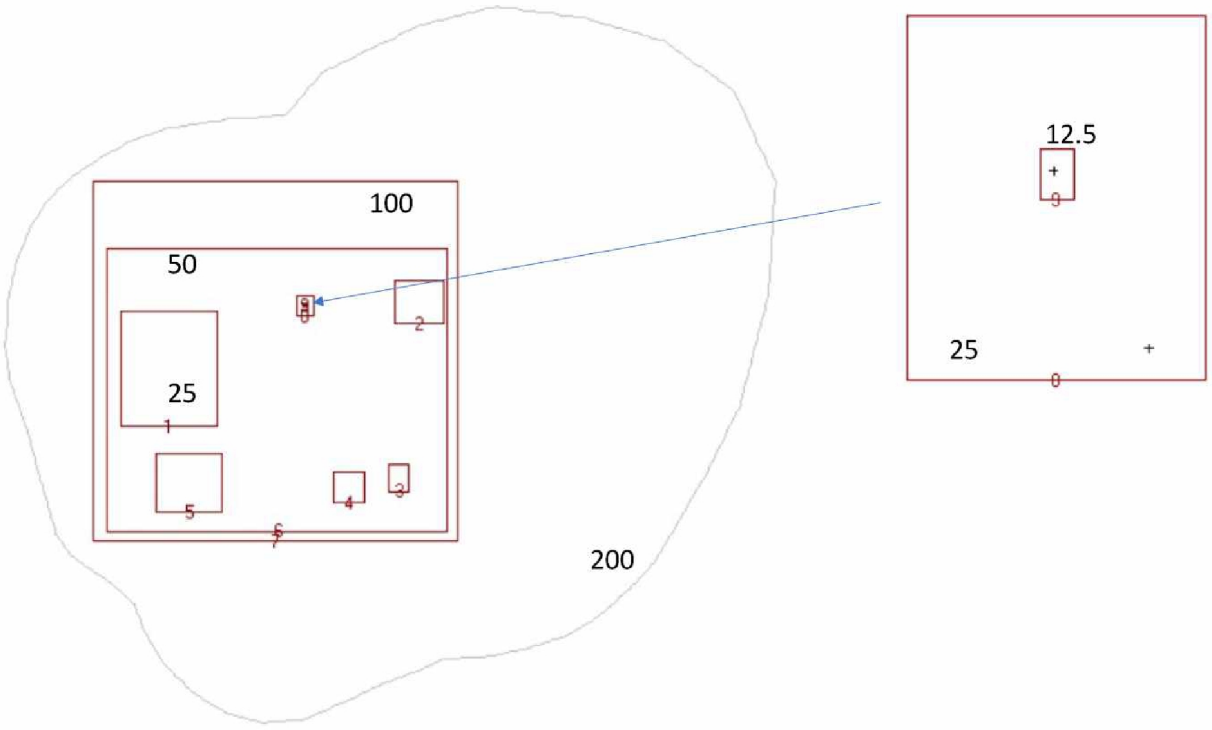
Grondwaterstroming in de verzadigde zone wordt berekend met MODFLOW6 (5.1.2.e e.a., 2017). De onverzadigde zone modellering voor de bepaling van de grondwateraanvulling wordt uitgevoerd met het programma FLUZO (Royal HaskoningDHV, 2019).

De TRISHELL wordt gebruikt om de modellen gestructureerd op te zetten. Het omzetten naar MODFLOW-bestanden (Fli2MF6.exe) en het rekenen met MODFLOW 6 gebeurt niet in de TRISHELL. Voor nabewerkingen en het werken met MODPATH worden FLOPY en Python-scripts gebruikt.

Het lagenmodel is gemaakt met de NHI-lagentool (Royal HaskoningDHV 2019b). Hiermee kan aangegeven worden welke ondergrondlagen in welke watervoerende- of scheidende laag ondergebracht worden. De tool werkt met bestanden die zijn omgezet naar het bestandsformaat IDF. Deze lagentool is in 2017 ontwikkeld door Royal HaskoningDHV in samenwerking met Deltares en draait binnen de Deltashell.

3.3 Resolutie (ruimte en tijd)

Met MODFLOW6 is het mogelijk het grid te verfijnen, met een zogenaamd unstructured grid, dat wil zeggen variabele gridgroottes. Het model is doorgerekend met geneste rasters ("quadpatch" grid) met een grootte variërend van 12,5 tot 200 meter. De geneste rasters hebben een geleidelijke overgang naar de fijnere rasters. Dit is nodig voor het uitvoeren van correcte stroombaanberekeningen (met programma MODPATH). Een voorbeeld is opgenomen in Figuur 3-2.



Figuur 3-2: Modelgrens en zones met gridgrootte van 200 tot 12,5 meter

Het grondwatermodel rekent voor de periode 2007 - 2019. Het grondwatermodel is geijkt voor de periode 2009 tot en met 2016, omdat dit een lange periode is met een gemiddelde grondwateraanvulling (Royal HaskoningDHV, 2019). Binnen deze periode komen droge en natte jaren voor. Voor de periode 2009 – 2016 was alleen het jaar 2012 een gemiddeld relatief nat jaar met een hoger neerslagoverschot. De andere jaren waren gemiddeld qua neerslagoverschot. De zomer van 2018 wordt gebruikt voor inzicht in het effect van een erg droge zomer.

3.4 Tijdstappen

Het grondwatermodel is doorgerekend met tijdstappen van 5 dagen.

3.5 Randvoorwaarden

Zowel voor de zij- als bovenranden van het model zijn randvoorwaarden benodigd die de uitwisseling met de omgeving beschrijven. De onderrand van het model is ondoorlatend verondersteld.

Op de zijranden van het model is een vaste stijghoogte opgegeven, gebaseerd op meetgegevens. Alleen voor Vlaanderen is gebruik gemaakt van eerdere modelgegevens omdat hier voldoende metingen ontbreken. De uitwisseling met de omgeving aan de bovenrand van het model wordt gevormd door de waterlopen en overige drainagemiddelen.

3.6 Berekening grondwateraanvulling

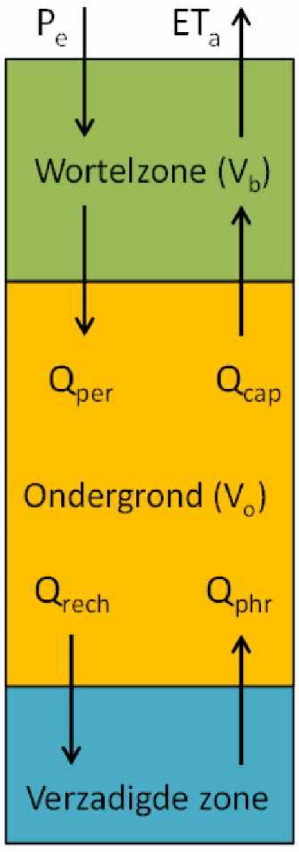
FLUZO (versie 2.4.3) is een bakjesmodel dat met gegevens van neerslag, gewas, bodem, referentie verdamping en grondwaterstand de waterbalans van de onverzadigde zone oplost. Het model is opgedeeld in de wortelzone, ondergrond en de verzadigde zone.

Wortelzone
De wortelzone heeft over het algemeen een constante dikte en reduceert alleen in situaties wanneer de grondwaterstand zich in de wortelzone bevindt. De dikte van de wortelzone is afhankelijk van het type gewas of grondgebruik. Effectieve neerslag (P_e) en capillaire opstijging (Q_{cap}) zijn invoertermen waarmee de actuele verdamping (ET_a) en percolatie (Q_{per}) worden berekend.

Ondergrond
De dikte van de ondergrond varieert in de tijd afhankelijk van de grondwaterstand. Wanneer de grondwaterstand gelijk is aan of hoger is dan de onderkant van de wortelzone is de dikte van de ondergrond nul. Percolatie vanuit de wortelzone naar de onverzadigde zone en capillaire opstijging vanuit de verzadigde zone dienen als invoerterm in de waterbalans van de ondergrond. Grondwater-aanvulling naar de verzadigde zone (Q_{rech}) en capillaire opstijging naar de wortelzone (Q_{cap}) zijn uitvoer van de waterbalans. De ondergrond kan ook aangevuld worden met water vanuit de verzadigde zone (Q_{phr}).

De verzadigde zone wordt met het grondwatermodel gemodelleerd. Dit model levert de grondwaterstanden en dus de dikte van de onverzadigde zone. FLUZO levert de grondwateraanvulling/capillaire opstijging aan het grondwatermodel

Per grondgebruikstype wordt de potentiële verdamping omgezet naar actuele verdamping met gewasfactoren. Er is rekening gehouden met interceptie-verdamping. Elk gewas heeft een eigen interceptiereservoir met een maximumcapaciteit. Door verdamping droogt dit reservoir gedurende de dag uit. De werkelijke interceptiecapaciteit verschilt per type gewas en is berekend uit de bodembedekkingsfractie.



Figuur 3-3. Componenten van de waterbalans

Documentatie
Voor een gedetailleerde beschrijving van FLUZO zijn twee Engelstalige documenten beschikbaar. In de jaren tachtig is een beschrijving gemaakt van de modelconcepten inclusief de gebruikte formules (Anoniem). Er is een achtergronddocument beschikbaar in de handleiding van Triwaco (Royal Haskoning, 2011) dat ingaat op de stappen die nodig zijn om een model op te zetten.

3.7 Begintoestand

Om een grondwatermodel tijdsafhankelijk door te rekenen is het nodig om de beginsituatie te definiëren met grondwaterstanden en stijghoogten. Dit is gedaan met een stationaire berekening en een gemiddelde grondwateraanvulling. De stationaire grondwateraanvulling is overgenomen uit het Brabantmodel (Royal HaskoningDHV, 2019).

3.8 Aannames grondwatermodel

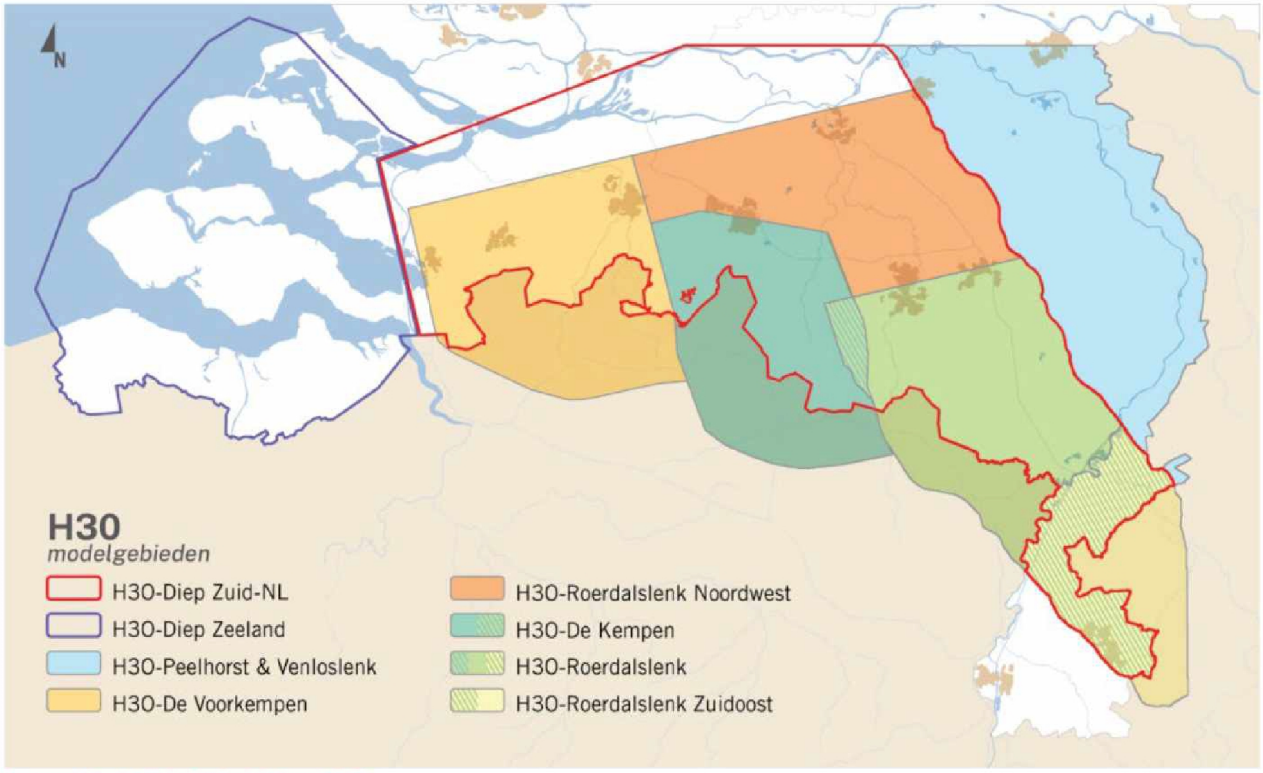
Het Brabantmodel is een 3D grondwaterstromingsmodel. In een quasi-3D model wordt aangenomen dat de horizontale stroming plaatsvindt in de watervoerende lagen (zand en grind) en verticale stroming binnen de scheidende lagen (klei-/leemlagen). Met MODFLOW6 is dit principe losgelaten en kan stroming zowel verticaal als horizontaal plaatsvinden.

4 Verbeteringen en aanvullingen Kruislandmodel

4.1 Ondergrondmodel H3O Voorkempen en Ondergrondmodel Zuid-NL

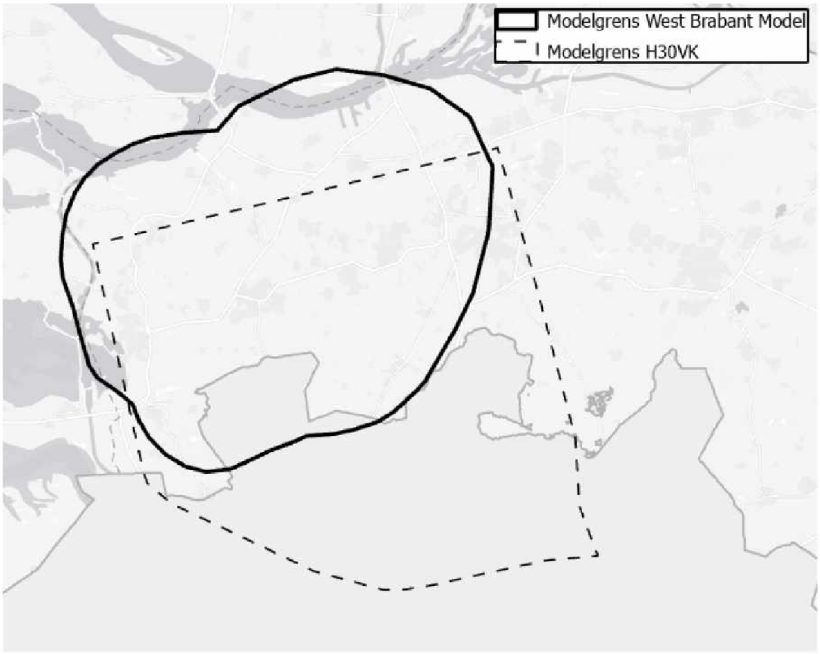
Er is gebruik gemaakt van twee nieuwe ondergrondmodellen:

1. Het lagenmodel voor Zuid-Nederland is door TNO gemaakt voor nieuwe regionale modellen in Brabant en Limburg. Het Ondergrond Zuid-Nederland model (OZNL) is een samenvoeging van vijf beschikbare H3O modellen (Figuur 4-1) in de grensstreek van Nederland, België en Duitsland aangevuld met de beschikbare nationale geologische modellen van deze drie landen (TNO, 2022). Er is door TNO geen nieuw geologisch model gemodelleerd, er zijn enkele aanpassingen gedaan om het model beter geschikt te maken voor het gebruik in een grondwatermodel;
2. Het H3O Voorkempenmodel van TNO (H3OVK). Dit H3O model is begin 2023 gereedgekomen (TNO, 2023) en maakt daarom nog geen deel uit van het Ondergrond Zuid-Nederland model. Dit H3O model dekt voor een groot gedeelte het interessegebied in West-Brabant af (Figuur 4-2).



Figuur 4-1: H3O modellen (Bron: TNO)

Voor het noordelijk en meeste westelijk deel van het Kruislandmodel zijn geen H3O modellen beschikbaar. Hier vallen we terug op REGIS II versie 2.2 (REGIS II).



Figuur 4-2: Grens van West-Brabantmodel ten opzichte van H3O Voorkempen

Vooraf is een analyse gemaakt naar de meerwaarde van het nieuwe H3OVK (Royal HaskoningDHV, 2023). De conclusie was dat de schematisatie van de Waalreklei verbeterd is. Daarom is het waardevol om deze nieuwe informatie over te nemen.

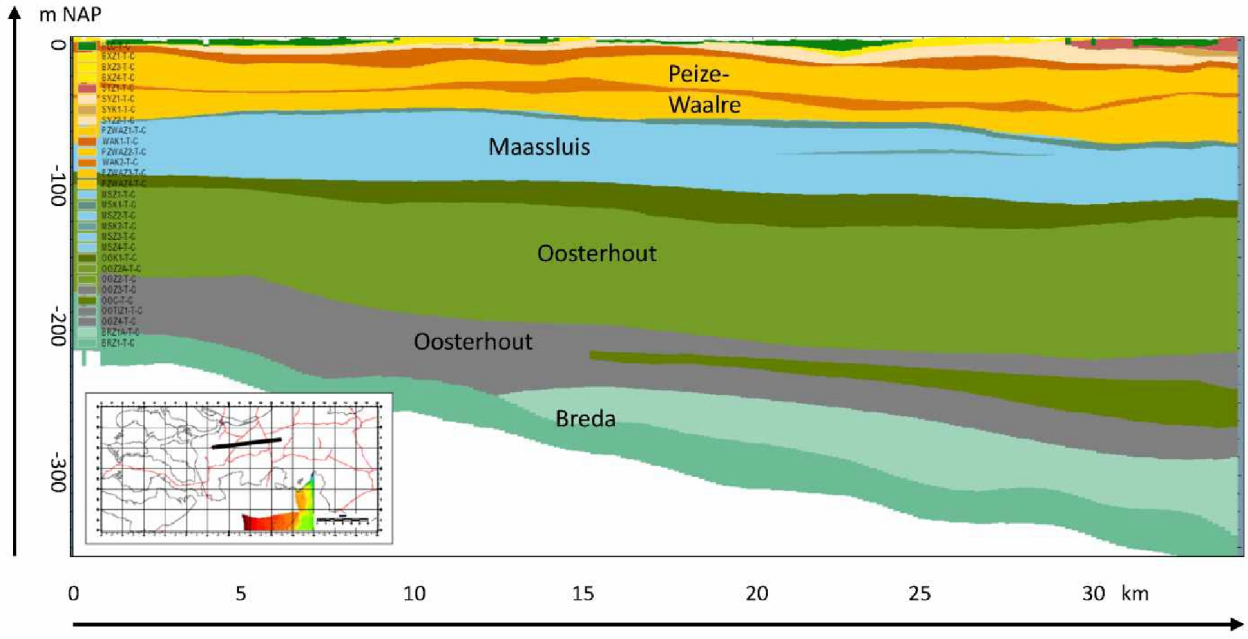
In de basisgegevens van H3OVK zaten nog enkele inconsistenties. Lokaal lag de bovenkant van een laag hoger dan de onderkant van de daarboven liggende jongere laag. Het is de bedoeling dat deze allemaal netjes op elkaar aansluiten. Deze inconsistenties zijn teruggemeld aan TNO en gecorrigeerd met behulp van de IDFCONSISTENCY-tool van iMod (Deltares). Hiermee worden de lagen van boven naar beneden gecorrigeerd.

4.2 Lagenmodel

Het 29-lagenmodel is afgeleid uit de beschikbare geo(hydro)logische ondergrondmodellen: OZ-NL en H3OVK (zie paragraaf 4.1). Bij het splitsen en samenvoegen van de modellagen is de NHI-lagentool gebruikt. De 51 lagen uit het ondergrondmodel zijn verdeeld over 29 modellagen (Figuur 4-3 en Tabel 4-1).

De hydrologische basis van het model wordt gevormd door de oligocene klei van de Formatie van Rupel/Tongeren. In Vlaanderen wordt de basis gevormd door de Boom klei. Boven deze formatie ligt de Formatie van Breda, die dus nog is meegenomen in het lagenmodel.

Uit de analyse van de pompproef blijkt dat 80% in de bovenste helft wordt opgepompt en 20% in de onderste helft. Om dit goed te simuleren hebben we het deel van de Oosterhout Formatie waaruit gepompt gaat worden opgesplitst in vier modellagen. Hierdoor kunnen we verschillende eigenschappen toekennen op verschillende dieptes van de formaties. Het betreft de Oosterhoutzanden 2 (Ooz2) en modellagen 19 tot en met 22.



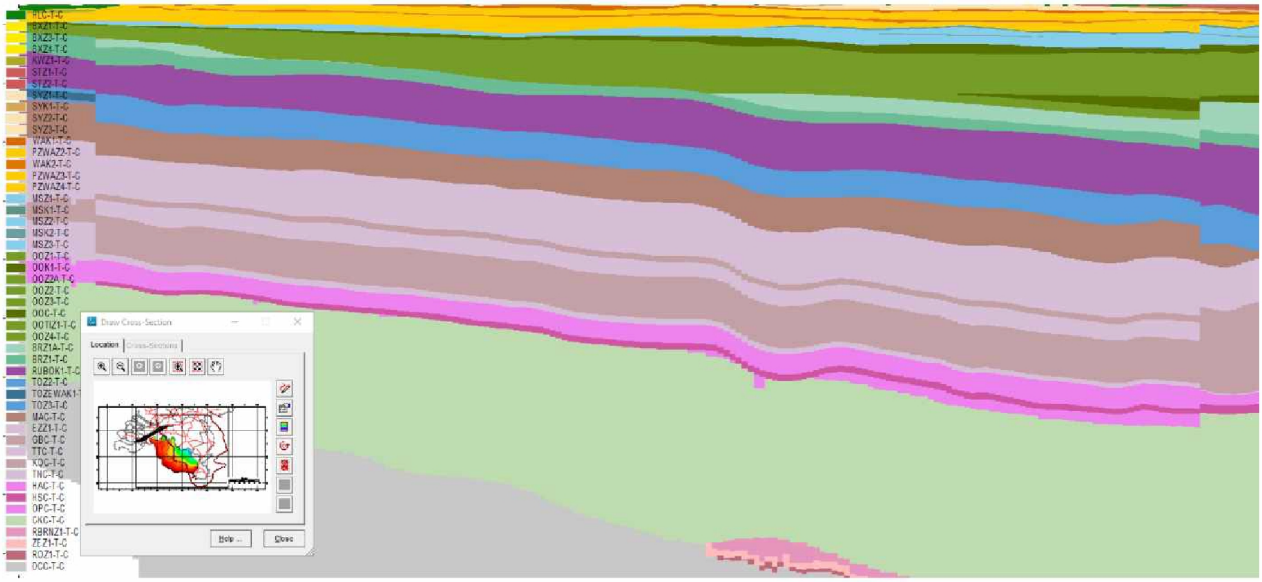
Figuur 4-3: Geologisch lagenmodel van west naar oost

Royal HaskoningDHV

Tabel 4-1: Lagenmodel

Laagnummer	Code	Naam Formatie	Type modellaag
1	Hlc	Holoceen	Complex
2	Bxz1, krz1, bxz2	Boxtel, Kreftenheye	Aquifer
-2	Bxk1	Boxtel	Aquitard
3	Bxz3, bxz4	Boxtel	Aquifer
4	Krz3, kwz1, stz1	Kreftenheye, Koewacht, Sterksel	Aquifer
-4	Stk1	Sterksel	Aquitard
5	Stz2	Sterksel	Aquifer
6	Syz1	Stramproy	Aquifer
-6	Syk1	Stramproy	Aquitard
7	Syz2, syz3, syz4	Stramproy	Aquifer
8	Pzwaz1	Peize Waalre	Aquifer
-8	Wak1	Waalre	Aquitard
9	Pzwaz2	Peize Waalre	Aquifer
-9	Wak2	Waalre	Aquitard
10	Pzwaz3	Peize Waalre	Aquifer
-10	Wak3	Waalre	Aquitard
11	Pzwaz4	Peize Waalre	Aquifer
12	Mlc	Malle	Complex
13	Msz1	Maassluis	Aquifer
-13	Msk1	Maassluis	Aquitard
14	Msz2	Maassluis	Aquifer
-14	Msk2	Maassluis	Aquitard
15	Msz3	Maassluis	Aquifer
-15	Msc	Maassluis	Complex
16	Msz4, kiz2, kiz3, kiz5	Maassluis, kiezeloöliet	Aquifer
17	Ooz1	Oosterhout	Aquifer
-17	Ook1	Oosterhout	Aquitard
18	Ooz2a	Oosterhout	Aquifer
19	Ooz2	Oosterhout	Aquifer
20	Ooz2	Oosterhout	Aquifer
21	Ooz2	Oosterhout	Aquifer
22	Ooz2	Oosterhout	Aquifer
23	Ooz3	Oosterhout	Aquifer
24	Ooc	Oosterhout	Complex
25	Ootiz1	Oosterhout	Aquifer
26	Ooz4	Oosterhout	Aquifer
-26	Klc	Kasterlee	Complex
27	Brz1a	Breda	Aquifer
28	Brz1	Breda	Aquifer
29	Brk1	Breda	Aquitard

Scherpe overgangen in de laagschematisatie tussen H3OVK en het lagenmodel van Zuid-Nederland zijn met een tool geleidelijker ingebracht. Dit is gedaan door de k-waarde zo aan te passen dat de overgang in kD-waarde geleidelijker plaatsvindt. Het lagenmodel met de ligging van de boven- en onderkant van de lagen is dus niet aangepast. De overgang tussen de twee modellen zit aan de rand van het modelgebied, rechts in Figuur 4-4.



Figuur 4-4: Dwarsdoorsnede van het nieuwe lagenmodel

4.3 Grondwaterwinning Kruisland

Grondwater zal naar verwachting worden gewonnen uit 10 winputten. Er is aangenomen dat deze 10 putten evenredig worden verdeeld over het puttenveld. Het onttrekkingsdebiet van 3,5 miljoen m^3/jaar is gelijk verdeeld over de 10 putten en gelijk over de tijd verdeeld. De onttrekking vindt plaats uit de Formatie van Oosterhout.

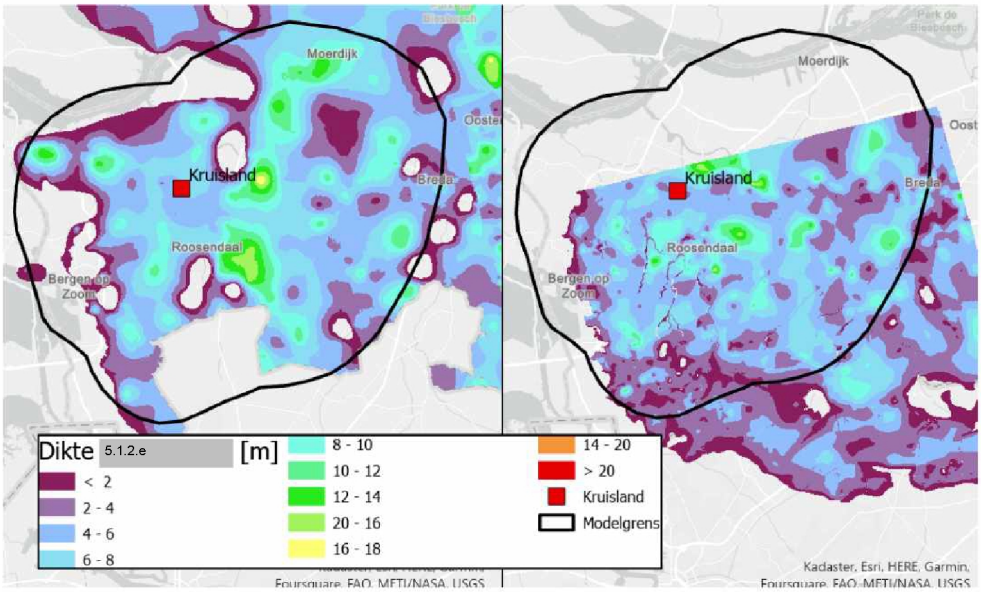
4.4 Waalreklei

De eerste weerstand biedende laag in de ondergrond is vrijwel overal de eerste kleiige eenheid van de Formatie van Waalre (Wak1). Deze formatie bestaat in West-Brabant uit Vroeg-Pleistocene estuariene afzettingen. Hoewel de Waalreklei in de regel getypeerd wordt als een kleipakket, is deze formatie vaak sterk gelaagd en bestaat uit kleiafzettingen met inschakelingen van zand, leem en veen. Daarmee is allerminst zeker dat deze weerstandbiedende laag overal vergelijkbaar van weerstand is. Lokaal kan de doorlatendheid relatief hoog zijn.

De Waalreklei is in H3OVK anders geschematiseerd dan in REGIS II waarin nog gaten in de kleilaag voorkwamen (Figuur 4-5): een zone ten noordoosten van Kruisland en twee zones ten zuidwesten van Roosendaal. In H3OVK komen deze gaten in de Waalreklei niet voor. Op locaties waar gaten voorkomen in de Waalreklei volgens REGIS II.2 is door Brabant Water nader onderzoek gedaan met boringen:

- In het Everland langs de Molenbeek zijn een boring en nieuwe peilbuis geplaatst (DINO-code B49F1600). In de boring is Waalreklei aangetroffen en over deze laag komt een potentiaalverschil voor in gemeten stijghoogten (Royal HaskoningDHV, 2022d);
- In de buurt van het Rozenven zijn een boring en nieuwe peilbuis geplaatst (DINO-code B49F1589). Hier is van 8 tot 12 meter onder maaiveld Waalreklei met tussen geschakelde zandlagen aangetroffen (Royal HaskoningDHV, 2022e).

Deze onderzoeken bevestigen dat de gaten weinig plausibel zijn en dat het nieuwe H3OVK ondergrondmodel een betere weergave is van de werkelijkheid.

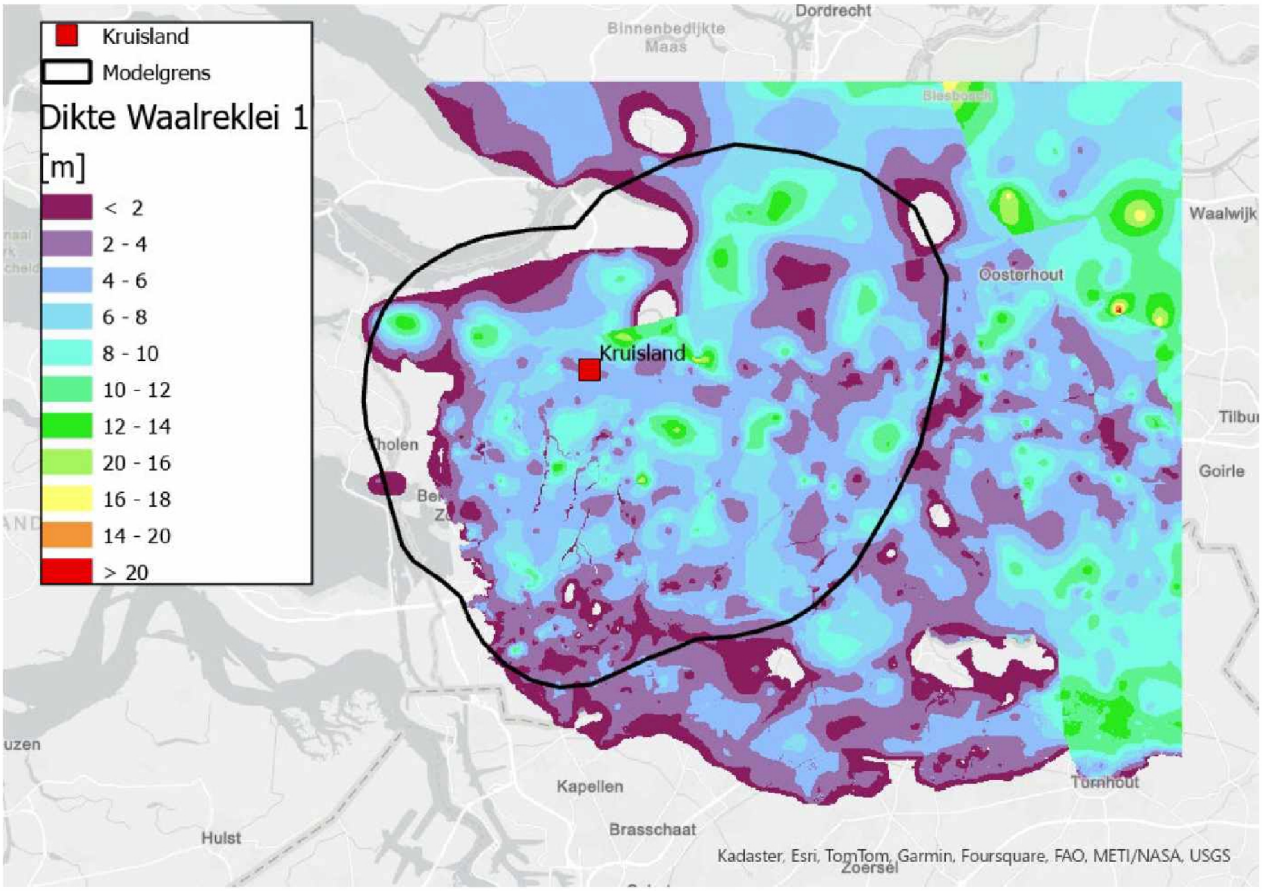


Figuur 4-5: Dikte Waalreklei 1 [m] in REGIS II (links) en H3OVK (rechts).

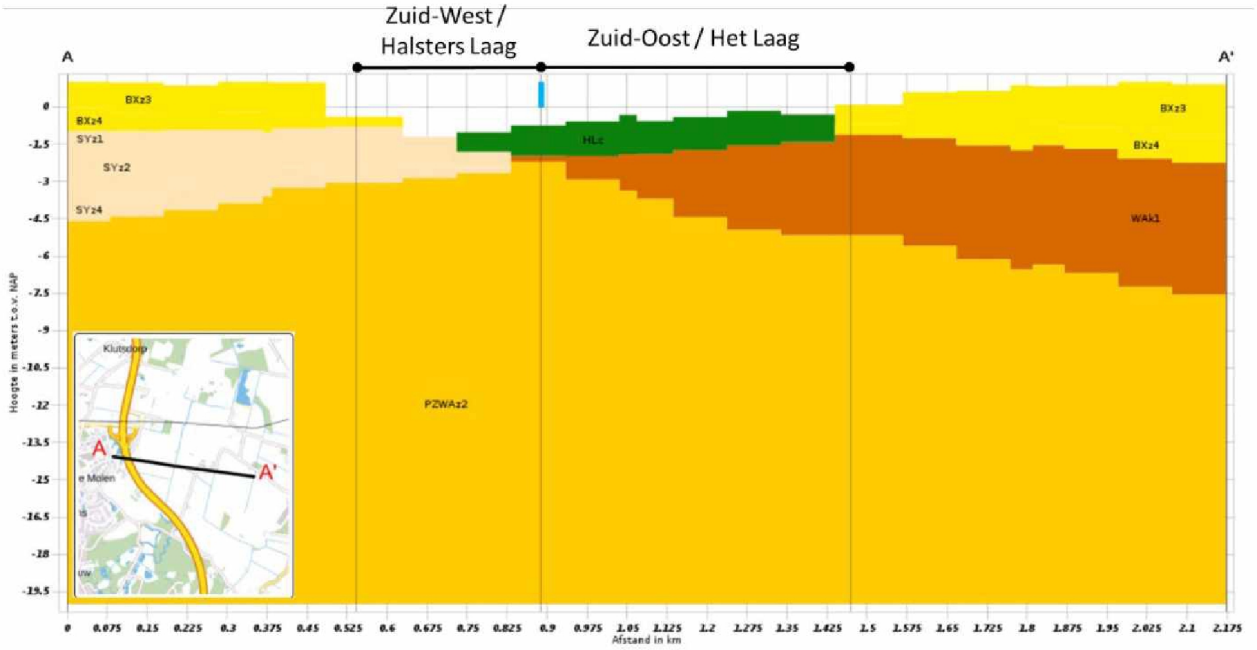
De aan- of afwezigheid, dikte, samenstelling en diepte van de Waalreklei hebben invloed op de berekende grondwaterstand. Een minder grillig patroon in dikte van de Waalreklei resulteert in een minder grillig patroon in berekende effecten op de grondwaterstand ten gevolge van de grondwaterwinning.

Voor het Kruislandmodel is H3OVK en in het noordelijke gedeelte REGSI II gebruikt. De overgang van deze twee modellen is goed te zien in Figuur 4-6, bijvoorbeeld boven de tekst Kruisland in de figuur. Het gat in de Waalreklei is hier gedeeltelijk opgevuld. Het resterende gat heeft maar een kleine invloed op de berekende grondwaterstanden, omdat hier ook holocene kleilagen in de ondergrond voorkomen.

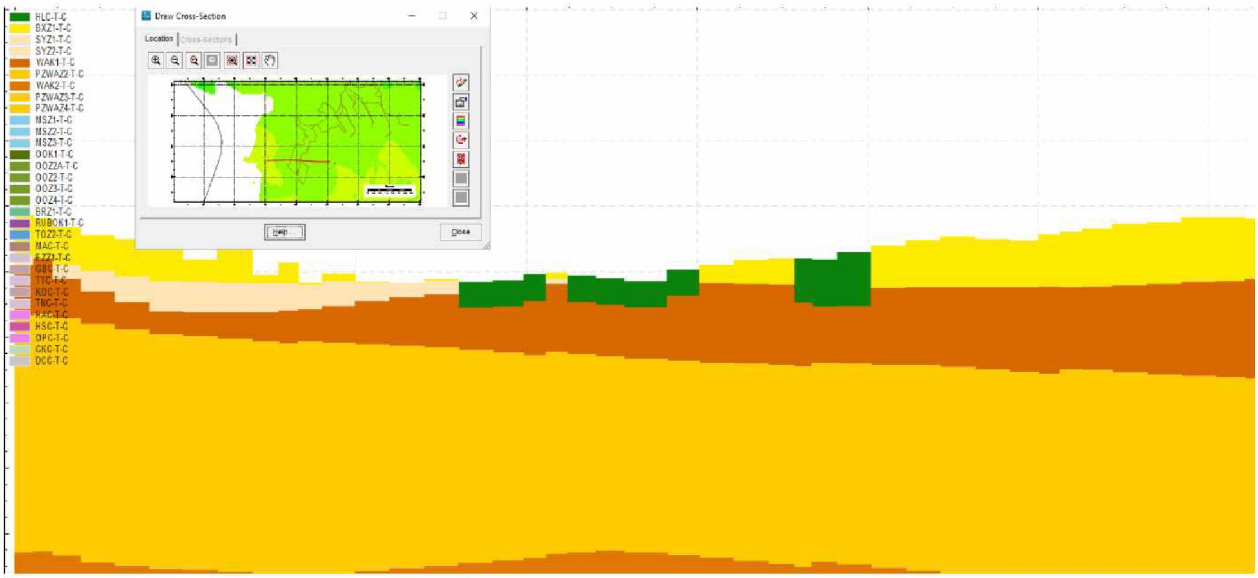
Een voorbeeld van een gebied waar de inzichten over de aanwezigheid van de Waalreklei zijn veranderd is het Halsters Laag. Figuur 4-7 is de doorsnede van de ondergrond gebaseerd op REGIS II, zoals eerder weergegeven in de LESA voor Halsters Laag (Royal HaskoningDHV, 2022b). In het nieuwe ondergrondmodel H3OVK, zoals verwerkt in het grondwatermodel, loopt de Waalreklei wel door (Figuur 4-8).



Figuur 4-6: Dikte Waalreklei na samenvoeging REGIS II en H3OVK



Figuur 4-7: Dwarsdoorsnede met toponiemen voor de bodemopbouw onder Halsters Laag (zuid) zoals weergegeven in Dinoloket in het ondergrondmodel REGIS II. De blauwe streepjes markeren de locatie van de Ligne. De Waalreklei (bruin) ontbreekt in het westelijk gedeelte van het natuurgebied



Figuur 4-8: Dwarsdoorsnede voor de bodemopbouw onder Halsters Laag zoals geschematiseerd in het ondergrondmodel H3OVK. De Waalreklei (in bruin) is overal aanwezig in het natuurgebied

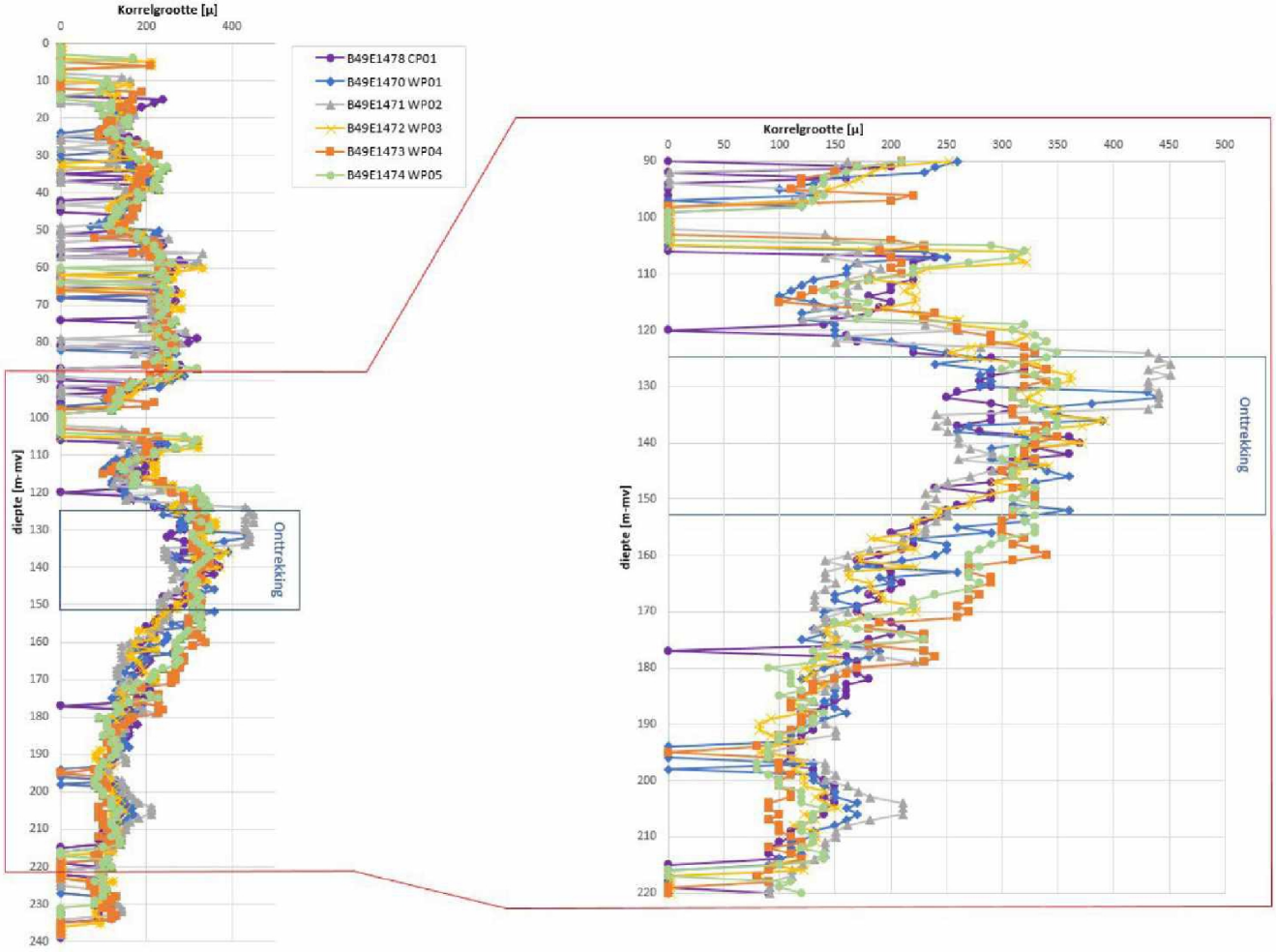
4.5 Oosterhout zanden rond Kruisland

Uit de pompproef en aanvullend diep bodemonderzoek is veel detailinformatie beschikbaar gekomen over de diepe bodemopbouw. Grondwater in Kruisland wordt onttrokken uit de Formatie van Oosterhout. Uit dit onderzoek blijkt dat de opbouw en doorlatendheid van deze laag over de diepte verschilt. Deze verschillen hebben geen effect op de berekende veranderingen in stijghoogten en grondwaterstanden, maar wel op de berekende stroombanen. Daarom is rond Kruisland het model verder gedetailleerd.

Analyse korrelgrootte

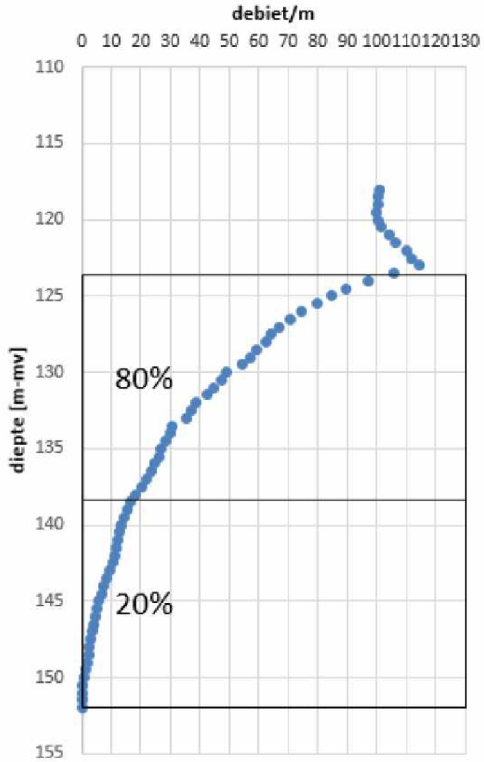
Door TNO zijn korrelgrootteanalyses uitgevoerd. Resultaten van dit onderzoek zijn samengevat door Brabant Water (2023). De korrelgrootte per laag van de proefput en vijf waarnemingsputten zijn samen in Figuur 4-9 weergegeven. De zanden in het filtertraject van de pompput hebben een grotere korreldiameter.

Voor de laag op 126 en 127 meter diepte met veel schelpen kon de doorlatendheid niet worden vastgesteld; vlak hierboven is de doorlatendheid 15 tot 33 m/d. Het betreft een laag die alleen in één boring is aangetroffen. Het gaat om een lokaal fenomeen en daarom is hoge doorlatendheid van de schelpenlaag niet overgenomen in het grondwatermodel.



Figuur 4-9: Korrelgrootteverdeling in proefput en waarnemingsputten (Bron: Brabant Water, 2023)

Het resultaat van een flowmeting laat zien dat in de proefput 80% van het opgepompte water in de bovenste helft van het filter wordt opgepompt (Figuur 4-10). Op basis van de flowmeting en korrelgrootteverdeling is het bovenste deel van het filter geschematiseerd met een hogere doorlatendheid van 33 m/d. Voor de rest van het pakket (modellaag 19) is een waarde van 14,5 m/d aangehouden. Zo komt de totale kD waarde overeen met hetgeen in de pompproef is bepaald.



Figuur 4-10: Resultaten flowmeting (Bron: Brabant Water, 2023)

Met deze k-waarden is een debietsverdeling van 70%/30% te verwachten. Deze verdeling is aangehouden wetende dat de doorlatendheidsmetingen ook een mate van onzekerheid kennen.

Tabel 4-2: Aangepaste k-waarden in de Formatie van Oosterhout ten behoeve van stroombaanberekeningen

Laag	Diepte (m -mv)	Doorlatendheid in (m/d)		Verdeling debiet
		Initieel	Aangepast	
18	103-114	19	19	
19	114-124	19	14.5	
20	124-138	19	33	70%
21	138-152	19	14.5	30%
22	152-172	19	14.5	
23	172-182	9.5	9.5	
24	182-210	9.5	9.5	

4.6 Bergingscoëfficiënt

Grondwater kan geborgen worden in een freatische aquifer bij een stijgende grondwaterstand. De fractie van de grond waar nog water in kan wordt de freatische berging genoemd. Deze coëfficiënt verschilt per grondsoort van 0,05 tot 0,28. In afgesloten of semi-afgesloten pakketten kan water worden geborgen omdat de poriënruimte iets groter wordt als de waterdruk toeneemt (en ook een beetje doordat het water iets samengedrukt wordt). Deze bergingscoëfficiënt is veel kleiner. De coëfficiënten zijn berekend afhankelijk van de dikte en diepte van de lagen volgens de formule 5.1.2.e en 5.1.2.e (1990), waarbij een waarde van 50% van de formule is gehanteerd. Het toepassen van deze waarden gaf de beste fit tussen gemeten en berekende stijghoogten vlak na de start van de pompproef. De maximale waarden zijn in Tabel 4-3 gepresenteerd, omdat gemiddelde waarden weinig zeggen: een laag kan dun of afwezig zijn.

Tabel 4-3: Maximale bergingscoëfficiënt per modellaag

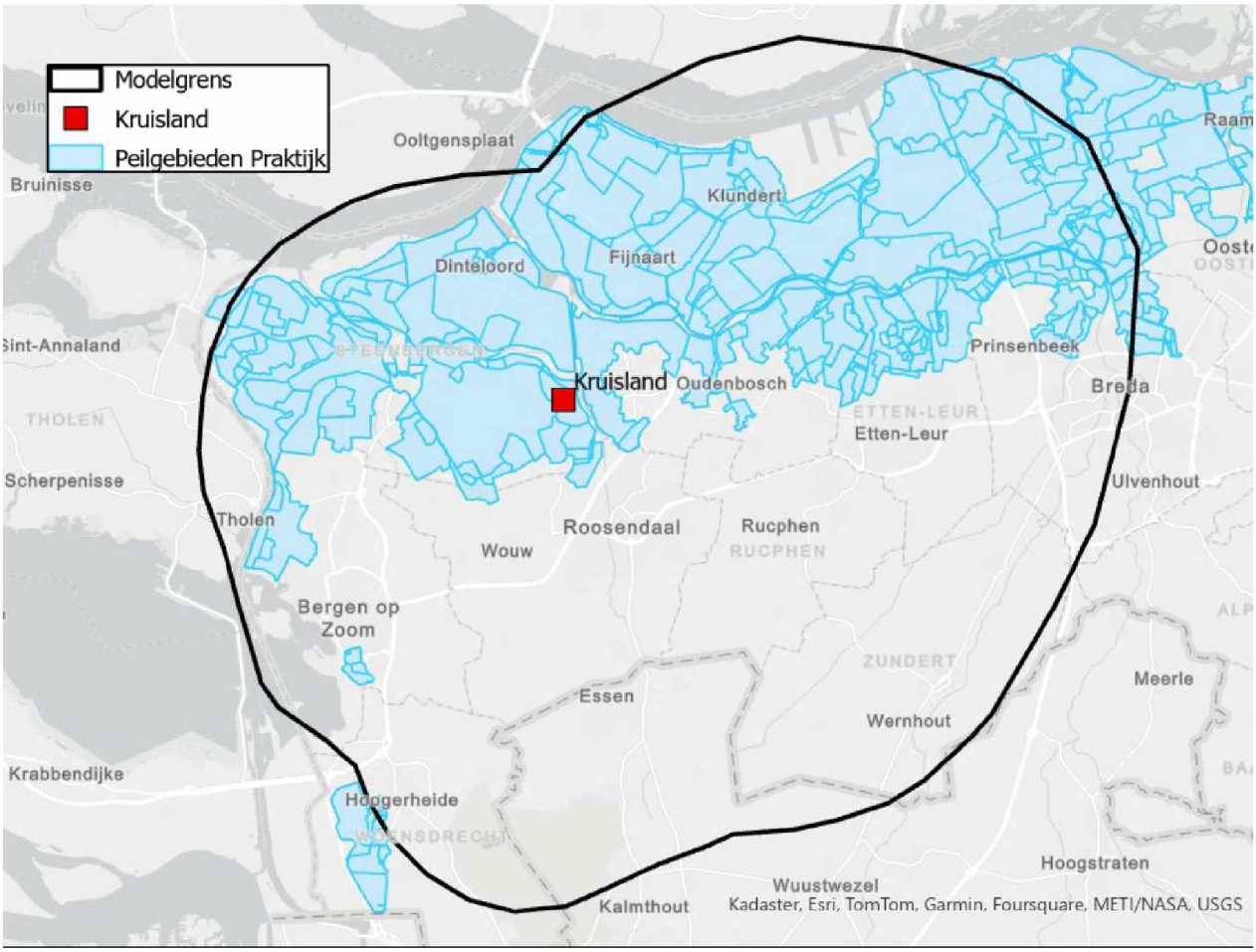
Laag	Watervoerend pakket	Scheidende laag
1	0.05-0.28	nvt
2	0.001	nvt
3	0.001	nvt
4	0.001	nvt
5	0.0003	nvt
6	0.0008	nvt
7	0.0003	nvt
8	0.0008	0.0007
9	0.0008	nvt
10	0.0001	0.0009
11	0.001	0.0002
12	0.00015	0.00008
13	0.0004	nvt
14	0.00008	0.0001
15	0.00025	0.00006
16	0.0004	nvt
17	0.00006	0.0002
18	0.00007	nvt
19	0.0005	nvt
20	0.0002	nvt
21	0.0006	nvt
22	0.00007	nvt
23	0.0003	nvt
24	nvt	nvt
25	0.0003	nvt
26	0.0003	

4.7 Oppervlaktewatersysteem

Het oppervlaktewatersysteem is overgenomen uit het Brabantmodel (Royal HaskoningDHV, 2019). Voor het vrij afwaterende gebied is gebruik gemaakt van eerdere informatie (HIB modellen) en RHDHV tools om het drainageniveau af te leiden.

Oppervlaktewatermodellen van waterschap Brabantse Delta zijn beschikbaar, maar alleen geschikt gemaakt voor het doorrekenen van hoogwatersituaties. Daarom zijn deze modellen niet gebruikt als invoer voor het grondwatermodel.

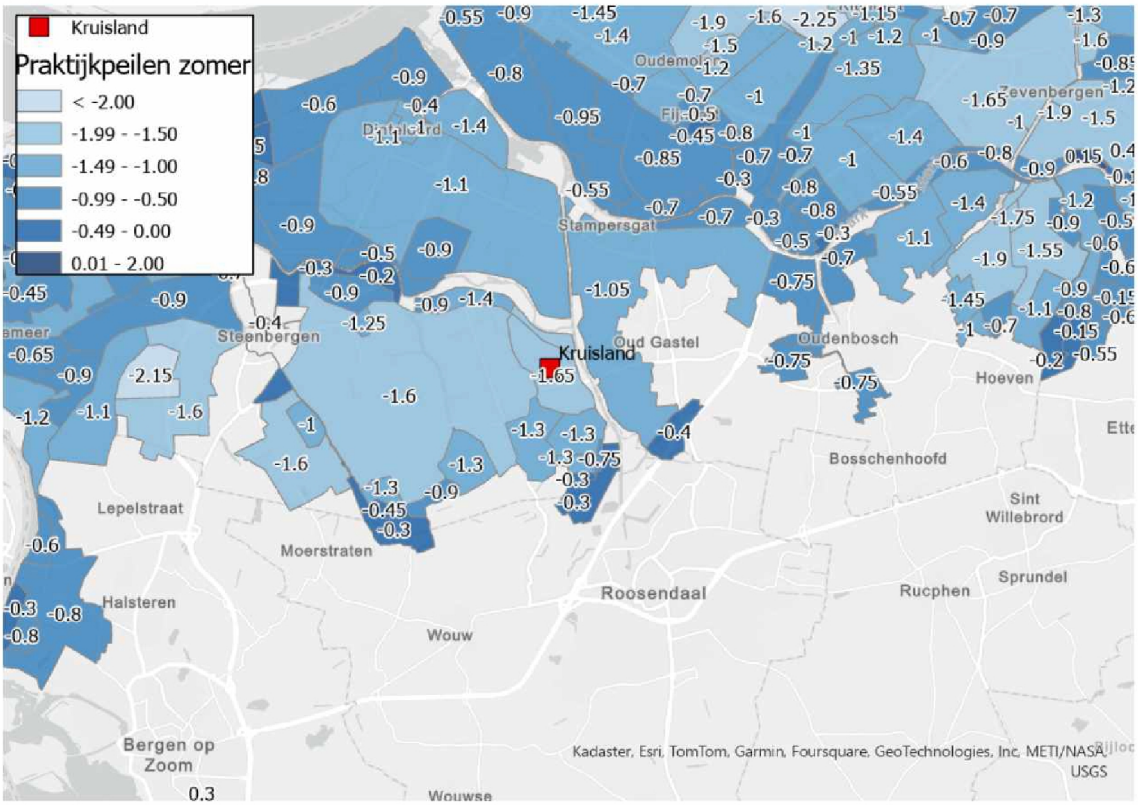
Waterschap Brabantse Delta heeft een nieuwe peilenkaart aangeleverd met de praktijkpeilen. Deze kaart is verwerkt in het model.



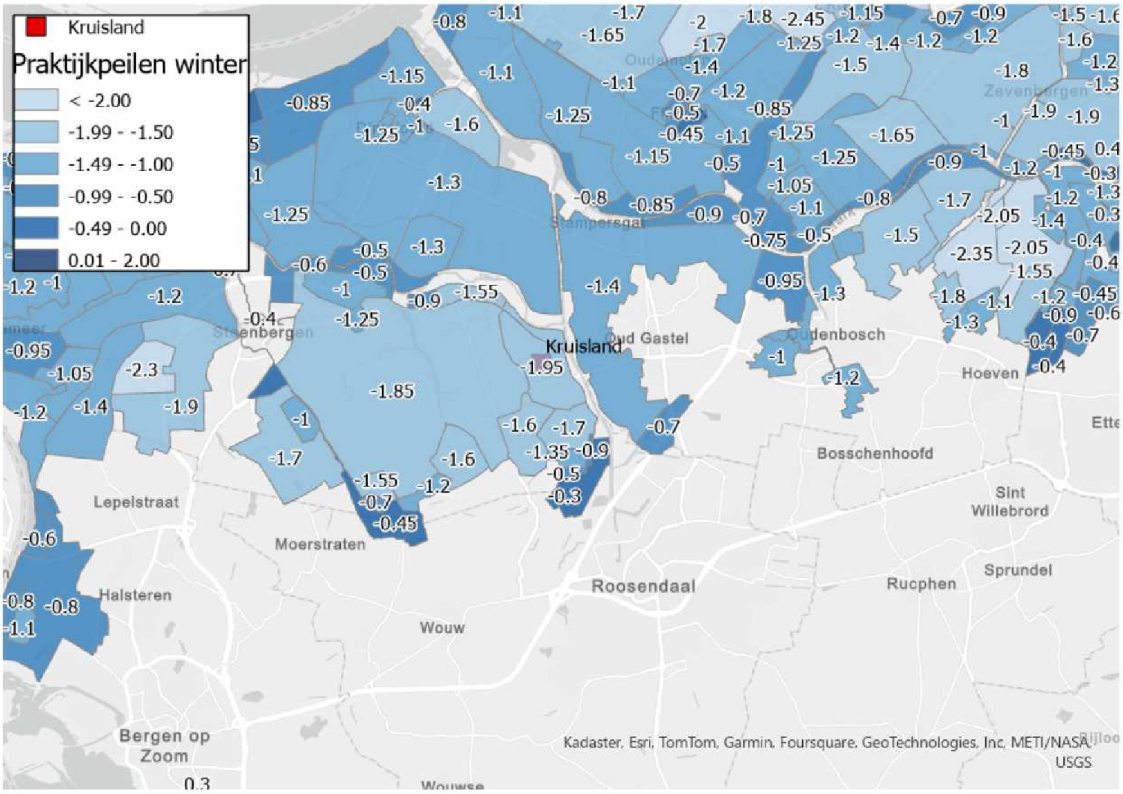
Figuur 4-11: Peilgebieden

De waterlopen uit de Top10 kaart[1] zijn opgenomen in het model. Voor elke cel in het model waarbinnen een Top10 waterloop ligt is een peil en drainageweerstand opgenomen die is opgeschaald naar de resolutie van de betreffende modelcel. De modelresolutie verschilt, voor elke resolutie zijn deze waarden beschikbaar.

[1] *De TOP10 kaart maakt geen onderscheid tussen categorie (A,B of C) watergang. In de kaart zijn watergangen opgenomen vanaf 0,5 meter breedte.*



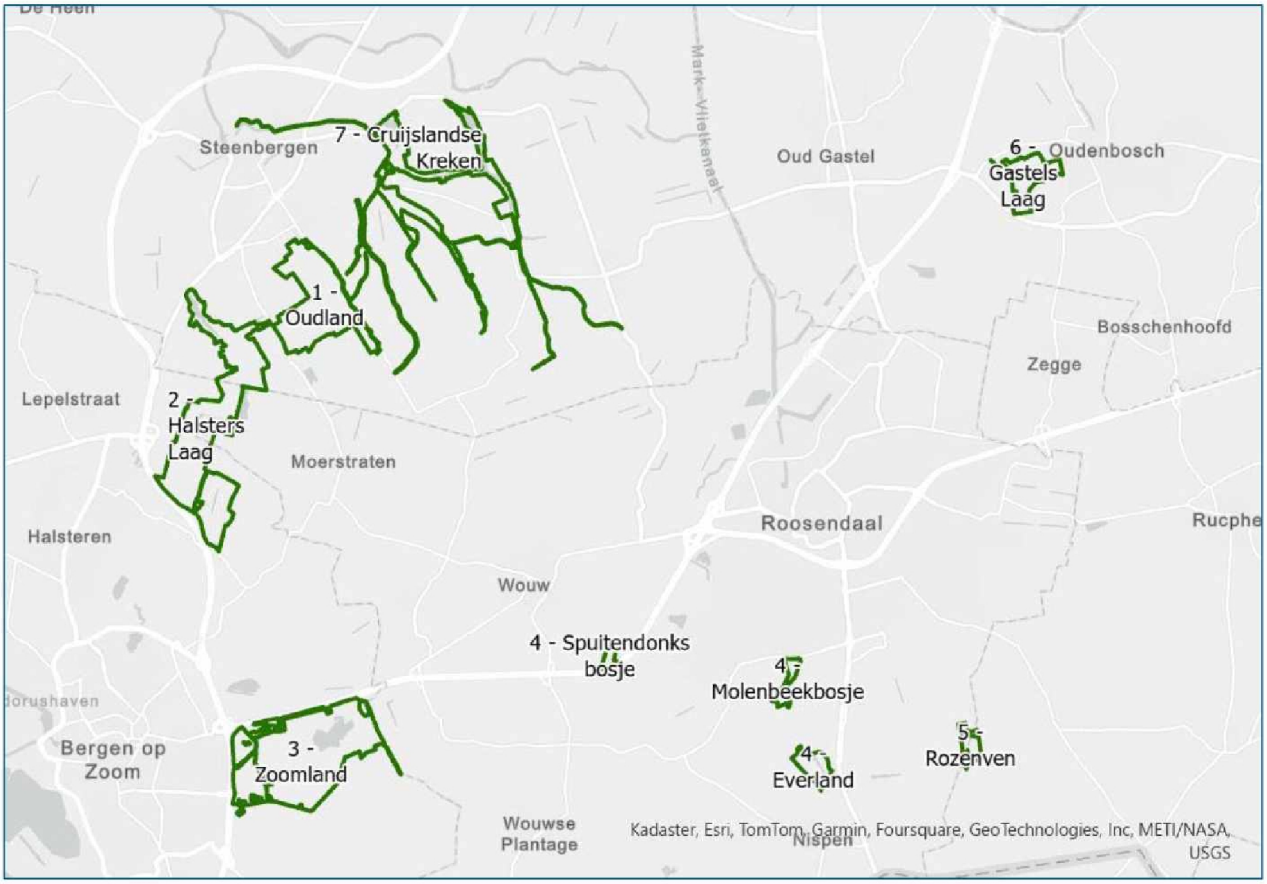
Figuur 4-12: Peilgebieden met bijbehorend zomerpeil



Figuur 4-13: Peilgebieden met bijbehorend winterpeil

4.8 Detailinformatie uit LESA's

Als voorbereiding op de m.e.r. zijn relevante natuurgebieden beschreven in een Landschap Ecologische Systeemanalyse (LESA). Er zijn zeven verschillende LESA's opgesteld waarbij het Spuitendonksbosje, het Molenbeekbosje en het Everland zijn beschreven binnen één rapport (Figuur 4-14). Per LESA wordt de samenhang van het ecologisch functioneren van de natuurgebieden in relatie tot het watersysteem beschreven (Royal HaskoningDHV a,b,c,d,e,f, 2022). Er wordt uitgebreid ingegaan op de ontstaanswijze van het gebied en de relatie tussen ondergrond, bodem, hydrologie, waterkwaliteit en vegetatie. Het accent ligt hierbij op ecohydrologische aspecten. In sommige gevallen is ook extra veldonderzoek gedaan, zoals nieuwe boringen en peilbuizen.



Figuur 4-14: Ligging van de natuurgebieden waarvoor een LESA is opgesteld

In elk LESA rapport is een hoofdstuk opgenomen met een validatie van de vergelijking tussen gemeten, eerder berekende grondwaterstanden en stijghoogten. In het rapport zijn aanbevelingen gedaan voor modelverbeteringen. Verbetering van de schematisatie van de Waalreklei is een regelmatig terugkomende aanbeveling die terugkomt in het volgende hoofdstuk van dit rapport.

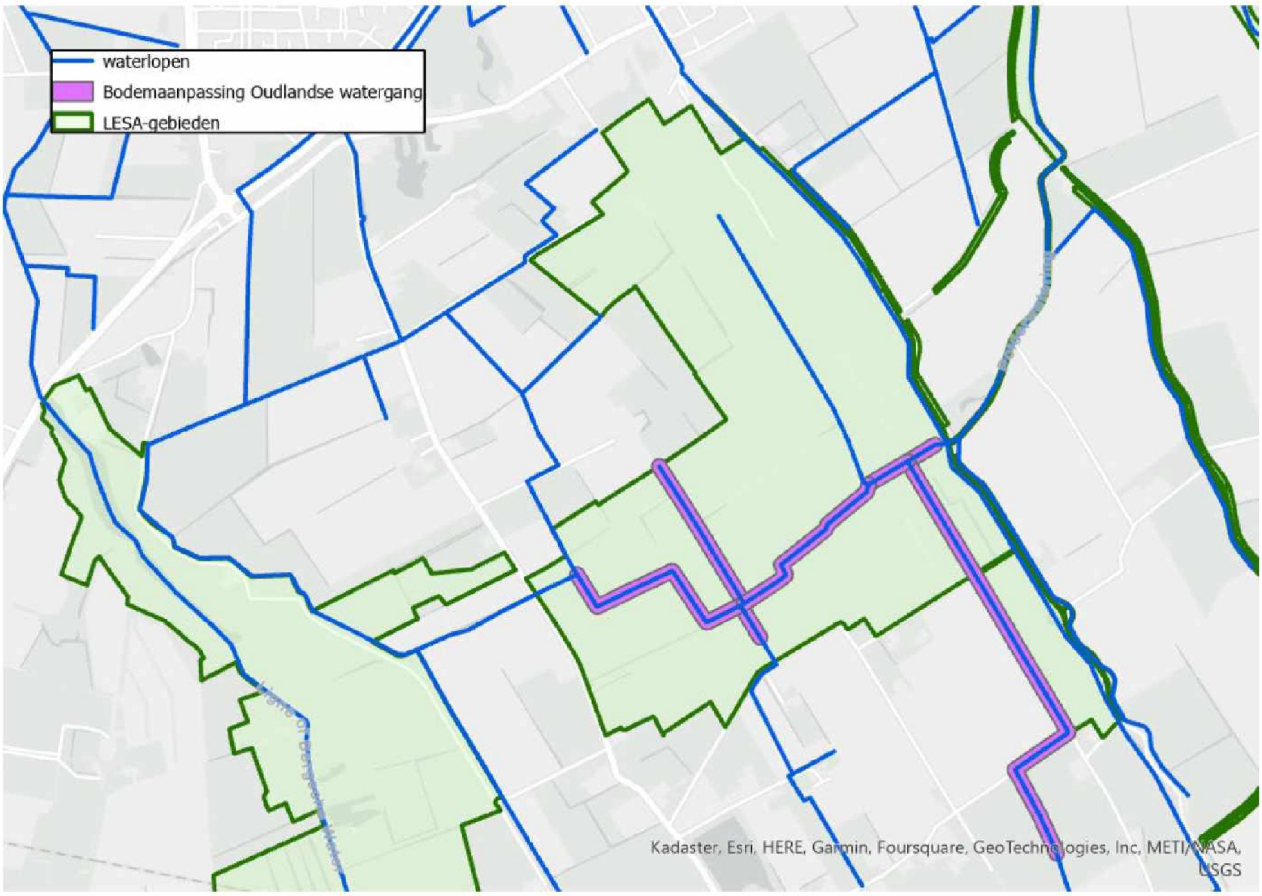
In het Kruislandmodel zijn inzichten vanuit de LESA's verwerkt (Tabel 4-4).

Tabel 4-4: Toegevoegde detailinformatie uit de LESA's

Natuurgebied	Gemaakte verbetering	Literatuur
Oudland	Verwerken van recente inrichtingsmaatregelen	Royal HaskoningDHV 2022a
Rozenven	Ter plaatse van Rozenven komen meerdere ondiepe leemlagen voor die niet zijn opgenomen in het huidige lagenmodel.	Royal HaskoningDHV 2022e
Halsters Laag	Peilaanpassing Ligne	Royal HaskoningDHV 2022b
Molenbeek en Spuitendonks bosje	Vistrap toegevoegd en peilaanpassing	Royal HaskoningDHV 2022d
Gastels Laag	Peilaanpassing	Royal HaskoningDHV 2022f
Cruijslandse Kreken	Geen aanpassing	Royal HaskoningDHV 2022g
Zoomland	Geen aanpassing	Royal HaskoningDHV 2022c

4.8.1 Oudland

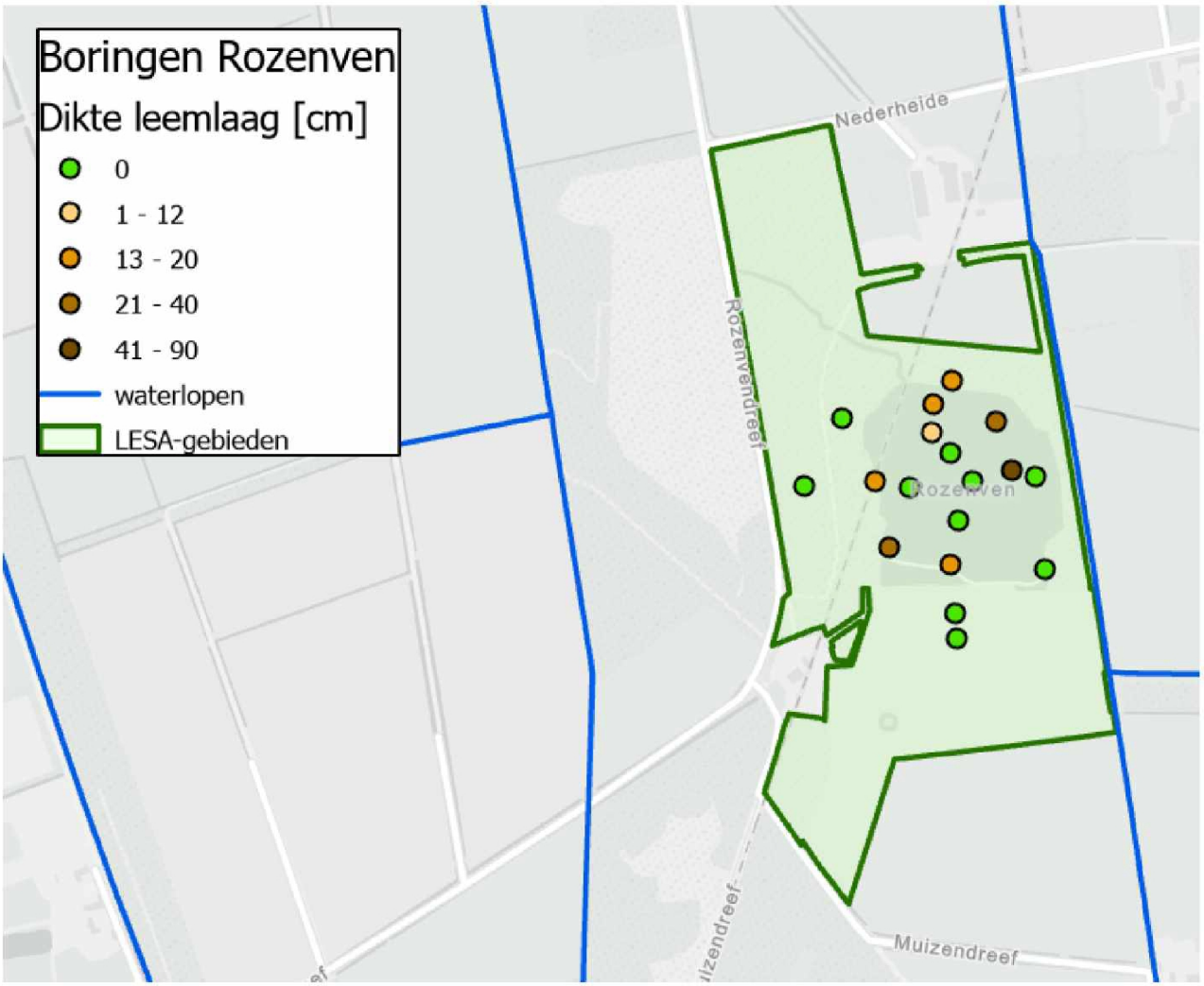
In het Oudland zijn recent inrichtingsmaatregelen doorgevoerd aan het oppervlaktewatersysteem. Dit houdt in dat de bodemhoogte van de Oudlandsche waterloop is aangepast naar 50 cm beneden maaiveld, zie Figuur 4-15.



Figuur 4-15: Aanpassingen waterlopen huidige situatie Oudland

4.8.2 Rozenven

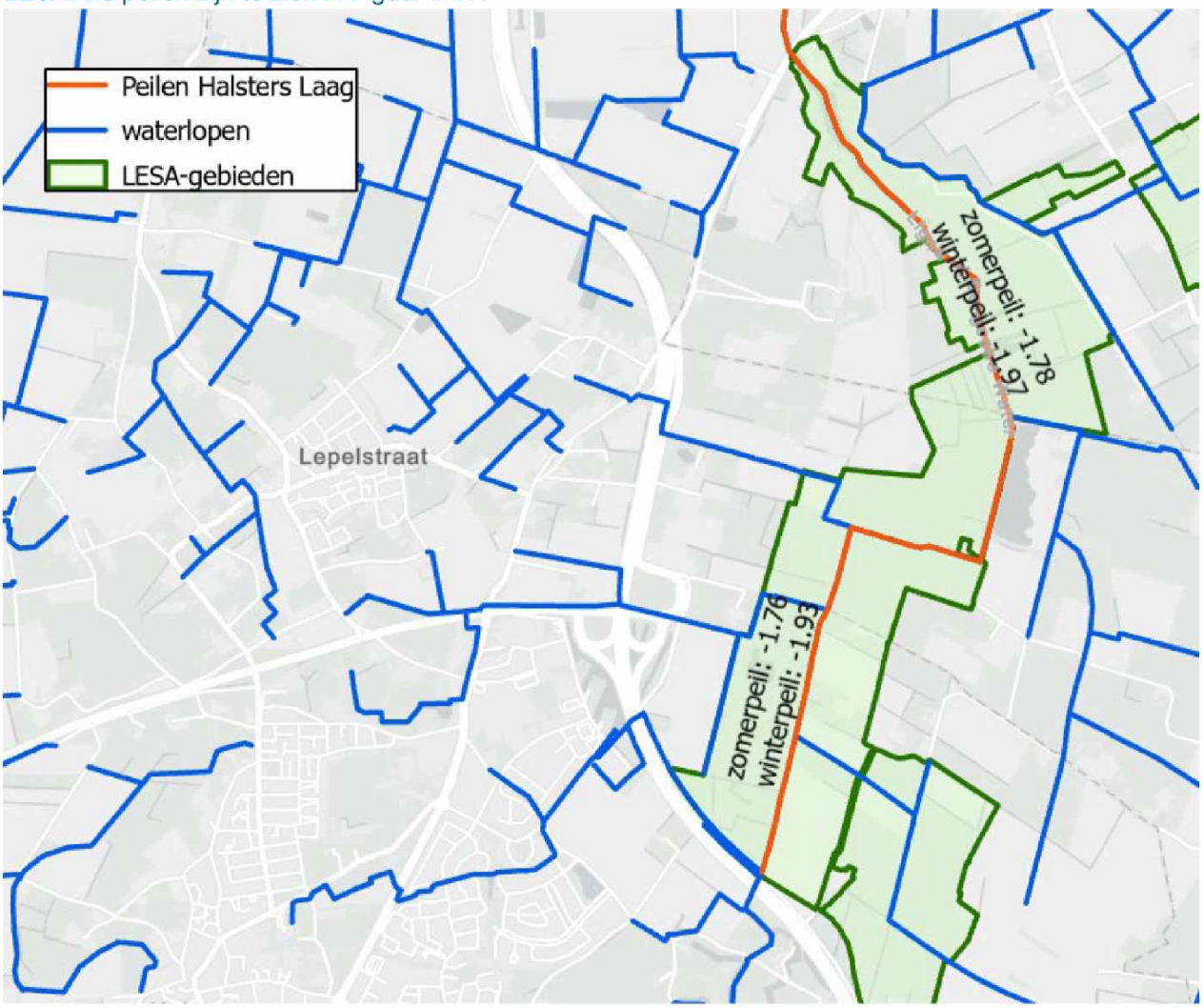
Voor de LESA Rozenven zijn 18 nieuwe boringen geplaatst. Informatie over de aanwezigheid en dikte van de leemlaag is toegevoegd aan het grondwatermodel. De locatie van de boringen in de dikte van de leemlaag is te zien in Figuur 4-16.



Figuur 4-16: Dikte van de leemlaag uit boringen in en rond het Rozenven

4.8.3 Halsters Laag

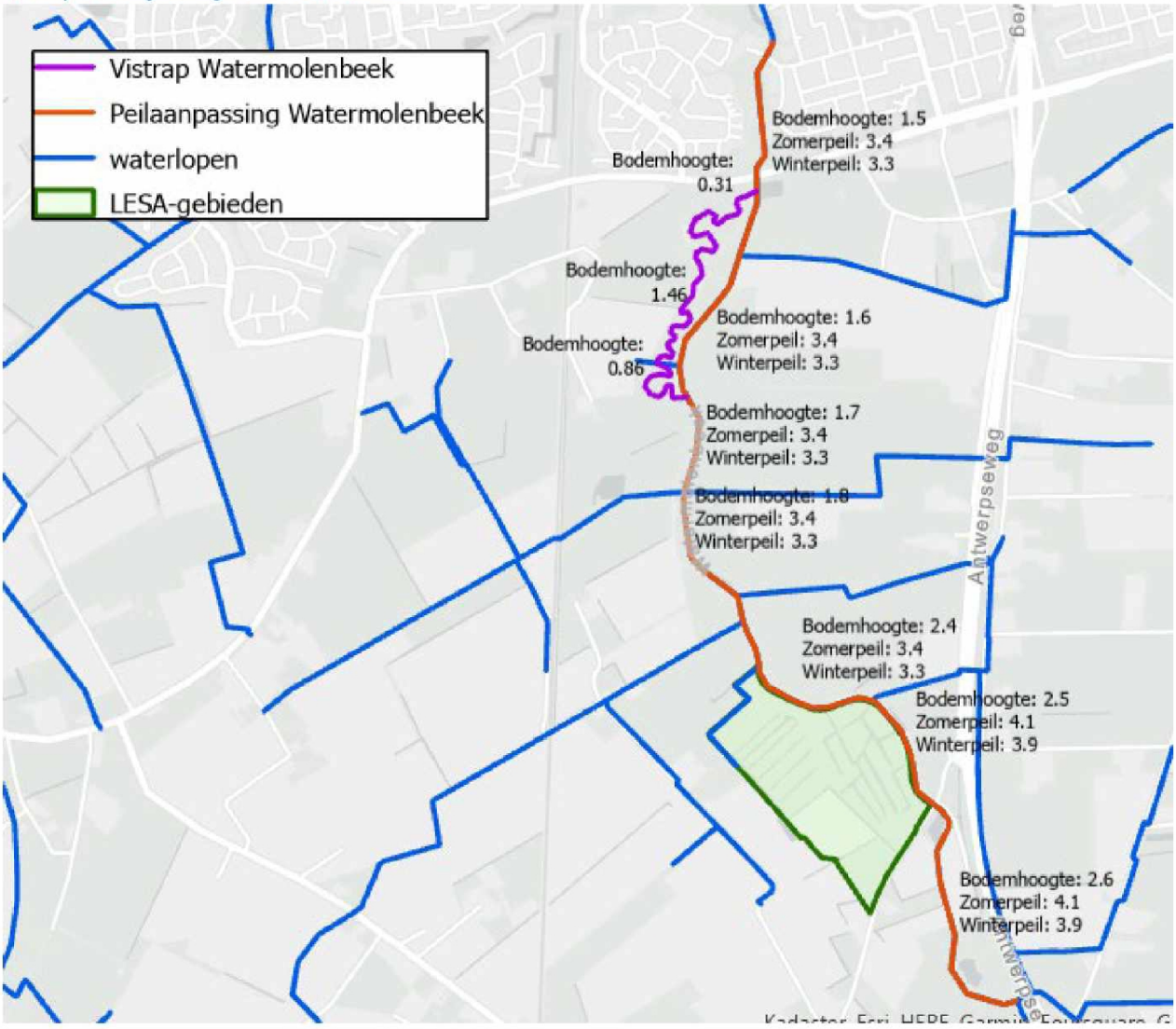
De peilen van de Ligne in Halsters Laag zijn in het model aangepast aan de hand van informatie uit de LESA. De peilen zijn te zien in Figuur 4-17.



Figuur 4-17: Peilaanpassing Halsters Laag

4.8.4 Molenbeek en Spuitendonks bosje

Het peil van de Watermolenbeek is overgenomen uit de LESA, zie Figuur 4-18. De diep ingesneden vistrap is toegevoegd aan het model.



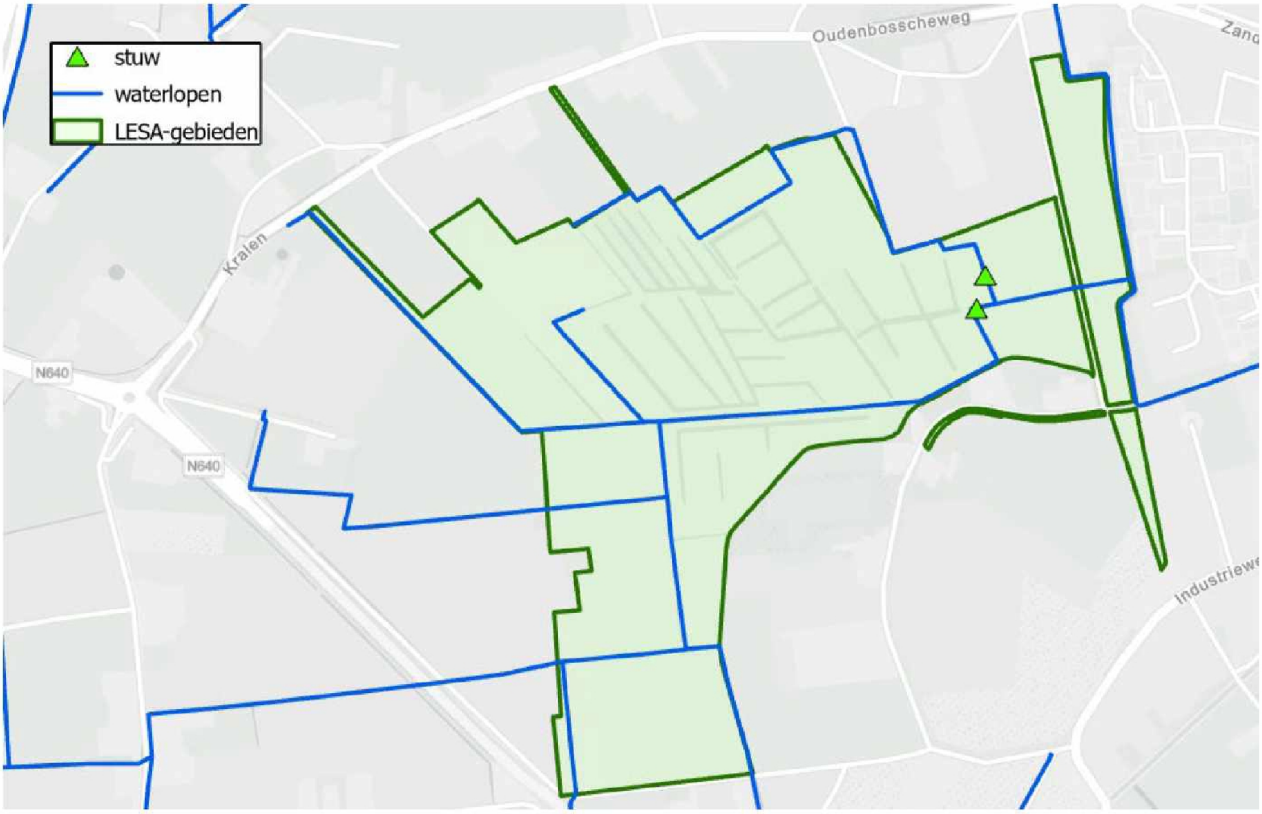
Figuur 4-18: Peilaanpassing en toevoeging vistrap Watermolenbeek, waardes in m NAP

4.8.5 Gastels Laag

In het Gastels Laag is het peil aangepast. De peilen bovenstrooms van de in de LESA genoemde stuwen hebben de waardes gekregen die vermeld staan in Tabel 4-5. De locatie van de stuwen is weergegeven in Figuur 4-19.

Tabel 4-5: Peilbesluit peilgebieden Gastels Laag en Bossche Laag

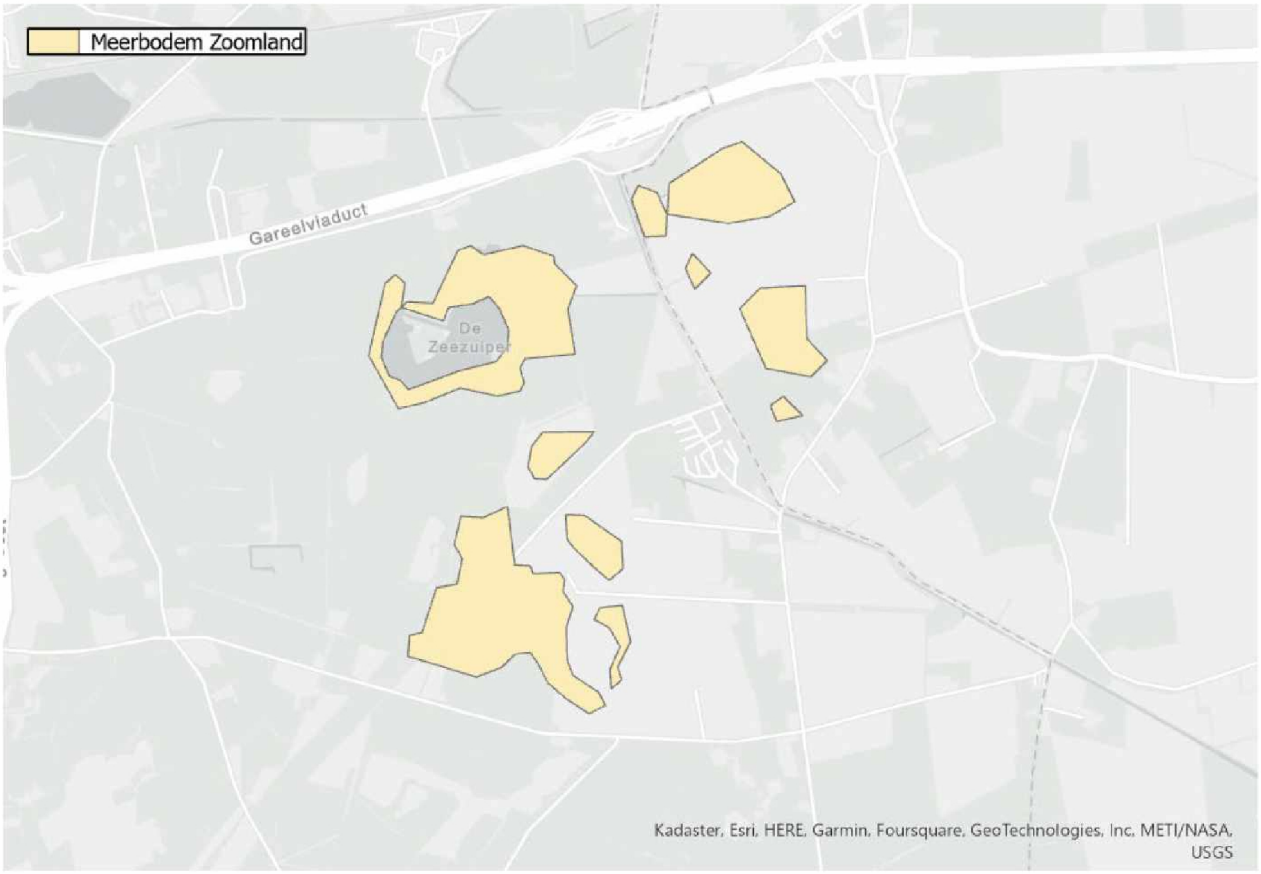
Peilgebied	Winterpeil	Zomerpeil	In de praktijk
Gastels Laag	-1,00 m NAP	-0,75 m NAP	Circa -0,90 m NAP
Bossche Laag (incl. A-watergang noordzijde van het natuurgebied)	-1,20 m NAP	-0,75 m NAP	-



Figuur 4-19: Stuwen Gastels Laag

4.8.6 Zoomland

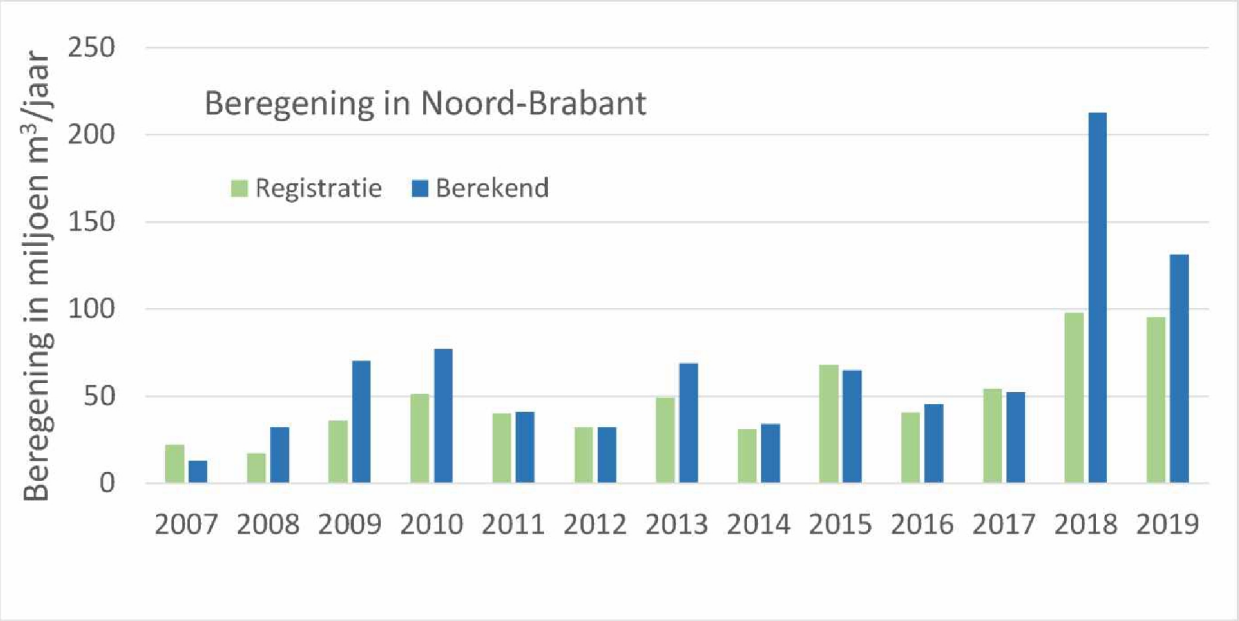
De weerstand rond Zoomland kan lokaal hoger zijn door lokale aanwezigheid van Brabantleem of meerbodems. De bodemkaart uit 1948 5.1.2.e laat meerbodems zien rond de Zeezuiper. Deze kaart is opgenomen in de LESA voor Zoomland (RHDHV, 2022c). De weerstand in het grondwatermodel is hierop aangepast. Dit resulteert in hogere grondwaterstanden die beter overeenkomen met de metingen. In de winter kan het grondwater boven maaiveld stijgen. Dit is toestromend regenwater en kan moeilijk met het grondwatermodel worden berekend.



Figuur 4-20: Aangebrachte meerbodems in het grondwatermodel rond Zoomland

4.9 Beregening uit grondwater

De hoeveelheid beregening voor landbouw wordt berekend met een aparte module van Royal HaskoningDHV. De hoeveelheid beregening wordt op dagbasis bepaald op basis van het vochttekort en de aanwezigheid van locaties waar uit grondwater wordt beregend (Royal HaskoningDHV, 2019). Deze hoeveelheid wordt voor elke beregeningsput vastgesteld. De diepteligging van onttrekking wordt niet geregistreerd en is daarom niet precies bekend. De diepte wordt daarom geschat op basis van de geologische opbouw en navraag uit het veld. Aangenomen wordt dat onttrekking voor beregening voornamelijk plaats vindt van relatief grote diepte, de Formatie van Maassluis en de Formatie van Oosterhout. Voor het gehele Brabantmodel zijn de beregeningshoeveelheden van de jaren 2007 tot en met 2019 bepaald. De beregening door het model berekend, komt voor de provincie Noord-Brabant redelijk overeen met de geregistreerde beregening, maar voor de droge zomers 2018 en 2019 wordt de hoeveelheid beregening hoger berekend dan is geregistreerd (Figuur 4-21). Het kan zijn dat de geregistreerde beregening in de jaren 2018 en 2019 achterbleef bij de werkelijke hoeveelheden, er zijn de nodige onzekerheden bij de registratie. Het kan ook zijn dat de berekende beregening wordt overschat omdat in werkelijkheid de beregening wordt stopgezet omdat dit economisch niet meer loont.



Figuur 4-21: Geregistreerde en gemodelleerde beregeningsdebieten in de provincie Noord-Brabant

Binnen de grenzen van het Kruislandmodel (zie voor de grens Figuur 2-2) wordt in de periode 2007 – 2017 gemiddeld 5,7 miljoen m^3 grondwater per jaar onttrokken voor beregening. In de jaren 2018 en 2019 is dit aanzienlijk meer: 25,3 en 11,4 miljoen m^3/jaar. Deze hoeveelheden kunnen niet gecontroleerd worden met metingen omdat alleen geaggregeerde meetgegevens per waterschap beschikbaar zijn. De berekende hoeveelheden zijn ongeveer de helft hetgeen waterschap Brabantse Delta registreert. Dit is logisch omdat ook ongeveer de helft van het beheergebied van waterschap Brabantse Delta ontbreekt in het Kruislandmodel.

5 Kalibratie

5.1 Methode en werkwijze op hoofdlijnen

Het grondwatermodel is verbeterd door metingen en berekeningen met elkaar te vergelijken. Dit is gedaan voor de gemiddelde situatie van de jaren 2009 - 2016. De ijking is stapsgewijs gedaan door verschillende bodemparameters van het model te variëren.

Er is gebruik gemaakt van de Monte Carlo analyse (paragraaf 5.2) waarbij de geselecteerde meetdata (paragraaf 5.3) worden vergeleken met de berekeningsresultaten voor de gekozen kalibratieperiode 2009 – 2016 (paragraaf 5.4). De methodiek is geen automatische optimalisatie. Om deze reden is aanvullend een genetisch algoritme ingezet.

De schematisatie van de Waalreklei heeft extra aandacht gekregen (paragraaf 5.5 en paragraaf 5.6). Dit hoofdstuk wordt afgesloten met het resultaat van de stationaire ijking (paragraaf 5.7).

5.2 Monte Carlo analyse

Het model is stationair geijkt met de Monte Carlo methode. Deze methode is eerder succesvol toegepast bij de kalibratie van het Brabantmodel (Royal HaskoningDHV 2019). De Monte Carlo analyse wordt in twee stappen uitgevoerd:

1. Met een **gevoeligheidsanalyse** wordt het effect van het variëren van een individuele parameter in beeld gebracht. Er wordt een groot aantal varianten van het model aangemaakt door modelparameters binnen een vooraf opgegeven interval te variëren. De grootte van de interval wordt bepaald door de modelleur, parameters moeten namelijk binnen realistische grenzen liggen. Met de gevoeligheidsanalyse wordt bepaald welke parameters worden gekalibreerd en in welke mate ze afhankelijk van elkaar zijn. Hoe meer parameters onafhankelijk van elkaar zijn, hoe beter de kalibratie zal verlopen.
2. Vervolgens worden **meerdere parameters tegelijk gevarieerd** om zo tot een optimale combinatie van parameterwaarden te komen. De varianten zijn stationair doorgerekend en beoordeeld op het verschil met gemiddelde gemeten grondwaterstanden. Vervolgens is beoordeeld welke combinaties van parameters het beste resultaat geven. Uiteindelijk wordt het gemiddelde van een beperkt aantal combinaties gebruikt om de ijkfactor per parameter te bepalen (bijvoorbeeld de 10 beste varianten).

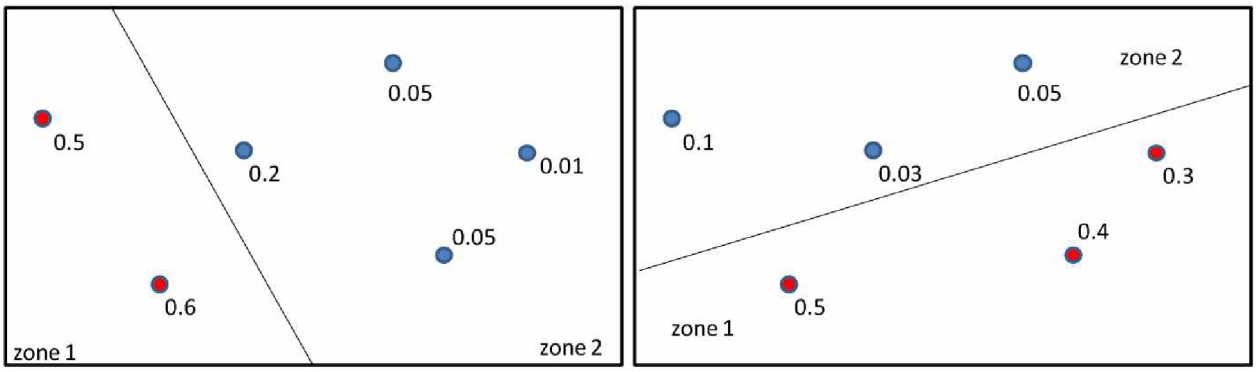
Het proces van gevoeligheidsanalyse en Monte Carlo analyse is meerdere keren doorlopen. De eerste analyse is op hoofdlijnen om te kijken hoe het model presteert zonder ijking. Vervolgens zijn verschillende parameters gevarieerd en is gewerkt met zones waarbinnen de parameters veranderd kunnen worden.

De Monte Carlo analyse is onderdeel van de stationaire kalibratie. Bij de Monte Carlo analyse wordt een groot aantal berekeningen uitgevoerd waarbij een beperkt aantal parameters wordt gevarieerd. Voor elke berekening worden de parameterwaarden getrokken uit een verdeling met behulp van Latin Hypercube Sampling. Met deze methode wordt met een beperkt aantal trekkingen een set met goed verdeelde parameterwaarden samengesteld. Dit gaat op basis van een uniforme verdeling voor de parameters, waarbij elke waarde uit de verdeling evenveel kans heeft.
Het voordeel van een Monte Carlo is dat de analyse wordt uitgevoerd na het uitvoeren van alle berekeningen. Hierdoor kan de analyse worden gevarieerd met verschillende sets van weegfactoren zonder de berekeningen opnieuw uit te voeren.

Royal HaskoningDHV

Gevoeligheidsanalyse

Voorafgaand aan de Monte Carlo berekeningen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij elke parameter afzonderlijk is gevarieerd. Deze analyse geeft inzicht in welke parameters in welk gebied invloed hebben. Dit inzicht is meegenomen in de Monte Carlo analyse waarbij meerdere parameters tegelijk gevarieerd worden. Dit is gedaan door de meetpunten waar een groter effect wordt berekend een grotere weegfactor mee te geven. Voor elke parameter is er een verschillende set van "beste" berekeningen. Dit kan aanvullende informatie over een bepaalde parameter opleveren die zonder het toepassen van deze weegfactoren niet gevonden wordt. De gevoeligheidsanalyse en de weging zijn geïllustreerd in Figuur 5-1. In het voorbeeld heeft de eerste parameter veel effect op de grondwaterstand in het westelijk deel van het modelgebied. Voor de tweede parameter is dit juist het zuidelijke gedeelte. In de gevoeligheidsanalyse krijgen de meetpunten in zone 1 meer gewicht in de analyse dan in zone 2. Op deze manier ontstaat meer lokaal inzicht en wordt de interval waarin de parameter kan worden gevarieerd in de Monte-Carlo analyse verkleind. Wanneer dit niet gedaan zou worden, zou de interval veel groter blijven. De gevonden interval wordt later in dit rapport toegelicht in paragraaf 5.8 waarbij de minimum- en maximumwaarden de interval weergeven waarbinnen gevarieerd is.



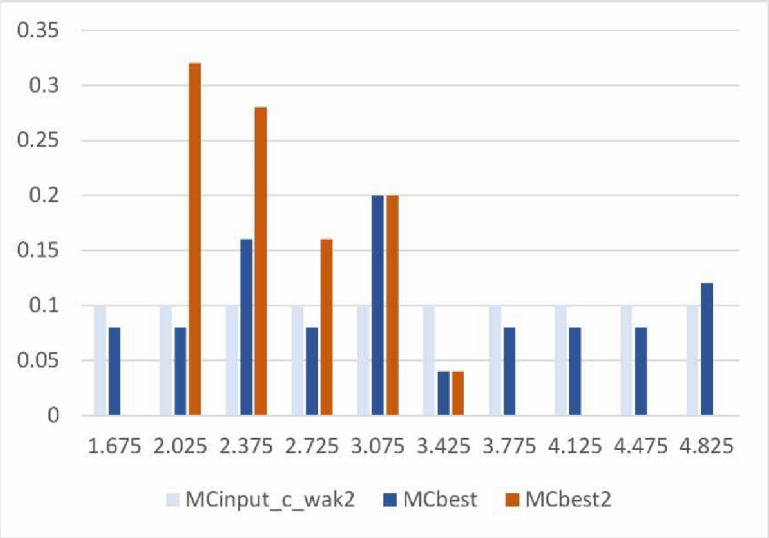
Parameter 1 Parameter 2

Figuur 5-1: Illustratie van gevoeligheidsanalyse en weging van de meetpunten. De rode meetpunten geven meer effect in de berekende grondwaterstand voor een bepaalde parameter en worden zwaarder meegewogen in de Monte Carlo Analyse. De analyse wordt per parameter uitgevoerd

De gevoeligheidsanalyse is geïllustreerd in Figuur 5-2 voor de Waalreklei2:

- Er is begonnen met een ijkfactor tussen 1,5 en 5. De grijze balkjes representeren 10 parameterklassen die initieel doorgerekend zijn;
- Wanneer in het gehele modelgebied wordt gekeken dan wordt geen optimale parameterwaarde gevonden (McBest);
- De beste berekeningsresultaten (McBest2) liggen bij de rode balkjes in Figuur 5-2. De hoogste parameterklassen en de laagste komen niet voor. Het ligt voor de hand om bij de keuze van de parameterwaarde hier rekening mee te houden. Er moet wel getoetst worden of hierdoor het model ook werkelijk verbetert.

NB: De weegfactoren kunnen ook tegenstrijdige informatie bieden, bijvoorbeeld een hoge factorwaarde in de meetpunten waar de parameter veel invloed heeft en een lage waarde voor alle meetpunten. Dit is meestal een aanwijzing dat een andere zonering voor de ijkparameter gekozen moet worden.



Figuur 5-2: Monte Carlo analyse ijkfactor Waalreklei 2; horizontaal de parameterverdeling van de ijkfactor verdeeld in 10 klassen. De waarde langs de as is het midden van de klasse. Verticaal het aandeel berekeningen met een parameterwaarde in de betreffende klasse

Vergelijking tussen berekening en meting

De resultaten van de berekeningen worden vergeleken met de metingen. Analyse van de beste resultaten leert hoeveel de parameters bijgesteld moeten worden voor een beter modelresultaat. Het beste resultaat is het resultaat met het kleinste gemiddelde van de absolute afwijkingen. Het is ook mogelijk het gemiddelde van de afwijkingen in de doelfunctie voor de optimalisatie op te nemen. Over het algemeen is het echter beter te kalibreren op absolute afwijkingen en andere keuzes te maken voor de kalibratie als het gemiddelde niet naar nul te brengen is.

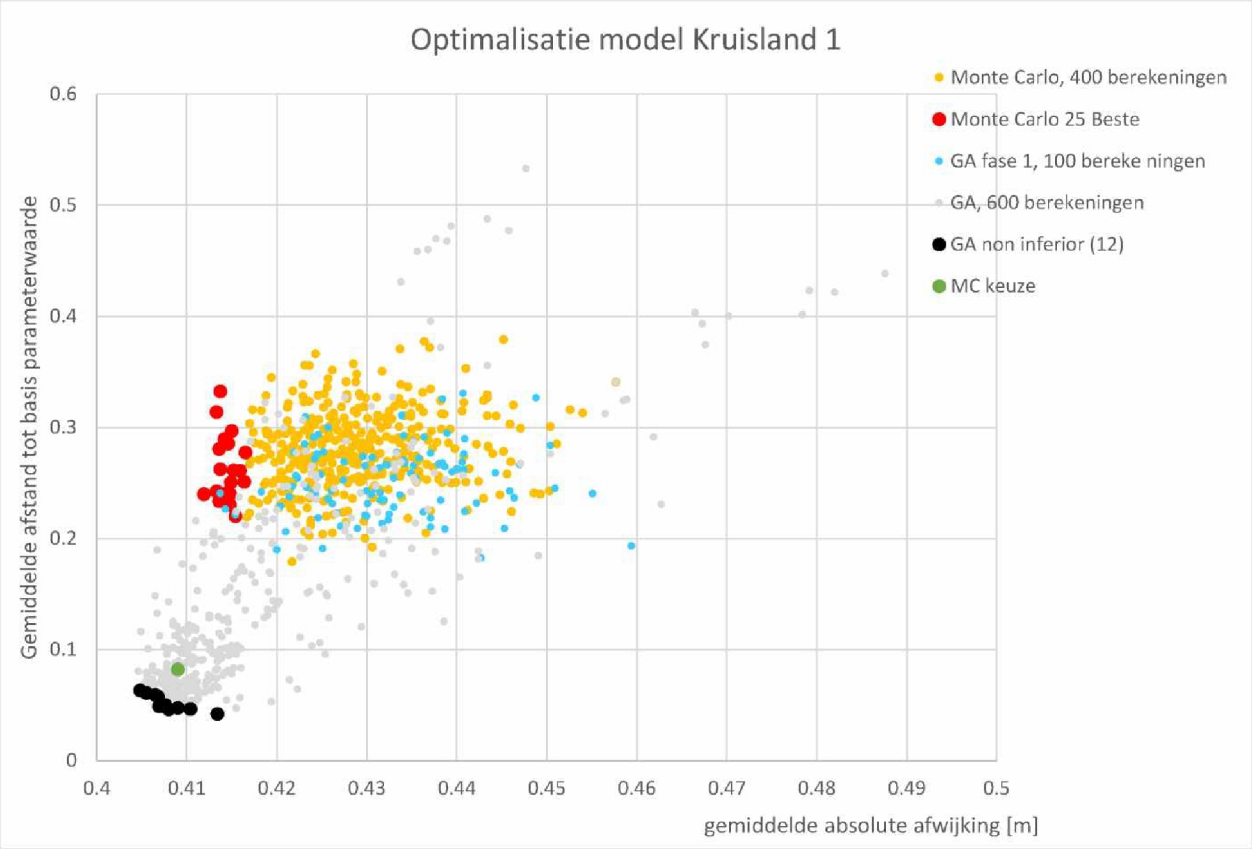
IJkcriterium

De prestatie van het model wordt uitgedrukt in een gemiddelde absolute afwijking: de mean absolute error (MAE). Per parameter wordt getoetst of de gemiddelde ijkfactor van de x beste varianten statistisch gezien verschilt van de gemiddelde ijkfactor van de overige varianten, die minder goed presenteren. Hiervoor wordt de two-sample t-test gebruikt met 95% betrouwbaarheid. Het resultaat van de toetsing wordt gebruikt voor het bepalen van de optimale parameterwaarden van het model. In het voorbeeld van Figuur 5-2 zijn de blauwe balkjes de beste berekeningsresultaten (MCbest) voor de ijkfactor Waalreklei 2. Het blijkt dat eigenlijk waarden uit de gehele verdeling vertegenwoordigd zijn in de beste berekeningen. Er worden dus geen aanwijzingen gevonden dat het model verbeterd kan worden door het bijstellen van deze parameter.

5.3 Genetisch Algoritme

Aanvullend op de Monte Carlo kalibratie is een genetisch algoritme gebruikt. Deze methode is ontwikkeld in de promotiestudie van 5.1.2.e 5.1.2.e en eerder gepubliceerd in Water Resources Research (5.1.2.e en 5.1.2.e 2002).

Het genetisch algoritme werkt met twee fasen. De eerste fase is vergelijkbaar met een Monte Carlo kalibratie, waarbij parameterwaarden worden getrokken uit een verdeling en worden doorgerekend. In de tweede fase worden steeds parametercombinaties die goede resultaten geven (ouders) gekruist tot een nieuwe generatie van parametercombinaties (kinderen) en doorgerekend. Van elke generatie worden de beste combinaties geselecteerd om weer een nieuwe generatie te maken. Naast de beste combinaties worden ook parametercombinaties toegevoegd die eerder zijn afgevallen om een nieuwe generatie te genereren. Dit wordt gedaan om te voorkomen dat het proces in een lokaal optimum terecht komt en hier niet meer uit komt.



Figuur 5-3: Resultaat optimalisatie stap 1

Met het genetisch algoritme hoeft de modelleur niet zelf een keuze te maken voor een optimale parametercombinatie. De blauwe stippen beschrijven de puntenwolk van de eerste fase van het programma, vergelijkbaar met de Monte Carlo. Het gaat echter om de tweede fase, de grijze punten met aan de rand van de puntenwolk, de beste parametercombinaties, in dit geval 12 zogenaamde “non inferior” resultaten. Het algoritme itereert naar een smalle bandbreedte voor de parameters.

5.4 Gebruikte meetdata grondwaterstanden en stijghoogten

Databronnen

Voor de ijking van het grondwatermodel is de eerder samengestelde ijkset van het Brabantmodel2018 gebruikt (Royal HaskoningDHV, 2019). Er is gebruik gemaakt van metingen uit DINO-Loket en extra aangeleverde gegevens door waterschap Brabantse Delta. Meetreeksen in Vlaanderen, aangeleverd door de Vlaamse Milieu Maatschappij (VMM), bleken te kort te zijn om in de ijking mee te nemen.

Selectie van data

Voor de ijkdataset is de volgende selectie gemaakt:

1. Alleen volledige jaren, dat wil zeggen jaren met minimaal 6 maanden met minstens 1 meting;
2. Minstens één volledig jaar in de periode 2009 t/m 2016;
3. Peilbuisfilters die op basis van de filterstelling kunnen worden toegekend aan het lagenmodel.

Een deel van de aangeleverde reeksen is daarom niet bruikbaar omdat deze geen metingen bevat in de ijkperiode, het aantal metingen te beperkt is, of waarvan de filterstelling niet bekend is. Dit resulteert in een ijkdataset met 589 peilbuisfilters met meetreeksen voor het Kruislandmodel.

5.5 Kalibratie

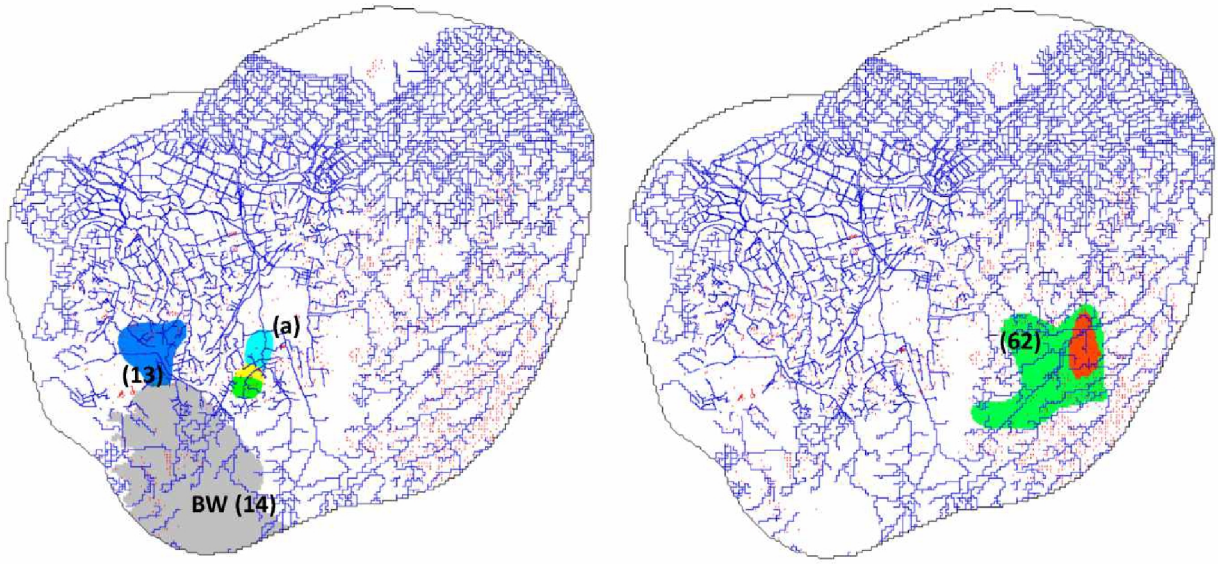
Het doel van de kalibratie is het zoveel mogelijk verkleinen van de gemiddelde absolute afwijking waarbij er geen structurele afwijkingen meer zijn. Daarbij is gekeken naar de weerstand van de Waalreklei, het doorlaatvermogen van de Formatie van Oosterhout en de weerstand van de Stramproyklei. De kalibratie is in verschillende fases uitgevoerd. Deze paragraaf beschrijft het eindresultaat van de kalibratie.

5.5.1 Waalreklei 1

In drie zones zijn aanpassingen gedaan aan de Waalreklei. De zones zijn gemarkeerd in Figuur 5-4. De zone gemarkeerd met (a) is een zone waar in REGIS een gat aanwezig is, maar in H3OVK niet. In het nieuwe lagenmodel is daar een gemiddelde weerstand aangehouden die niet goed past bij de weerstand in de omgeving. De weerstand is er in drie sub-zones aangepast.

In de zone gemarkeerd met (13) bleek de stijghoogte boven de Waalreklei systematisch te laag. In deze zone is de weerstand verhoogd tot minimaal 2000 dagen en is verder gekalibreerd.

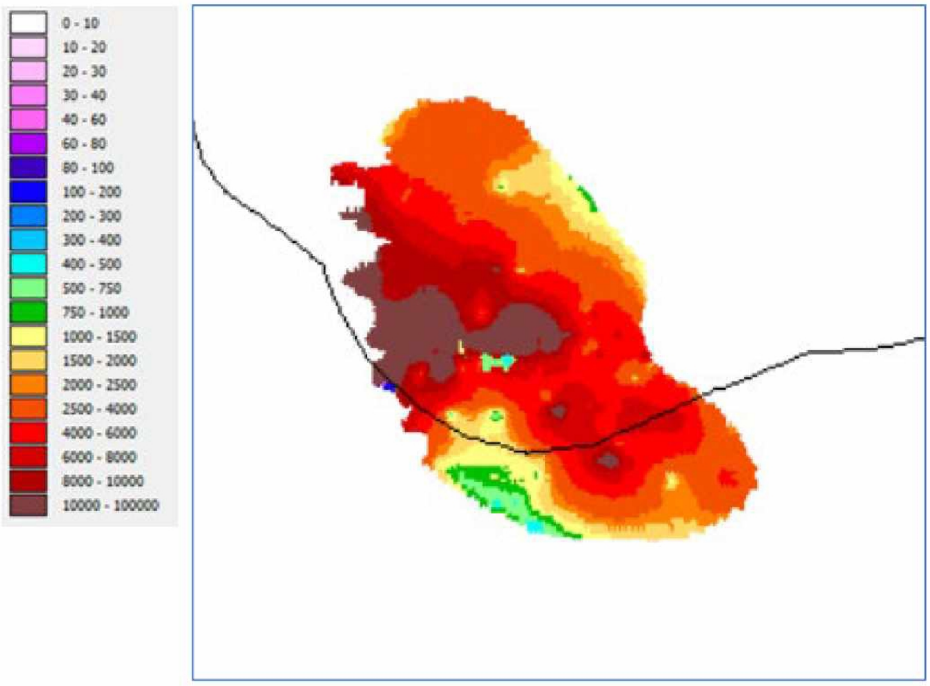
In de zone gemarkeerd met (62) bleek de stijghoogte tussen Wak1 en Wak2 te laag. In deze zone is de weerstand van Wak2 verhoogd tot minimaal 1000 dagen in de groen gemarkeerde zone en tot minimaal 2000 dagen in de rood gemarkeerde zone.



Figuur 5-4: Zones (13, a en 62) waar aanpassingen zijn gedaan aan de Waalreklei, links Wak1, rechts Wak2

Brabantse Wal

Voor de Brabantse Wal is initieel de weerstand van de Waalreklei 1 overgenomen uit eerdere RHDHV studies op de Brabantse Wal en de Kalmthoutse Heide. De weerstand is in deze studies gekalibreerd op een groot aantal meetfilters. De grootte van de weerstand is opgenomen in Figuur 5-5. In de kalibratie is rekening gehouden met de zone waar de stijghoogte onder de Waalreklei lager ligt dan de basis van de Waalreklei.



Figuur 5-5: Weerstand schijnspiegel laag [in dagen] op de Brabantse Wal (Wak1) gebaseerd op eerdere studies

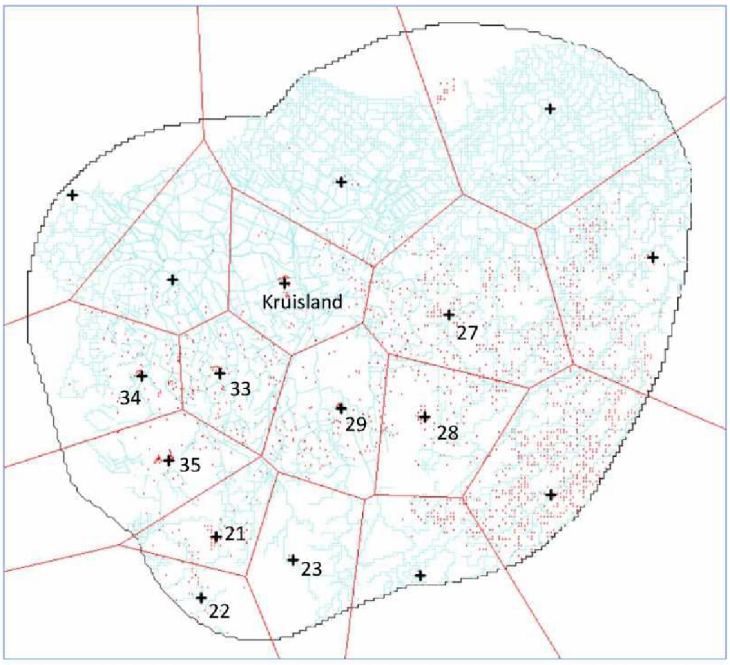
5.5.2 Doorlaatvermogen Formatie van Oosterhout

Voorafgaand aan de kalibratie is de doorlatendheid van de verschillende lagen behorend tot de Formatie van Oosterhout aangepast zodat het doorlaatvermogen bij Kruisland in het model goed overeenkomt met het doorlaatvermogen dat bij de pompproef is bepaald, 1725 m^2/d. Bij de kalibratie is de ijkfactor ter plaatse van de winning Kruisland op 1 gesteld en niet gevarieerd.

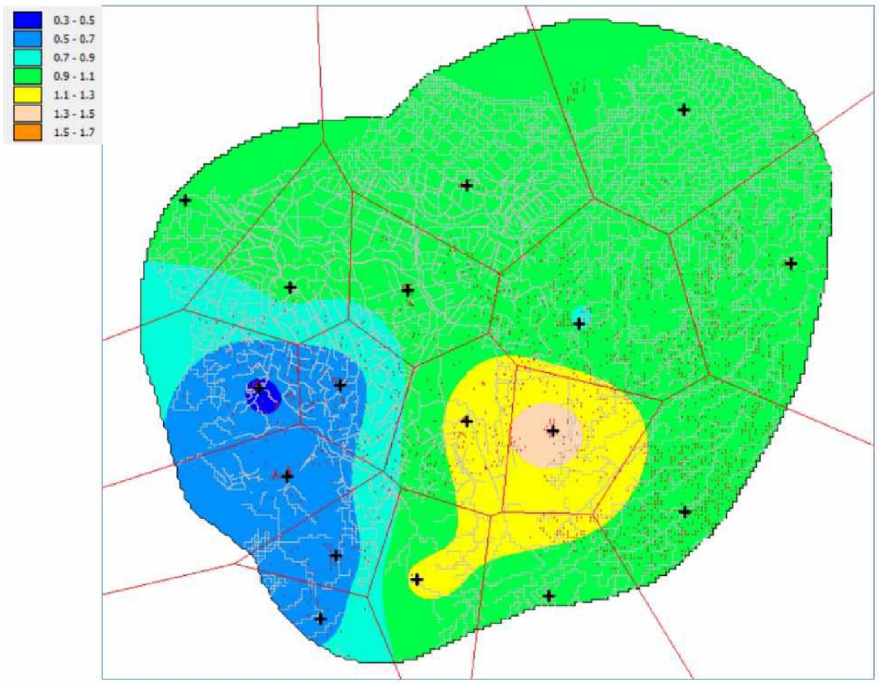
Na eerste verkennende berekeningen waren er nog structurele afwijkingen in het model ten noordwesten van de Turfvaart boven de Waalreklei en in het diepe pakket met de winningen (Zanden van Oosterhout). Met een kalibratiefactor voor het diepe watervoerende pakket bleek het niet goed mogelijk de juiste “pompkegels” bij alle winningen te berekenen. Om deze reden is ten behoeve van de kalibratie het diepe pakket in zones verdeeld met een eigen kalibratiefactor, zie Figuur 5-6. Deze zones zijn Thiessen-polygonen rond de winningen. Na de kalibratie zijn de ijkwaarden aan de punten in de zones toegekend en zijn de factorwaarden geïnterpoleerd, zie Figuur 5-7. Door de geïnterpoleerde ijkfactoren toe te passen ontstaan er geen abrupte overgangen ter plaatse van de zonegrenzen. Er is gecontroleerd of de kalibratiestatistieken veranderen door te interpoleren in plaats van te rekenen met de zonering. Het effect is te verwaarlozen.

5.5.3 Oosterhoutklei

De weerstand van de Oosterhoutklei is in zones gekalibreerd. Hiervoor zijn dezelfde zones gebruikt als toegepast voor de doorlatendheid van de Formatie van Oosterhout. Er zijn puntwaarden voor de ijkfactor toegepast waarbij voor elke berekening de ijkfactor met behulp van interpolatie is omgezet naar een vlakdekkende parameter.



Figuur 5-6: Zones ten behoeve van de kalibratie voor het diepe watervoerende pakket met de winningen (modellaag 19 t/m 26). Zones zonder nummer zijn niet gevarieerd (ijkfactor = 1)

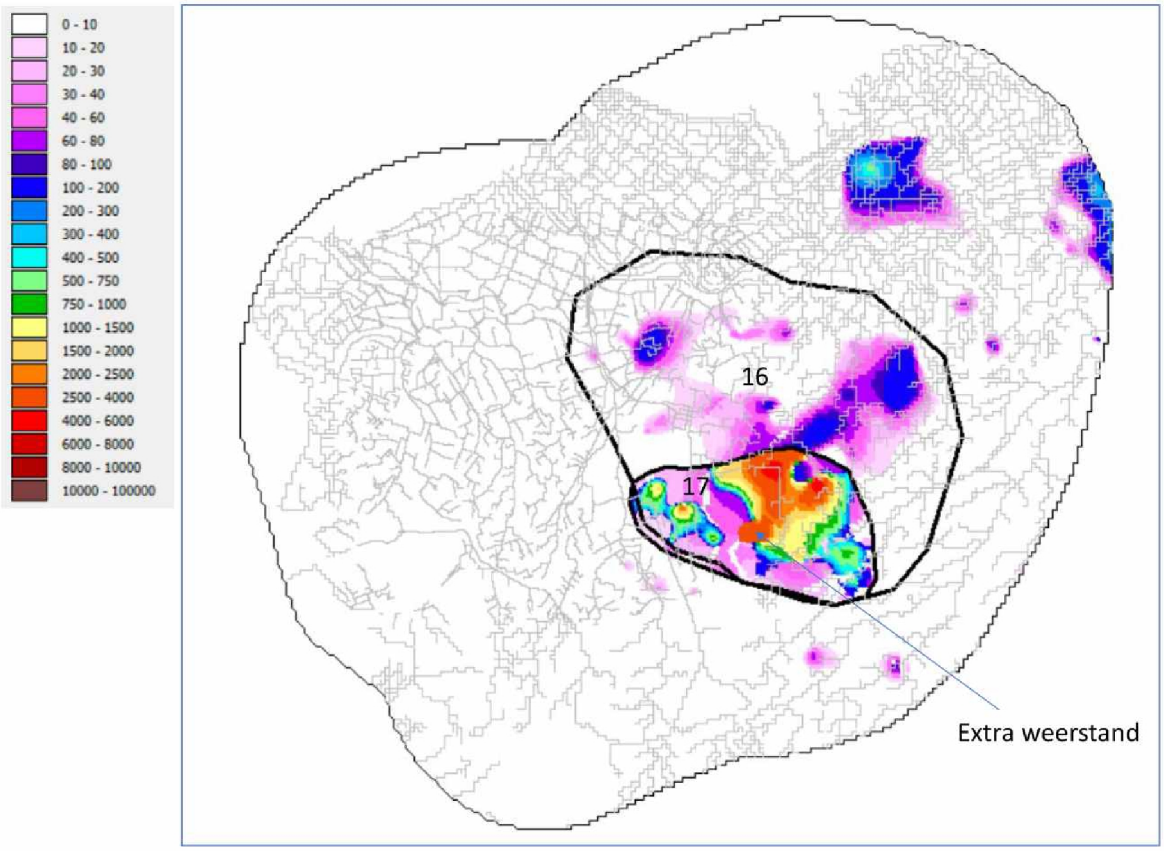


Figuur 5-7: IJkfactor diepe watervoerende pakket na kalibratie geïnterpoleerd

5.5.4 Stramproy klei

Ten noordwesten van de Turfvaart kwamen aanvankelijk nog grote afwijkingen voor tussen meet- en rekenresultaten voor de laag boven de Waalreklei. In meerdere meetpunten werd de stijghoogte meer dan 1,5 meter te laag berekend. Deze afwijking was niet te verkleinen door het doorlaatvermogen in de ondiepe lagen te verkleinen, deze is al erg laag. Wel bleken de afwijkingen te verkleinen door de weerstand van de Stramproy-klei te verhogen in zone 17, weergegeven in Figuur 5-8. De locaties van de meetpunten met een te laag berekende stijghoogte komen goed overeen met het voorkomen van de Stramproy-klei, behalve ter plaatse van de pijl in Figuur 5-8. Hier is lokaal extra weerstand aan het model toegevoegd.

Er is een fors hogere weerstand nodig om het model goed te krijgen. Er is gekozen de hogere weerstand toe te passen, omdat het voorkomen van de te laag berekende stijghoogten zo goed aansluit bij het voorkomen van de Stramproy-klei. Mogelijk is door de permanente infiltratie en de lage stijghoogte ten gevolge van de winningen de kleilaag enigszins verstopt en/of heeft consolidatie opgetreden. Een hogere weerstand blijkt in zone 16 niet nodig om een goed modelresultaat te verkrijgen.



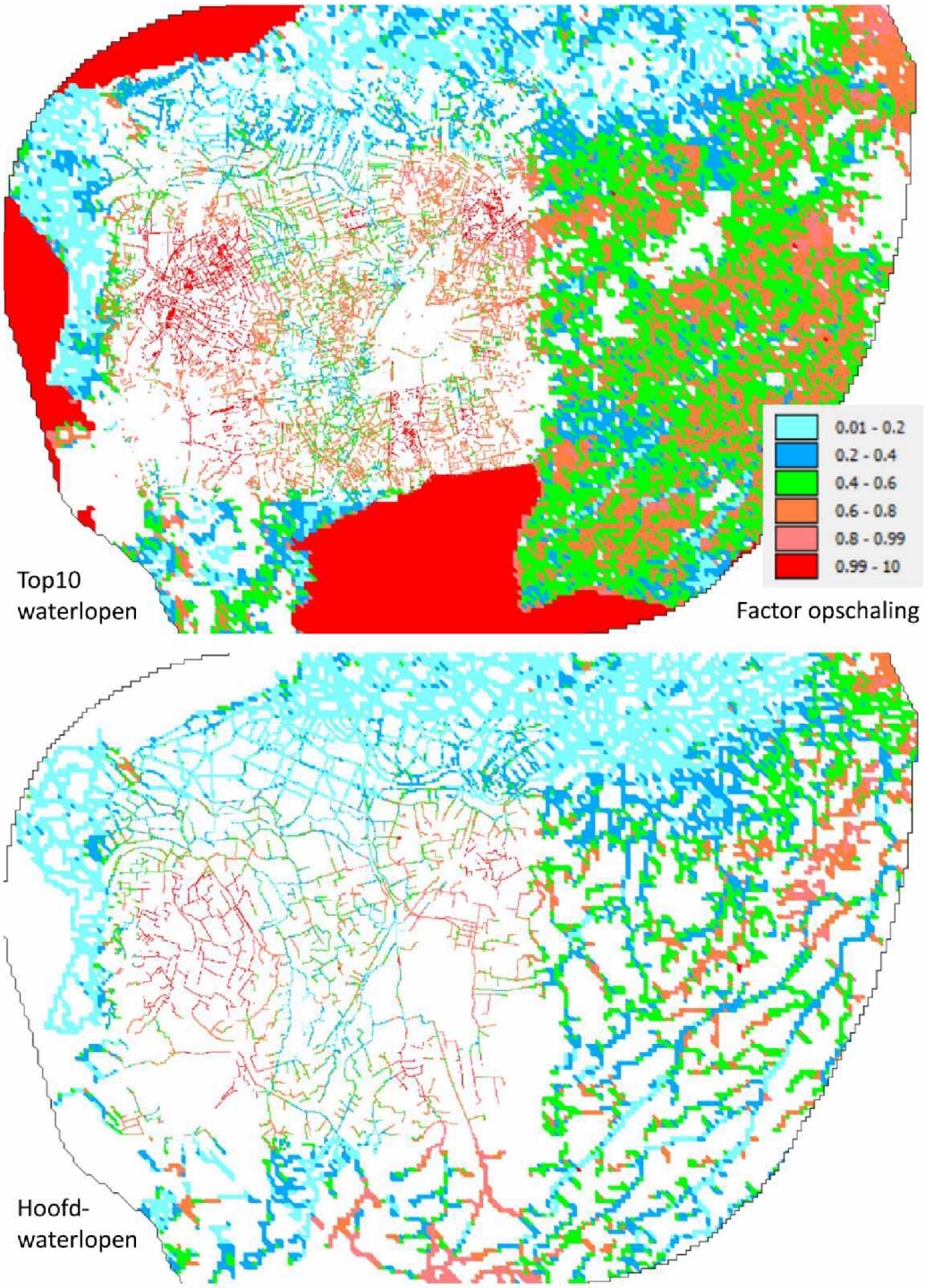
Figuur 5-8: Weerstand Stramproy-klei na kalibratie en zonering kalibratie

5.6 Opschaling waterlopen

In het grondwatermodel wordt de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater gemodelleerd. Hierbij wordt rekening gehouden met de weerstand die het grondwater ondervindt op zijn weg tussen het freatische vlak en het ontwateringsmiddel. De weerstand van de waterlopen geldt voor het schaalniveau van de waterlopen. In het model wordt deze weerstand vertaald (opgeschaald) naar een weerstand in de rekencellen. Hierbij wordt geen rekening gehouden met het feit dat er ook horizontale stroming binnen een cel naar de waterloop plaats vindt. In slecht doorlatende ondergronden ondervindt deze stroming een weerstand waarmee bij de opschaling rekening gehouden moet worden, zeker bij grotere cellen. De opschaling kan gebeuren via analytische formules als van “De Lange” en “Bruggeman”. Bij regionale modellen hebben we eerder een opschaling toegepast waarbij de opschaling bepaald is met een berekening van het model op een raster van 25*25 meter. Dat hebben we voor Kruisland ook gedaan. Er wordt dan rekening gehouden met de horizontale stroming die optreedt tussen de cellen van 25*25. Opschaling naar bijvoorbeeld cellen van 200*200 gebeurt door de afvoer van de cellen van 25*25 binnen de cellen van 200*200 op te tellen en de grondwaterstanden te middelen. De opgeschaalde grondwaterstand en afvoer leveren samen een effectieve weerstand voor de cel van 200*200.

Een factor voor de opschaling is bepaald voor de Top10-waterlopen en de hoofdwaterlopen, zie Figuur 5-9. De weerstand wordt gedeeld door de weergegeven factor. In de noordelijke poldergebieden is de factor soms kleiner dan 0.2. Dit betekent dat hier een meer dan 5 keer grotere weerstand benodigd is. Dit komt door de celgrootte, maar ook door de grotere weerstand van de deklaag. In zones waar gerekend wordt op cellen van 25*25 (de natuurgebieden) is de factor per definitie gelijk aan 1.

De factoren zijn in het model toegepast.



Figuur 5-9: Factor opschaling weerstand hoofdwaterlopen (onder) en Top10-waterlopen (boven)

5.7 Bepaalde ijkfactoren

Tabel 5-1: IJkfactoren per parameter

Parameter	Zone	Min	5.1.2.e	MCkeuze
kv1_Zo	1	0.5	1	1
k_ooc	2	0.5	1.5	1
k_kiez	4	0.7	1.3	0.95
k_maassl2	5	0.7	1.3	1
k_ms_pw	6	0.7	1.3	1
k_pw	7	0.7	1.3	1.05
k_sy	8	0.7	1.5	1.2
c_msk2	10	0.5	2	0.7
c_msk1	11	1	2.5	1.2
c_wak2	12	1	3	1.2
c_wak1_Zo	13	8	15	15
c_wak1_bw	14	1.2	2.4	1.5
c_wak1	15	8	11	9.4
c_sy_z1	16	1	2	1.35
c_sy_z2	17	23	30	25.7
k_oost_21	21	0.5	1.3	0.65
k_oost_22	22	0.5	1.3	0.75
k_oost_23	23	0.7	1.3	1.1
k_oost_27	27	0.5	1	0.7
k_oost_28	28	1	1.7	1.3
k_oost_29	29	0.7	1.5	1.15
k_oost_33	33	0.4	0.7	0.4
k_oost_34	34	0.3	0.7	0.35
k_oost_35	35	1	2.5	0.55 (*)
c_oost_41	41	1	2.5	1
c_oost_42	42	1	2.5	1
c_oost_43	43	1	2.5	1.95
c_oost_47	47	1	2.5	1.55
c_oost_48	48	1	2.5	1.65
c_oost_49	49	1	2.5	1
c_oost_53	53	1	2.5	2
c_oost_54	54	1	2.5	2.2
c_oost_55	55	0.7	1.5	1
c_oost_50	50	1	2.5	1.85
c_oost_51	51	1	2.5	2.1
c_oost_52	52	1	2.5	1.95
c_wak2_zw	62	1	3	2.2

(*) overgenomen uit eerdere kalibratie in verband met verkeerde opgegeven verdeling

In Tabel 5-1 is samengevat tussen welke grenzen de parameters zijn gevarieerd en welke keuze is gemaakt (MCKeuze) voor het gekalibreerde grondwatermodel.

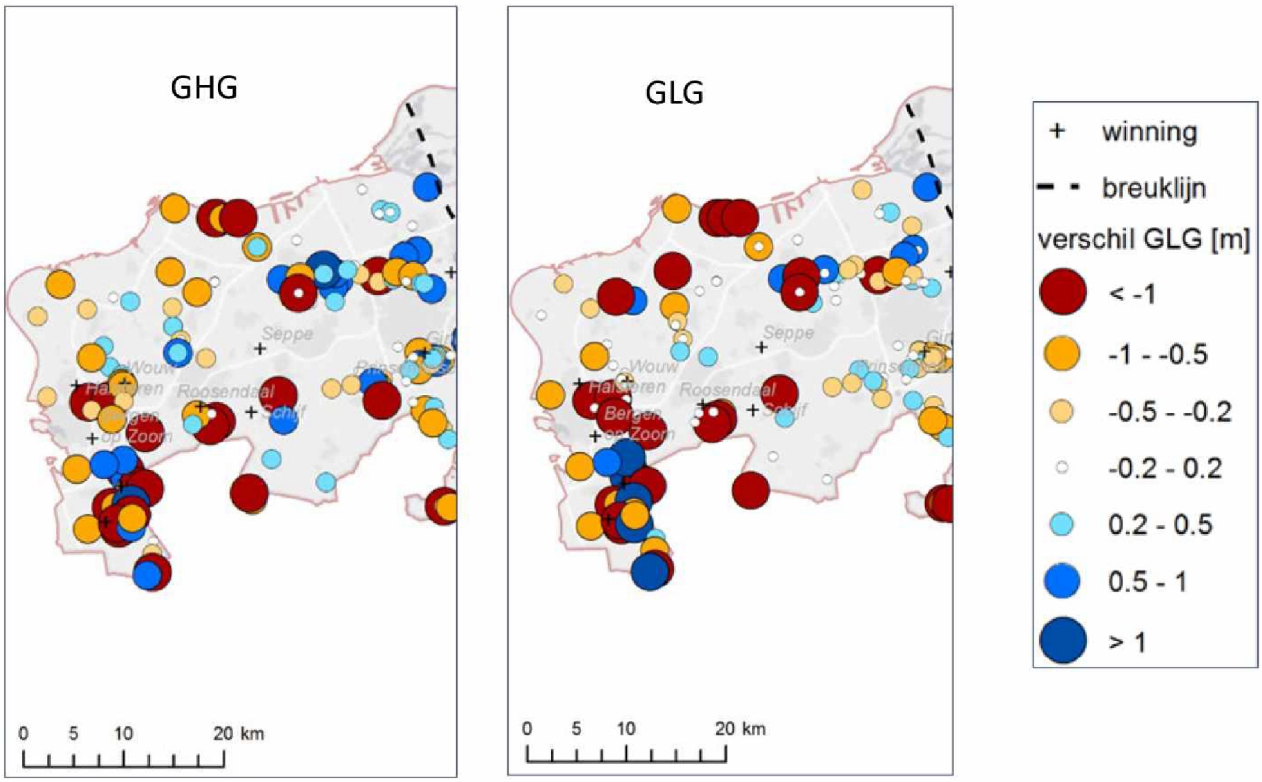
In Tabel 5-2 zijn de resultaten van de aanvullende kalibratie vergeleken met die van de eerste fase. De gemiddeld berekende grondwaterstand past beter bij het gemiddelde van de metingen en ook de gemiddeld absolute afwijking is flink verbeterd.

Tabel 5-2: Gemiddelde afwijking en gemiddelde absolute afwijking in het gekalibreerde model

Kalibratiefase	Gemiddeld afwijking (m)	Gemiddelde absolute afwijking (m)
Voor kalibratie	-0.28	0.68
Fase 1; kalibratie 1, MC keuze	-0.082	0.409
Fase 1; kalibratie 1 GA	-0.068	0.405
Fase 1; kalibratie 2, GA	-0.073	0.403
Fase 2; MC keuze	0.019	0.352

5.8 Kalibratieresultaat

Het voorgaande Brabantmodel2018 had relatief grote afwijkingen tussen metingen en berekeningen (Figuur 5-10). Er kwamen nog regelmatig afwijkingen voor van groter dan een halve of zelfs een meter.



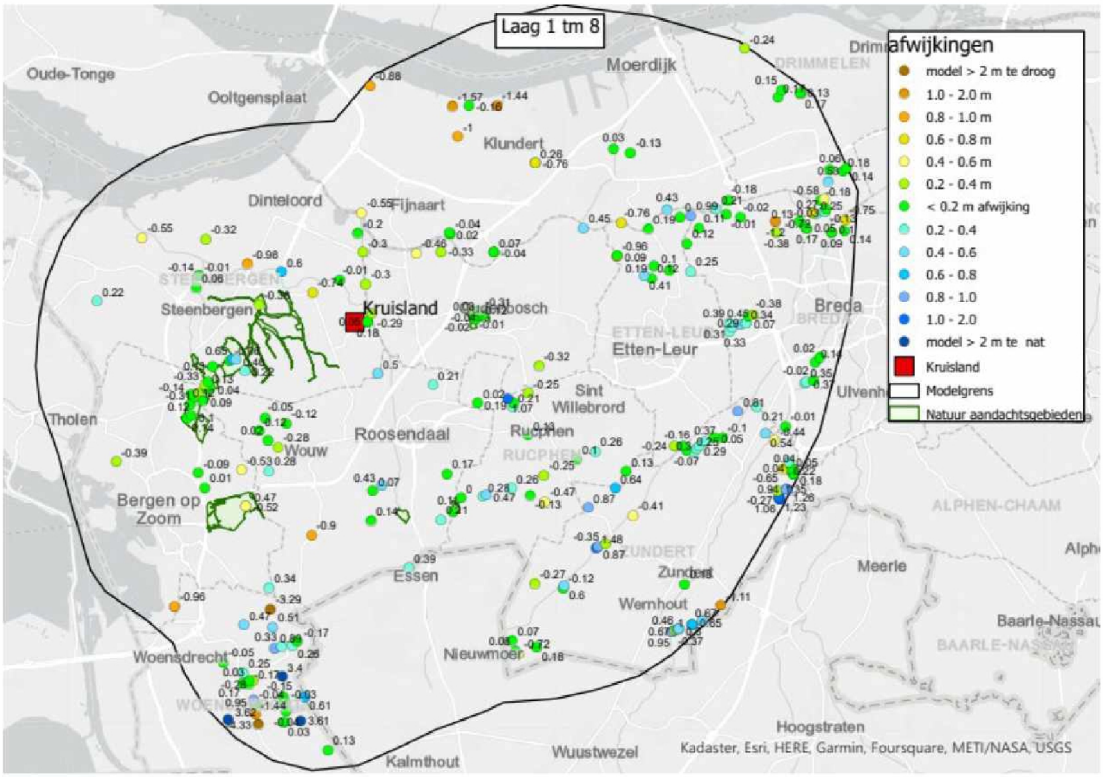
Figuur 5-10: Berekende afwijkingen tussen berekende GHG (links) en GHG (rechts) met het Brabantmodel2018 (Bron: Royal Haskoning, 2019). NB: kleine afwijkingen zijn witte kleine bollen; deze vallen minder op

Met het nieuwe gekalibreerde Kruislandmodel komen dergelijke grote afwijkingen nog maar weinig voor.

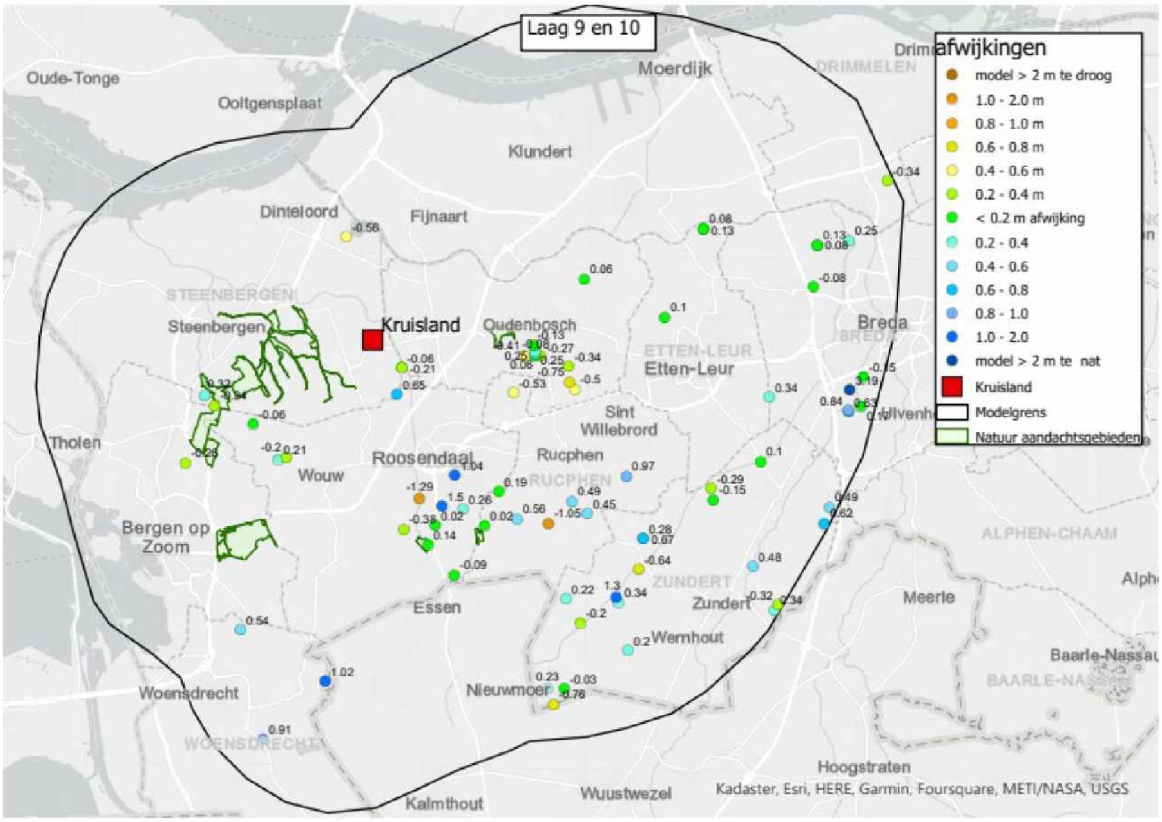
In de bovenste modellagen (1 tot en met 8, de lagen boven de Waalreklei) zijn de afwijkingen in de regel klein (Figuur 5-11), maximaal enkele decimeters. Gebieden waar de grondwaterstand structureel afwijkt komen alleen beperkt voor aan de randen van het modelgebied: zoals aan de noordzijde bij Klundert en de zuidzijde bij Zundert. Op korte afstand kunnen op de Brabantse Wal grote afwijkingen voorkomen. Dit is verklaarbaar uit de complexe bodemopbouw en hydrologie van het gebied met schijnspiegelsystemen. In de kalibratie is hier geen extra aandacht aan besteed.

De afwijkingen in de Peize-Waalre Formatie (laag 9 en 10) zijn wat groter dan de bovenliggende lagen (Figuur 5-12). Dit is vooral het geval ten zuiden van Kruisland bij Roosendaal en Rucphen. Maar in het grootste deel van het modelgebied komt het beeld tussen berekende en gemeten waarden goed overeen.

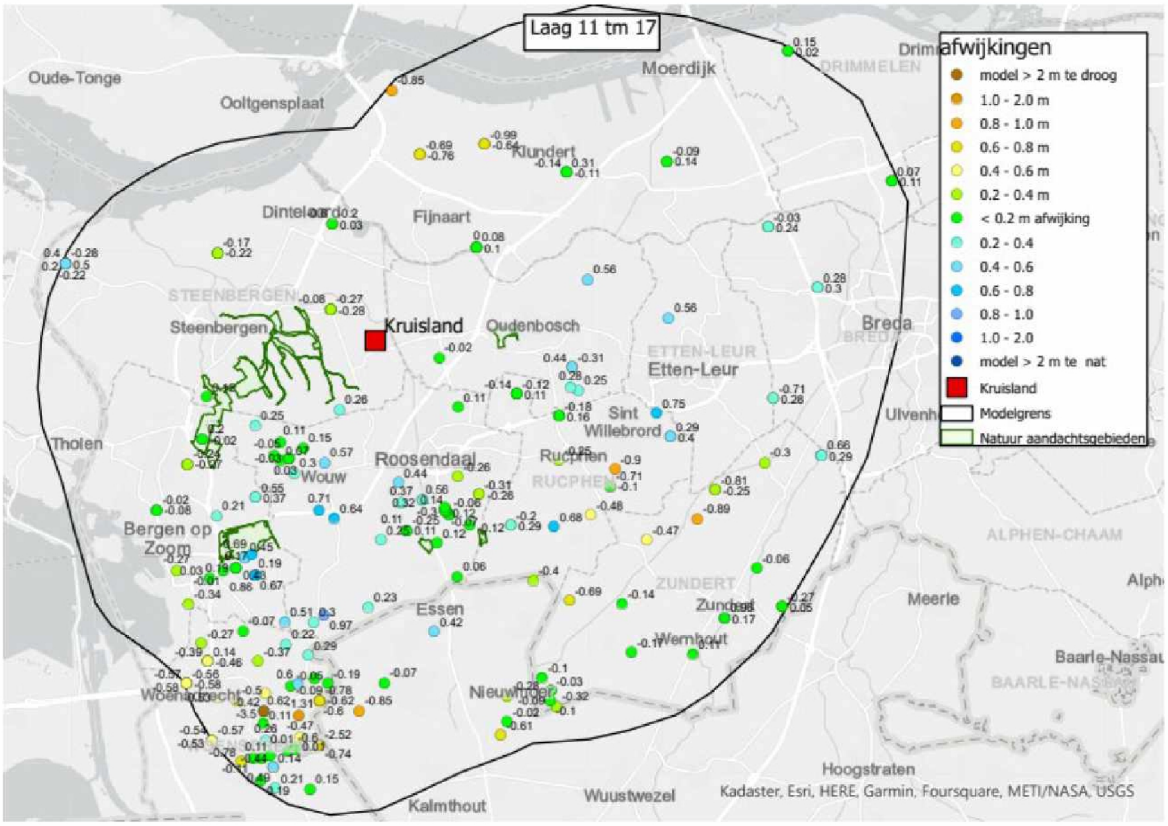
Voor de Formaties van Maassluis en Oosterhout (laag 11 tot en met 17) worden de stijghoogten nauwkeurig berekend met afwijkingen kleiner dan 50 cm (Figuur 5-13). Alleen in een gebied rond Wouw worden wat lagere stijghoogten berekend. In de diepste lagen (laag 18 tot en met 27) in de Formaties van Oosterhout en Breda zijn de afwijkingen relatief klein. Soms komen op korte afstand van elkaar grote afwijkingen voor. Dit is met een kalibratie niet goed te krijgen.



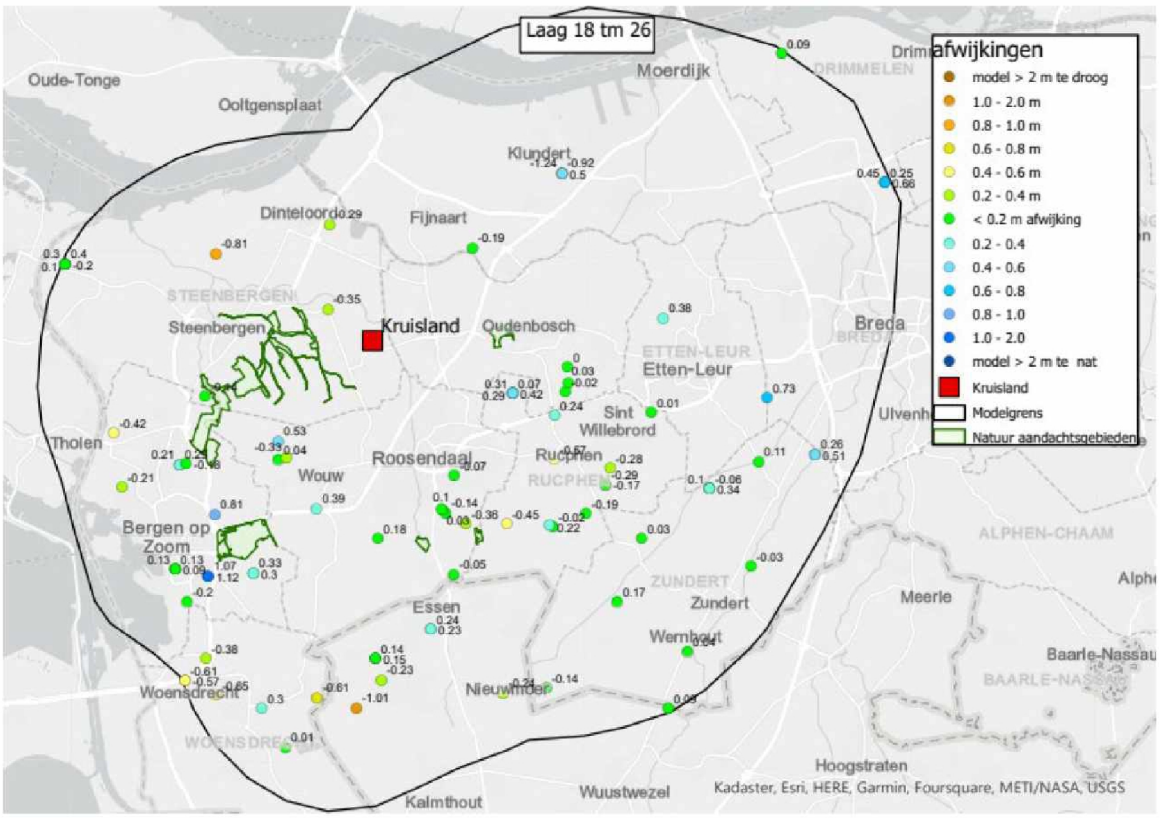
Figuur 5-11: Kalibratieresultaat modellaag 1-8; Holoceen, Boxtel, Sterksel, Stramproy, Peize Waalre 1



Figuur 5-12: Kalibratieresultaat modellaag 9 en 10; Peize Waalre, Waalreklei



Figuur 5-13: Kalibratieresultaat modellaag 11-17; Maassluis, Oosterhout



Figuur 5-14: Kalibratieresultaat modellaag 18-26; Oosterhout, Breda

6 Validatie

6.1 Pompproef Kruisland

6.1.1 Doorlatendheid en weerstand

In de periode 1 november 2022 - 30 november 2022 is een pompproef gehouden. Uit een proefput op een diepte van NAP-124,5 m en NAP-153,5 m is grondwater onttrokken met een debiet van 100 m^3/uur. Door Artesia (2023) is deze pompproef geanalyseerd. Uit deze pompproef zijn bodemparameters afgeleid en vergeleken met het gekalibreerde grondwatermodel (Tabel 6-1). De genoemde waarden in Tabel 6-1 zijn de waarden ter hoogte van Kruisland, maar kunnen ruimtelijk afwijken. Dit heeft vooral invloed op de weerstandswaarde.

Tabel 6-1: Vergelijking afgeleide bodemparameters uit de pompproef (Artesia 2023) en het gekalibreerde Kruislandmodel ter plekke van locatie Kruisland

Modelparameter	Dikte volgens REGIS (m)	Grondwatermodel (H3O Voorkempen) na kalibratie	Pompproef (Artesia, 2023)
Weerstand deklaag (incl Waalreklei)	5 m	580 d	1200 – 1600 d
Doorlatendheid Formatie Peize-Waalre en Maassluis	75 m	13 m/d	1 – 10 m/d
Weerstand Oosterhoutklei	11 m	2030 d	2800 – 4200 d
Doorlatendheid Formatie Oosterhout: (bepompte pakket)	76 m	24 m/d	22,5 m/d

6.1.2 Verlagingen rond de pompproeflocatie

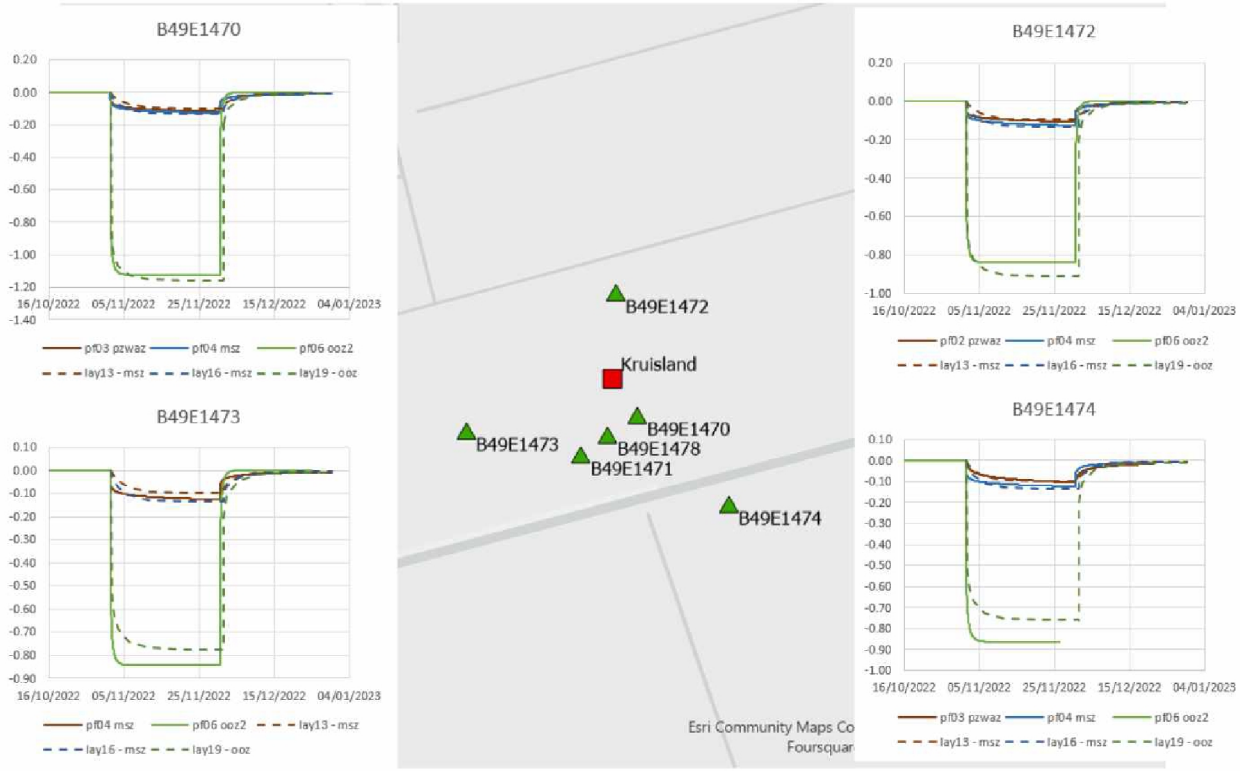
De pompproefinterpretatie is vergeleken met de berekende verlagingen van het Kruislandmodel. De stationair berekende verlagingen zijn vergeleken met de gemeten verlagingen aan het eind van de pompproef, ervan uitgaande dat deze op dat moment voldoende representatief zijn voor de eindverlaging.

Globaal geldt dat:
- De grootste verlagingen voorkomen in het bepompte pakket (Formatie van Oosterhout);
- Dichtbij de put de verlagingen groter zijn dan verder weg.

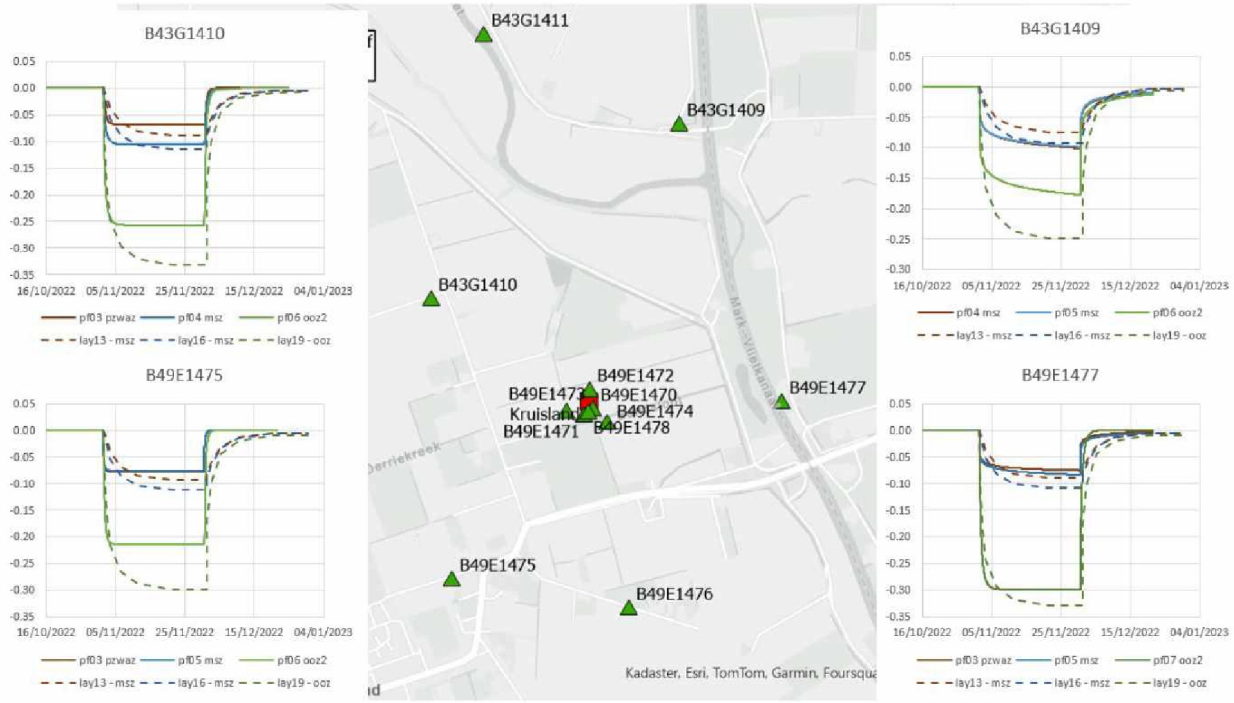
Voor vier punten dichterbij de pompproeflocatie (Figuur 6-1) en vier punten wat verder weg (Figuur 6-2) zijn de berekende en gemeten stijghoogten gepresenteerd. Dichtbij de pompproeflocatie worden de stijghoogten in alle lagen goed gesimuleerd (Figuur 6-1). De gemeten verlaging in de Formatie van Oosterhout bedraagt hier 80 tot 115 cm; dit wordt ook ongeveer berekend, soms is de berekende verlaging wat groter en soms kleiner. Op grotere afstand (Figuur 6-2) zijn de gemeten verlagingen in het bepompte pakket 18 tot 30 cm. De berekende verlagingen zijn vaak wat minder groot (tot 8 cm); in de andere twee lagen wordt meestal enkele centimeters meer verlaging berekend dan gemeten. Dit zijn lokale afwijkingen die geen reden geven tot modelaanpassing.

Uit de metingen komt een wat ander beeld voor meetpunt B19E1409. Dit meetpunt ligt relatief ver weg, 1345 meter noordelijk van de pompput. In deze waarnemingsput worden grotere verlagingen gemeten dan berekend.

Verder valt op dat de gemeten stijghoogten in de Formaties van Peize-Waalre en Maassluis gelijk aan elkaar zijn. Hier lijkt lokaal minder weerstand in de diepe ondergrond aanwezig te zijn. Vanwege de lokale aard van deze afwijking is dit niet verder verwerkt in het grondwatermodel.



Figuur 6-1: Gemeten (doorgetrokken lijn) en berekende stijghoogten (stippellijn) in Formatie Oosterhout (groen), Maassluis (blauw) en Peize-Waalre (bruin) voor vier meetpunten dichtbij de pompproeflocatie

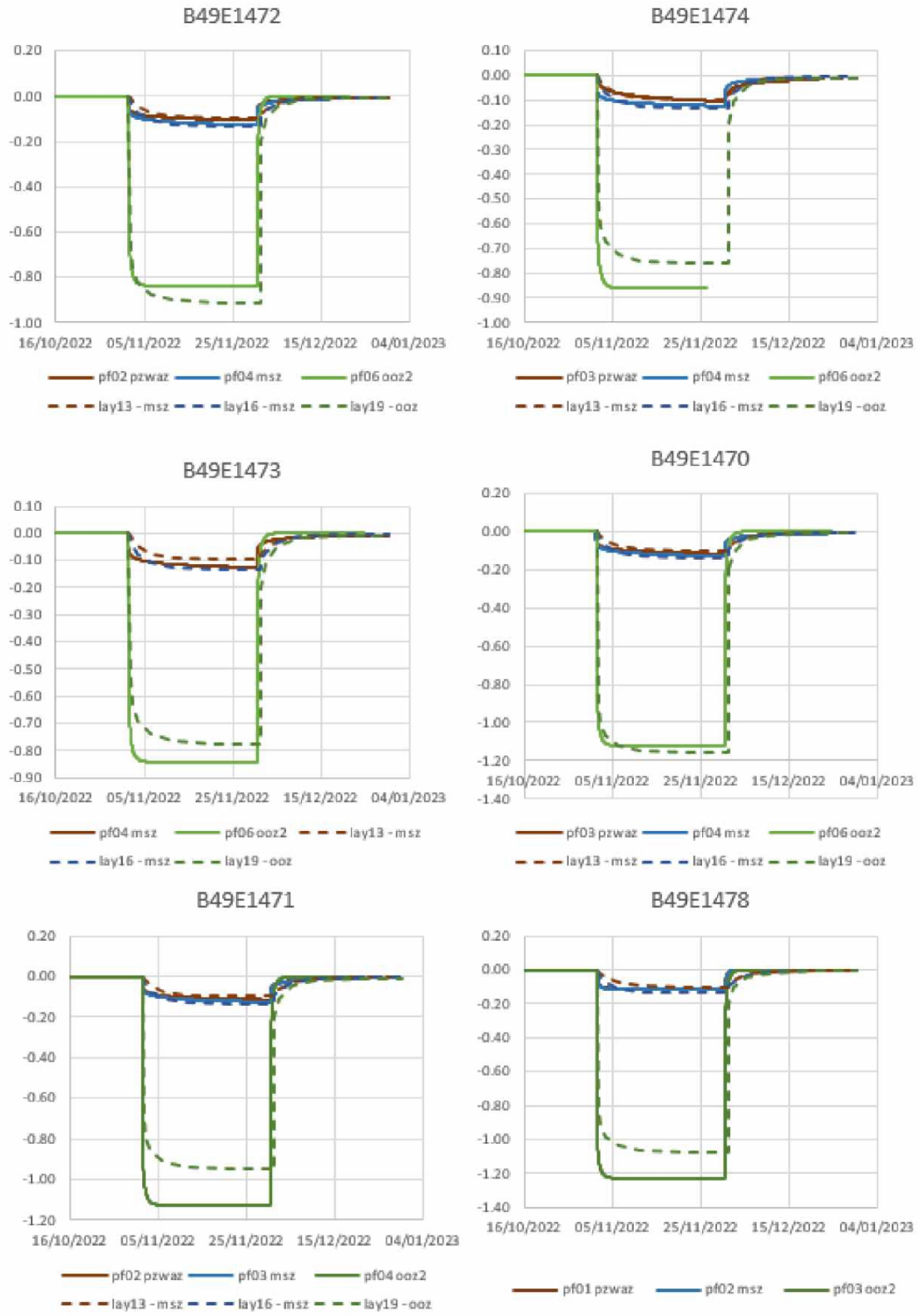


Figuur 6-2: Verlagingen en modelafwijkingen uitgezet tegen de afstand tot de pompput voor vier meetpunten verder weg van de pompproeflocatie

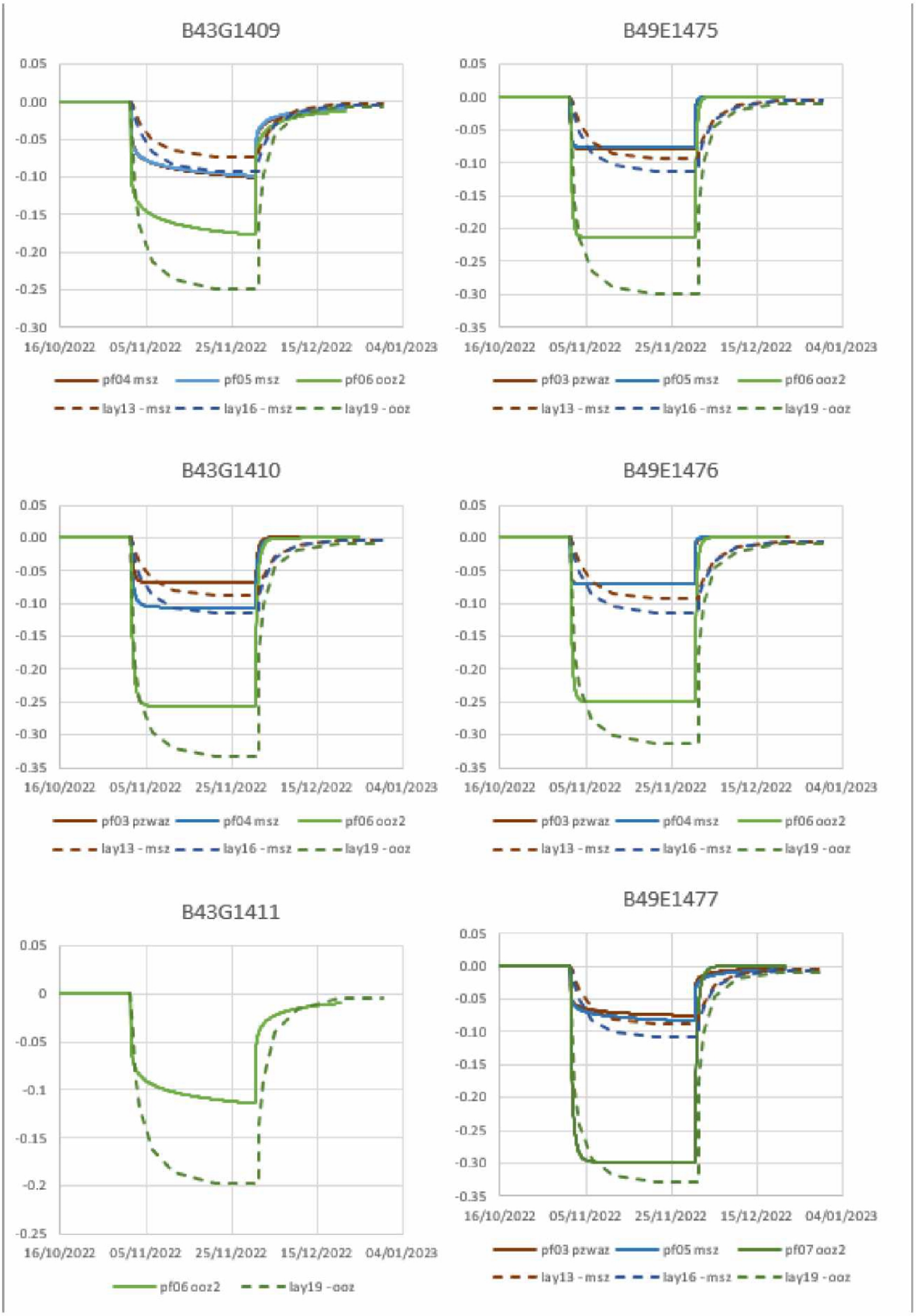
6.1.3 Verandering in de tijd

De verlaging in stijghoogte is geregistreerd op 12 waarnemingslocaties in het bepompte pakket rond de pompput (voor ligging zie Figuur 6-2). Deze zijn vergeleken met de berekende stijghoogtes dichtbij (Figuur 6-3) en op afstand (Figuur 6-4). De berekende einddalingen in stijghoogte in de verschillende lagen kloppen goed met de metingen. In de grafieken is te zien hoe snel de eindverlaging wordt bereikt. De pompproef zorgt voor een gemeten verlaging van 80 tot 120 cm in het bepompte pakket. De verlagingen in het pakket boven het bepompt pakket, boven de Oosterhoutklei, zijn veel kleiner en dit wordt ook berekend.

De verlaging in stijghoogte vindt snel, bijna abrupt plaats. Het grondwatermodel berekent een iets trager proces. Kennelijk is de bergingscoëfficiënt in de bepompte laag kleiner dan gemodelleerd (zie Tabel 4-3). Aanpassing van de bergingscoëfficiënt gaf niet een betere fit, kennelijk is het model hier weinig gevoelig voor. Dit heeft alleen gevolgen voor de berekening van veranderingen in de tijd. In Kruisland wordt een constant debiet onttrokken en daarom heeft deze parameter beperkt invloed op de effectberekeningen.



Figuur 6-3: Berekende (gearceerd) en gemeten (dicht) stijghoogtes tijdens de pomproef dicht bij de pompproef



Figuur 6-4: Berekende (gearceerd) en gemeten (dicht) stijghoogtes tijdens pompproef op afstand van de pompproef

6.2 Eerder uitgevoerde pompproeven

Bodemconstantes zijn eerder afgeleid in pompproeven uitgevoerd door het toenmalige Rijksinstituut voor de Drinkwatervoorziening (RID). Deze resultaten zijn verzameld door Cattenstaart (1983). De karakteristieken zijn samengevat in Tabel 6-2 waarbij de coördinaten van de winning zijn geprikt uit het getoonde gebied in de bijgeleverde kaarten in het rapport. Rond deze coördinaten zijn de bodemparameters van het grondwatermodel gecontroleerd.

Tabel 6-2: Karakteristieken van historische pompproeven (Cattenstaart, 1983)

Locatie	Jaar pompproef	Diepte onttrekking (minus NAP in m)
Halsteren	1981	65 - 130
Huijbergen	1965	50 - 90
Ossendrecht	1965	30 - 60
Bergen op Zoom	1961	30 -110
Roosendaal-Nispen	1976	35 – 140
Wouw	1968	65 - 145
Schijf (Rucphen)	1965	90 - 150
Seppe	Onbekend	110 - 175

De afgeleide kD-waarden uit de pompproef zijn samengevat in Tabel 6-3. Er is onderscheid gemaakt tussen het eerste watervoerende pakket (boven de Oosterhoutklei) en het tweede watervoerende pakket (onder de Oosterhoutklei). Voor de winningen in de buurt van de Brabantse Wal zijn het eerste en tweede watervoerende pakket samengenomen. De Oosterhoutklei ontbreekt hier (grotendeels).

Tabel 6-3: Vergelijking tussen afgeleide kD-waarden in pompproeven en Kruislandmodel

Locatie	kD WVP 2 (m^2/d) Formatie van Oosterhout		kD WVP 1 + 2 (m^2/d) Formatie van Peize, Waalre, Maassluis en Oosterhout		kD WVP 1 (m^2/d) Formatie van Peize, Waalre en Maassluis	
	Pompproef	Kruisland model	Pompproef	Kruisland model	Pompproef	Kruisland model
Halsteren	600-630	400 - 450				
Huijbergen			1900	1050 - 1150		
Ossendrecht			1800	700 - 1100		
Bergen op Zoom			2500	960 - 1200		
Roosendaal-Nispen	1400	1800 - 2100			900	1050 - 1200
Wouw	1260	700 - 800			900	780 - 900
Schijf (Rucphen)	2000	1900 - 2400			750	750 - 850
Seppe	1600	1700 - 2000				

Conclusie is dat eerdere kD-waardes uit eerdere pompproeven redelijk overeenkomen met de waardes van het gekalibreerde grondwatermodel. KD-waarden van het grondwatermodel vallen binnen de interval van de pompproef of liggen hier dichtbij (Tabel 6-3). KD-waarden van de winningen op de Brabantse Wal (Halsteren, Huijbergen, Ossendrecht en Bergen op Zoom) zijn in het model lager dan uit de pompproeven bleek.

De afgeleide weerstandswaarden zijn opgenomen in Tabel 6-4. Het is lastig om een weerstandswaarde per laag af te leiden, omdat in een pompproef vaak zowel weerstand aan de boven- als onderkant wordt ondervonden. Vooral voor hogere weerstandswaarden is het moeilijk om uit een pompproef de juiste weerstandswaarde af te leiden. De afgeleide waarden zijn daarom minder zeker dan de afgeleide kD-waarden. Vooral de weerstand van de Waalreklei is in het Kruislandmodel veel hoger dan eerder bepaald in de pompproeven. Deze weerstanden zijn in het model zo hoog omdat dit de enige logische verklaring is voor het grote gemeten potentaalverschil over deze laag.

Tabel 6-4: Vergelijking tussen afgeleide c-waarden in pompproeven en Kruislandmodel

Locatie	Weerstand (d) Oosterhoutklei		Weerstand Waalreklei (d)	
	Pompproef	Kruislandmodel	Pompproef	Kruislandmodel
Halsteren	2.500	1.000-2.000		
Huijbergen			1.030	8.000 – 30.000
Ossendrecht			1.000	30.000 – 50.000
Bergen op Zoom				
Roosendaal-Nispen	3.200	1.500 – 3.500	2.800	8.000 – 25.000
Wouw	18.000	2.800 – 3.300	3.100	5.000 – 10.000
Schijf (Rucphen)	4.500	750 – 4.200	3.000 – 4.000	3.000 – 4.500
Seppe	1.800	4.200 – 7.500		

6.3 Berekende grondwaterstanden in natuurgebieden

Het grondwatermodel is verfijnd rond de zeven natuurgebieden waarvoor eerder een LESA is gemaakt. De berekende effecten in verandering in grondwaterstand en stijghoogte worden gebruikt om een oordeel te vormen over de ecologische effecten. Een goede berekening van grondwaterstanden en stijghoogten is hier daarom van belang. Per natuurgebied is een beoordeling gemaakt in hoeverre het model voldoet:

- In hoeverre wijken gemiddelde en berekende grondwaterstanden van elkaar af? Voor elk natuurgebied is een representatieve peilbuis uitgekozen en hier zijn berekende en gemeten grondwaterstanden met elkaar vergeleken;
- Voor deelgebieden waar metingen ontbreken en waar wel waardevolle, grondwaterafhankelijke natuur voorkomt is bepaald of de berekende grondwaterstand plausibel is. Dit is gedaan door berekende grondwaterstanden te vergelijken met bekende GXG-ranges uit de literatuur voor de ter plaatse aanwezige natuurwaarden. Daarbij is uitgegaan van het hoogste detailniveau van de vegetatiekundige beschrijving dat op elke locatie beschikbaar is. Dit betekent dat eerst is gekeken naar de vegetatietypen en als deze ontbreken dan wordt gekeken naar natuurbeheer- of habitattypen.

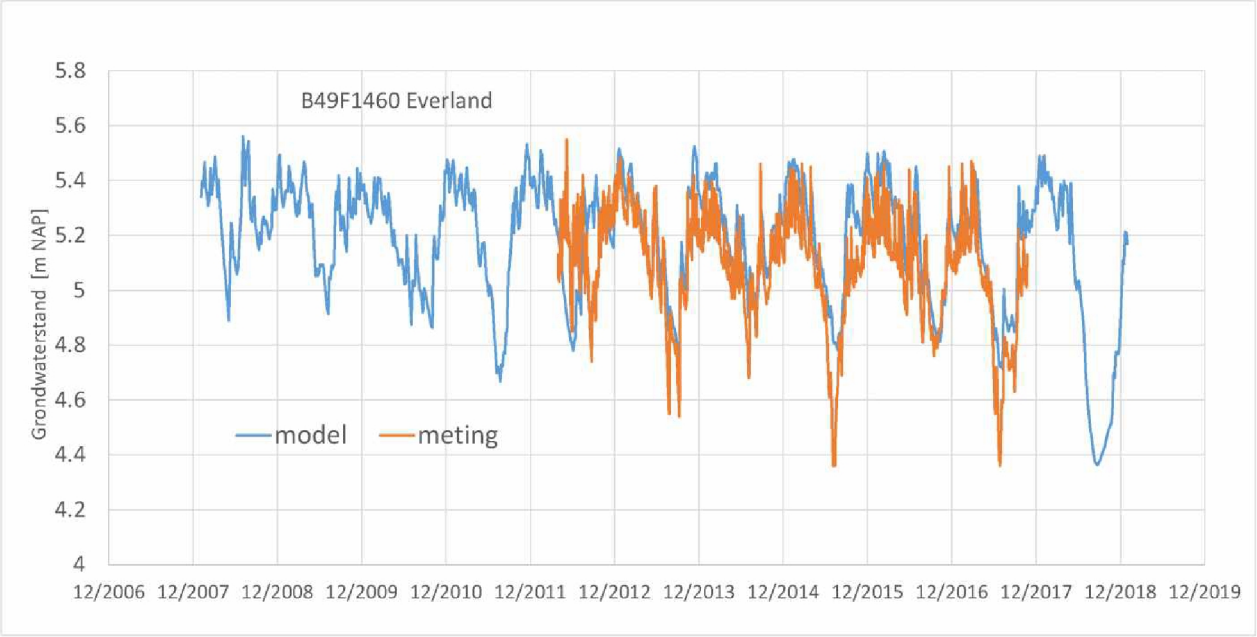
Hieruit blijkt dat de berekende grondwaterstanden in de zeven natuurgebieden plausibel zijn. Afwijkingen tussen berekende en gemeten grondwaterstanden zijn klein en in deelgebieden waar geen metingen zijn, zijn de berekende grondwaterstanden plausibel op basis van veldkennis en de vegetatie- of natuurtypenkaart.

In de paragrafen hieronder zijn de opvallende zaken en de hierna gemaakte verbeteringen uiteengezet in Tabel 6-5.

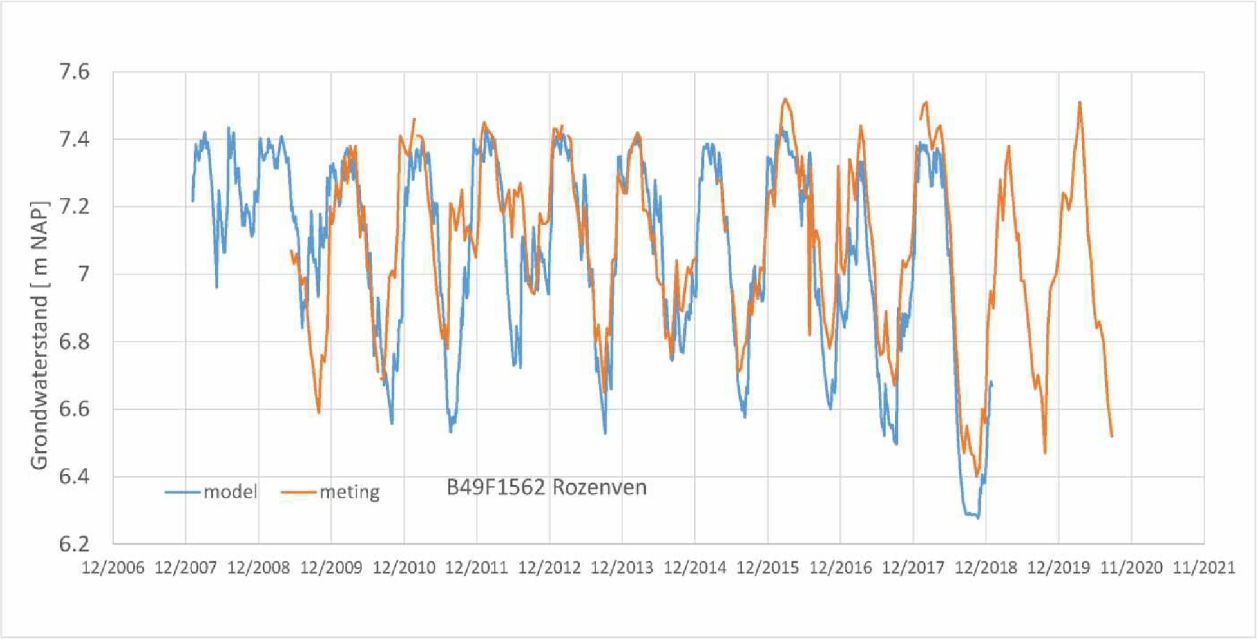
Royal HaskoningDHV

Tabel 6-5: Samenvatting van bevindingen in de natuurgebieden

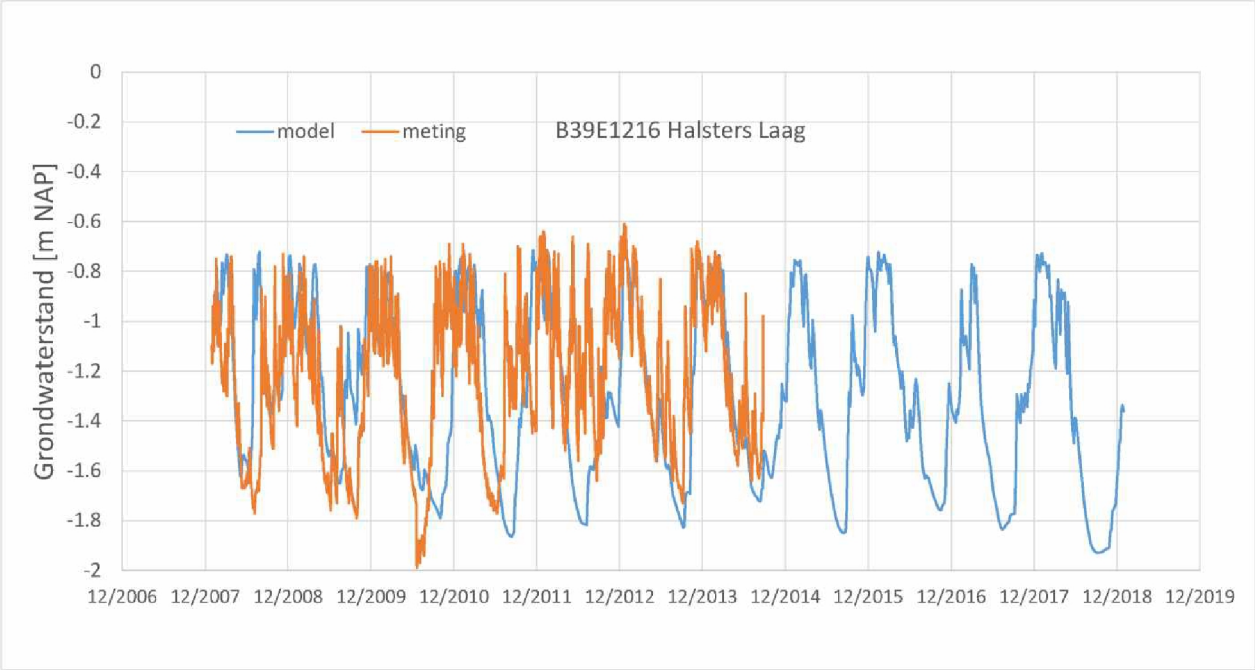
Gebied	Bevinding uit model	Vergelijking meting-berekening
Molenbeek	Meest noordwestelijke deel van Molenbeek is het natst. Dit is een zonk waar ook kwel voorkomt. Dit is plausibel. Belangrijkste aandachtsgebied is het Everland met kruidenrijk grasland. De grondwaterstand wordt hier goed berekend.	Kleine afwijkingen (zie Figuur 6-5.
Spuitendonks bosje	In winter en voorjaar is het erg nat omdat water stagneert op leemlagen. In de zomer zakken grondwaterstanden diep weg. Model berekent zelfde patroon.	Geen meetpunt
Rozenven	Aan de oostkant van Rozenven bevindt zich natuurtype natte heide. Gewenste grondwaterstand is 20 tot 40 cm beneden maaiveld	Berekening komt goed overeen met metingen (zie Figuur 6-6).
Zoomland	Berekende grondwaterstanden en stijghoogten waren aanvankelijk te laag (te droog). In de modelkalibratie is extra aandacht besteed. Meerbodems (met extra weerstand) zijn in het model verwerkt en weerstand Waalreklei is verhoogd. Gebied kan in de winter erg nat worden, met grondwaterstanden tot boven maaiveld. Toestroming van oppervlakkig regenwater kan niet met grondwatermodel berekend worden.	Kalibratieresultaat is verbeterd, maar freatisch worden nog ongeveer 50 cm te lage grondwaterstanden berekend.
Halsters Laag	Vooral westzijde van Halsters Laag is erg nat.	Kleine afwijkingen in gehele gebied. Metingen in referentiepeilbuis hebben een meer grillig patroon dan berekend (Figuur 6-7).
Oudland	In het gebied zijn scherpe grondwatergradiënten: natte delen met kruidenrijk grasland en hogere zandkoppen waar grondwaterstand wegzakt. Dit patroon wordt goed berekend. Maar de gradiënt is met een regionaal model moeilijk precies te modelleren.	Beperkt aantal metingen beschikbaar. Peilbuizen staan op gradiënt en berekenen te hoge grondwaterstanden (Figuur 6-9).
Cruijslandse Kreken	Langs de kreken liggen hogere stroomruggen. Op korte schaal is er een scherpe gradiënt in grondwaterstanden. Dit is moeilijk te modelleren. De Roode Weel, het meest noordelijke deel bestaat uit vochtig hooiland. Detailgegevens (5.1.2.e 2024) zijn goed verwerkt in het model: Waterpeil (jaarrond NAP -1,25m), diepte van de plas (2-3 meter), bodemsamenstelling (zand en 10 -20 cm bagger).	Berekende grondwaterstand Roode Weel is 40 cm te laag.
Gastels Laag	Er is sprake van een scherpe gradiënt van de Heinsberg (ten zuiden van Gastels Laag) naar het laag gelegen kwelgebied van Gastels Laag. Modellering van de leemlagen zit niet gedetailleerd in het model.	Afwijkingen in Gastels Laag zijn erg klein. Grondwaterstand zakt iets minder uit dan soms wordt berekend (zie Figuur 6-8). Bij de Heinsberg wordt grondwaterstand te laag berekend omdat lokale leemlaagjes in model ontbreken.



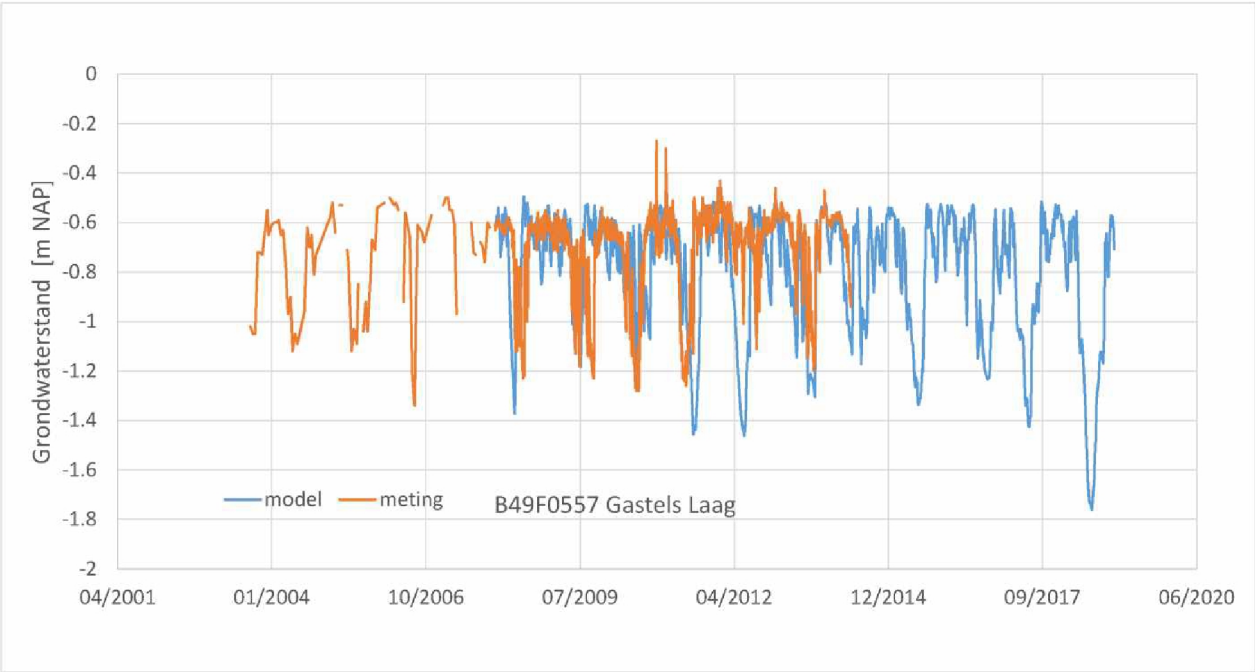
Figuur 6-5: Berekende en gemeten grondwaterstand in het Everland langs de Molenbeek (peilbuis B49F1460)



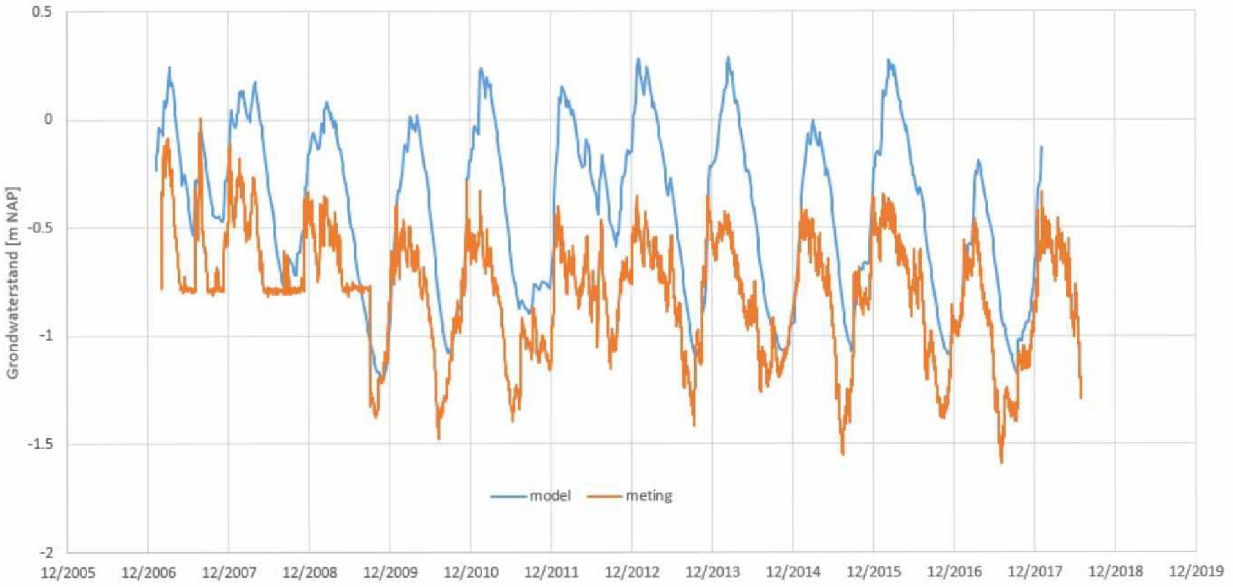
Figuur 6-6: Berekende en gemeten grondwaterstand bij het Rozenven (peilbuis B49F1562)



Figuur 6-7: Berekende en gemeten grondwaterstand bij het Halsters Laag (peilbuis B49E1216)



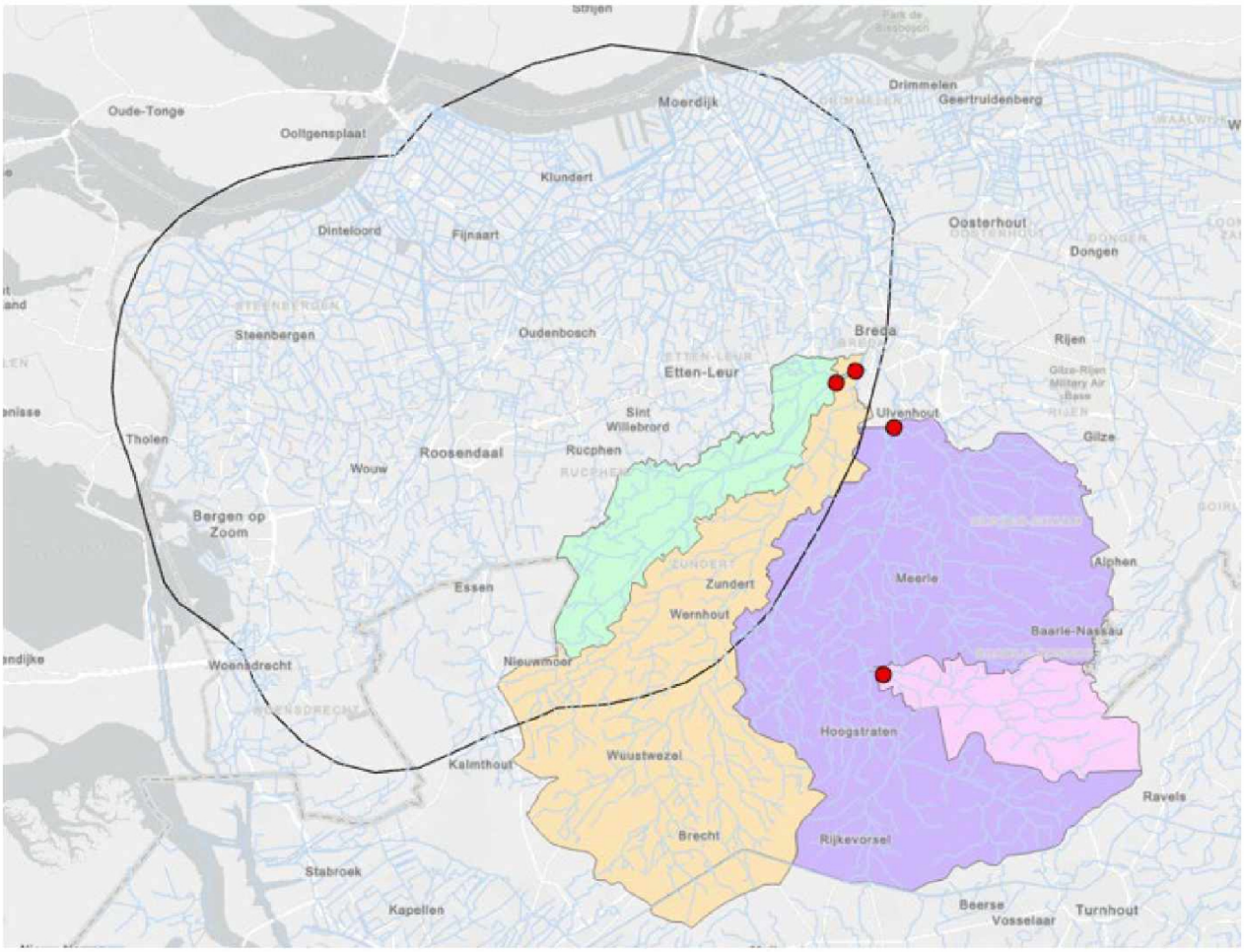
Figuur 6-8: Berekende en gemeten grondwaterstand bij Gastels Laag (peilbuis B49F0557)



Figuur 6-9: Berekende en gemeten grondwaterstand bij Oudland (peilbuis B49E1228)

6.4 Afvoer

Een grondwatermodel moet naast de berekening van grondwaterstanden en stijghoogten ook de interactie met het oppervlaktewatersysteem goed kunnen modelleren. Ofwel de berekende afvoer van grondwater naar het oppervlaktewatersysteem moet goed overeenkomen met metingen. Validatie van berekende en gemeten afvoeren wordt bemoeilijkt omdat de oppervlaktewaterafvoer uit meerdere componenten bestaat. De berekende afvoer in het grondwatermodel is gelijk aan de totaal afgevoerde hoeveelheid gedraineerd water binnen dit deelstroomgebied. Dus al het water dat over het maaiveld en door de waterlopen, greppels en buisdrainage wordt afgevoerd. Deze redelijk constante toestroom wordt de basisafvoer genoemd. Maar daarnaast wordt de afvoer van het oppervlaktewatersysteem ook bepaald door de aanvoer van bovenstrooms en door de snelle afvoer van regen na flinke buien in stedelijk gebied en oppervlakkige afvoer over het maaiveld. De snelle afvoer in stedelijk gebied zit niet in het grondwatermodel en wordt buiten beschouwing gelaten.



Figuur 6-10: Stroomgebieden en meetpunten in het oppervlaktewater voor meting van de afvoer

Daarnaast zitten er in de gemeten debieten onnauwkeurigheden en mogelijk fouten. De vergelijking moet daarom gebruikt worden of de orde van grootte van berekende en gemeten afvoer met elkaar overeenkomen.

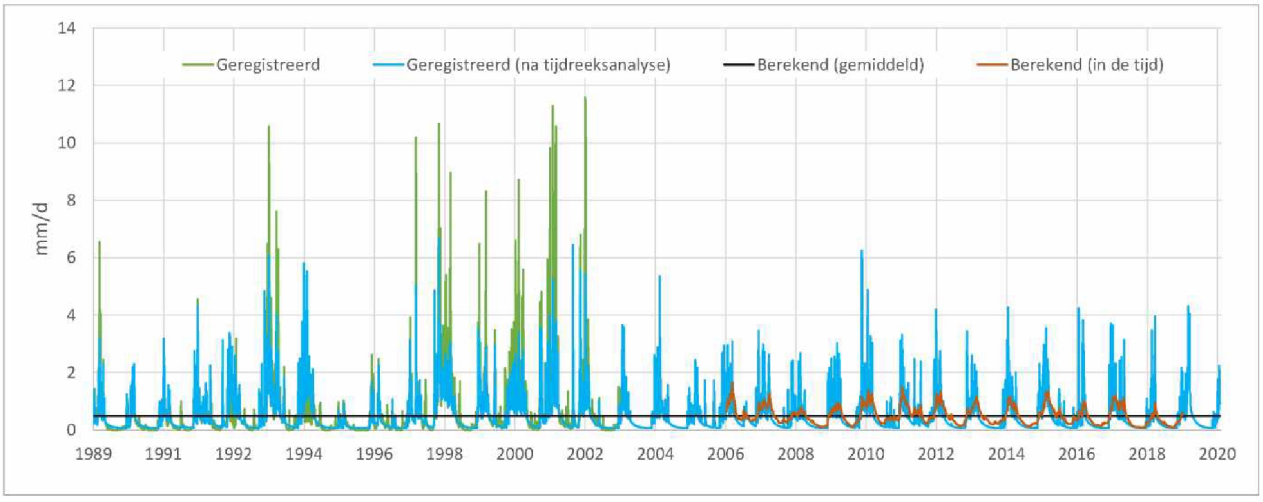
Voor de validatie is gebruik gemaakt van meetdata van waterschap Brabantse Delta. Metingen van afvoerdata zijn aangeleverd voor vier meetpunten voor de periode 1990 tot 2023. In Figuur 6-10 zijn de aangeleverde stroomgebieden en bijbehorende meetpunten weergegeven.

Voor de validatie van het Kruislandmodel is alleen de afvoer van “Turfvaart Breda” (groen) bruikbaar, omdat de andere aangeleverde stroomgebieden (deels) buiten het modelgebied vallen. Metingen in het interessegebied, zoals de Cruijslandse Kreken of de Molenbeek, ontbreken.

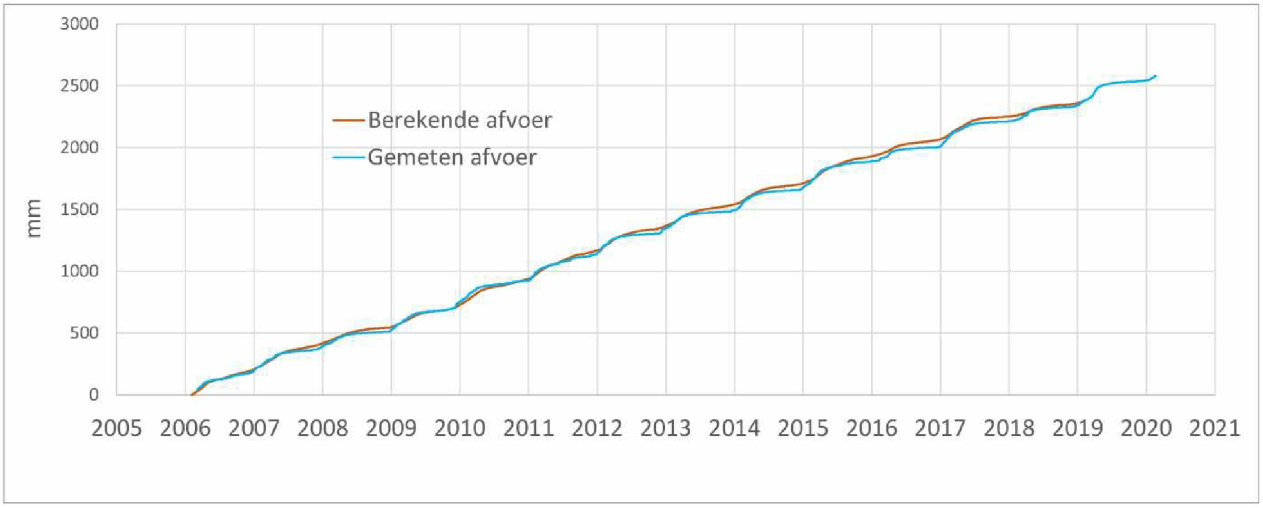
De gemeten en berekende afvoer van de Turfvaart is weergegeven in Figuur 6-11. Het afvoerdebiet (in m^3/s) is omgerekend naar een gemiddelde afvoer voor het gehele stroomgebied (in mm/d):

- Met de groene lijn in Figuur 6-11 zijn de metingen van het oppervlaktewatermeetpunt weergegeven. Deze metingen lopen door tot en met 2004. Na deze periode is de gemeten afvoer bepaald met tijdreeksanalyse (blauwe lijn);
- Met de berekende lijn is de berekende afvoer door het grondwatermodel weergegeven. Het patroon komt goed overeen, maar de hoge pieken in de afvoer ontbreken. Dit is logisch omdat de snelle afvoer ontbreekt in het grondwatermodel;
- Met de zwarte lijn is de gemiddelde afvoer berekend over de gehele periode. Het grondwatermodel berekent een gemiddelde afvoer van 0,51 mm/d (groene lijn) en dit komt goed overeen met de gemiddelde gemeten afvoer van 0,63 mm/d.

De afvoer van de Turfvaart is ook gepresenteerd als cumulatief debiet (Figuur 6-12). In deze grafiek is te zien dat de lijn van gemeten en berekend debiet elkaar volgen. Kortom, grootte van berekende en gemeten afvoer van de Turfvaart komen goed met elkaar overeen. Dit geeft vertrouwen in de kwaliteit van het grondwatermodel.



Figuur 6-11: Gemeten en berekende afvoer Turfvaart Breda

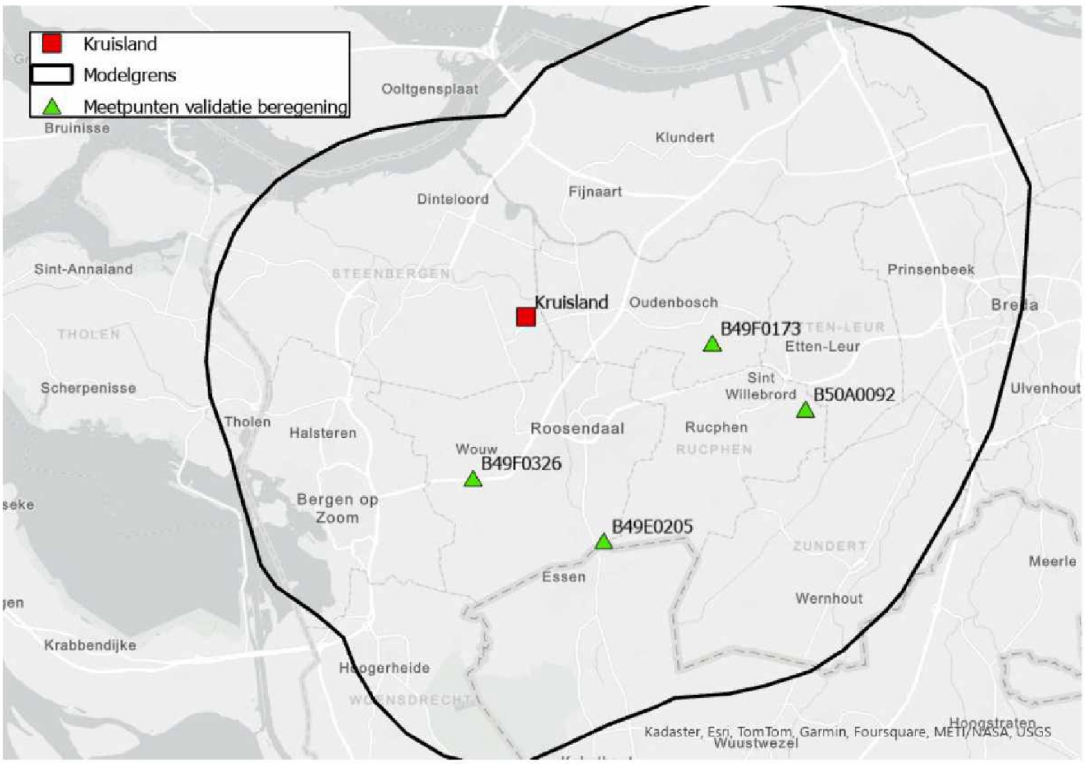


Figuur 6-12: Cumulatieve gemeten en berekende afvoer (in mm) voor stroomgebied Turfvaart Breda

6.5 Beregening uit grondwater

Beregening is in het grondwatermodel verwerkt. Precieze locaties en diepte van de putten zijn niet bekend en daarom zijn hiervoor aannames gedaan. In de validatie is gecontroleerd of berekende en gemeten verlagingen met elkaar overeenkomen voor enkele meetreeksen. Onttrekking voor beregening vindt plaats van relatief grote diepte uit de Formatie van Maassluis en de Formatie van Oosterhout. Het aantal beschikbare waarnemingsfilters in deze lagen is beperkt, dichtbij Kruisland ontbreken deze meetpunten. We hebben vier meetreeksen beoordeeld (Figuur 6-13) voor de droge zomer van 2018. In deze zomer werd veel grondwater onttrokken. Deze meetpunten liggen ten zuiden van Kruisland omdat hier het meeste grondwater wordt onttrokken voor beregening; in het poldergebied wordt voornamelijk oppervlaktewater gebruikt.

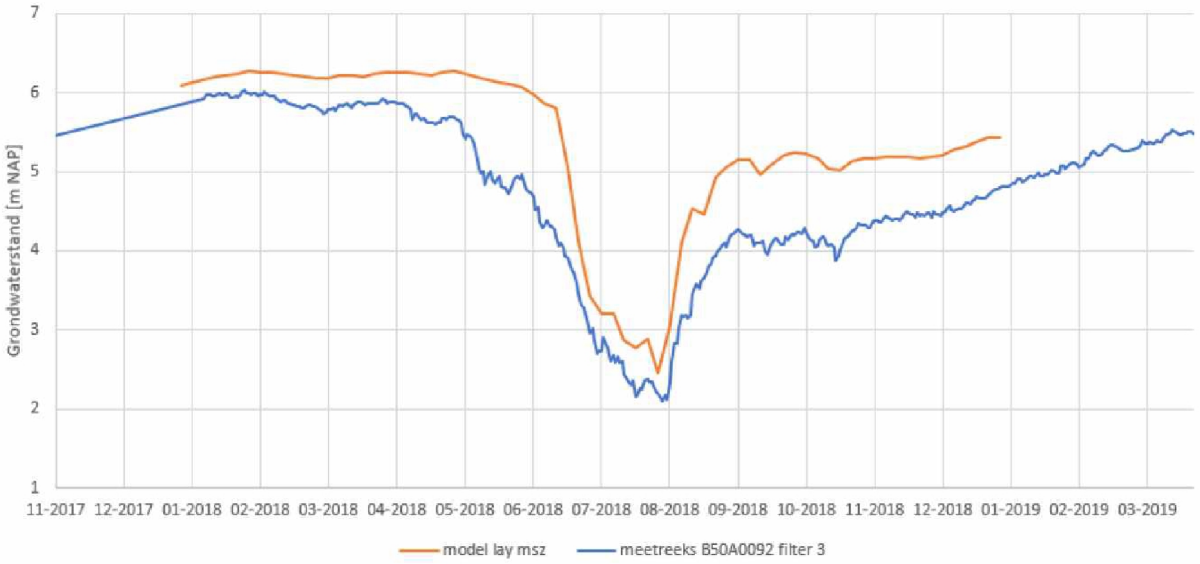
De effecten van beregening in West-Brabant zijn groot en worden goed gesimuleerd met het model. Dit geldt zowel voor onttrekking uit de Formatie van Maasluis (Figuur 6-14 en Figuur 6-15) als voor de onttrekking uit de Formatie van Oosterhout (Figuur 6-16 en Figuur 6-17).



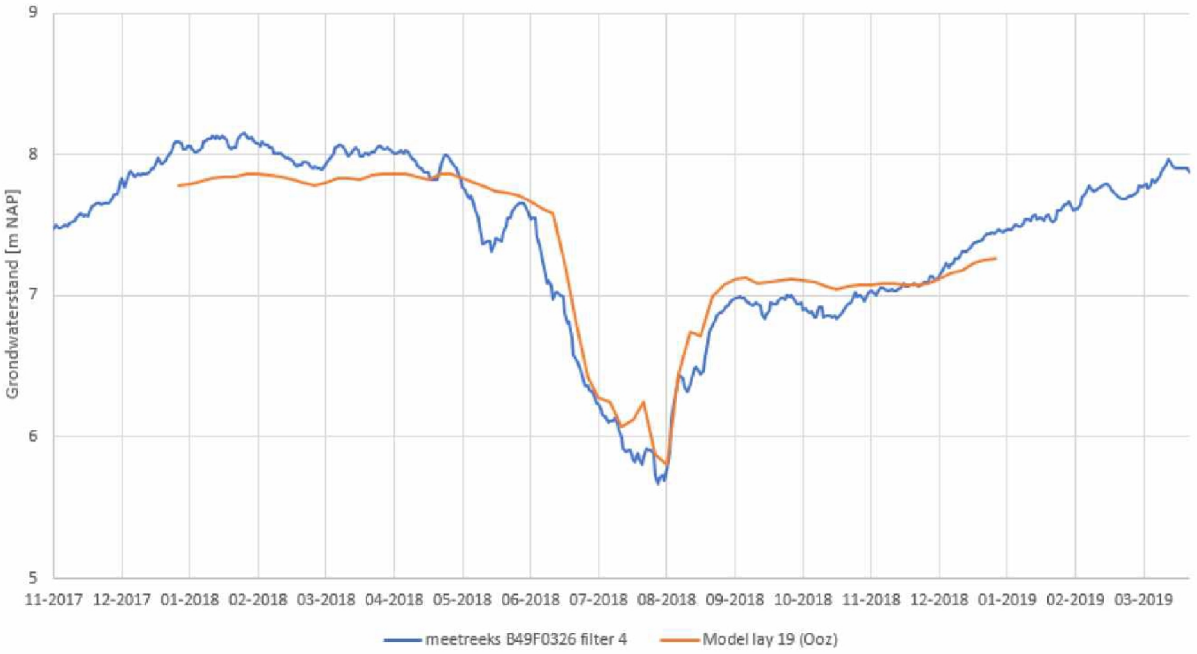
Figuur 6-13: Locatie meetpunten voor validatie berekening effect van beregening



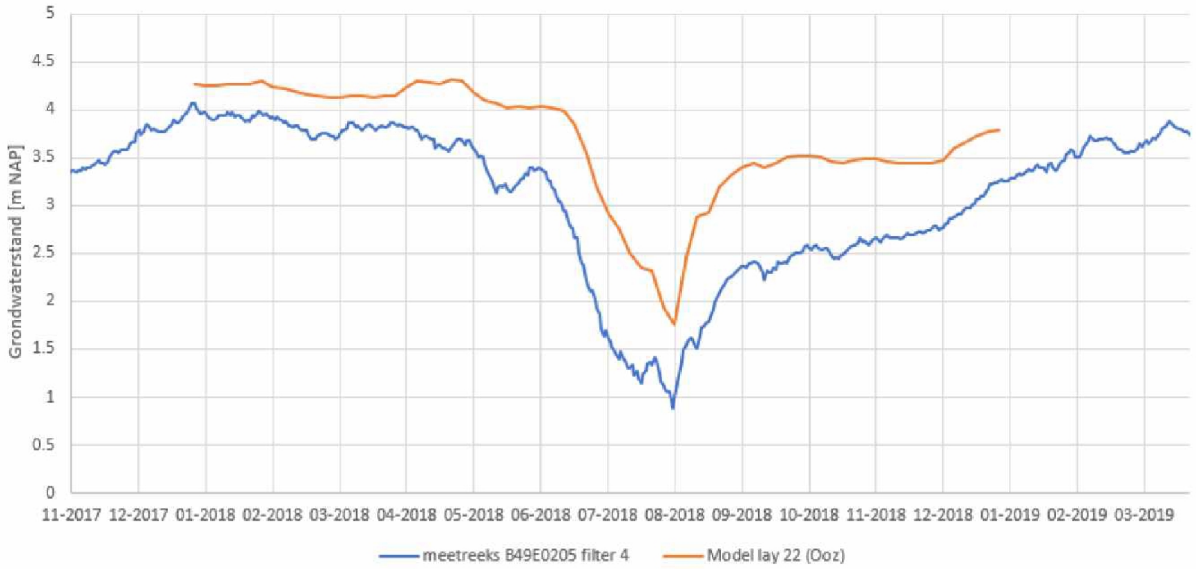
Figuur 6-14: Gemeten en berekende stijghoogtes in 2018 voor meetpunt B49F0173 (Formatie van Maassluis)



Figuur 6-15: Gemeten en berekende stijghoogtes in 2018 voor meetpunt B50A00092 (Formatie van Maassluis)



Figuur 6-16: Gemeten en berekende stijghoogtes in 2018 voor meetpunt B49F0326 (Formatie van Oosterhout)



Figuur 6-17: Gemeten en berekende stijghoogtes in 2018 voor meetpunt B49E0205 (Formatie van Oosterhout)

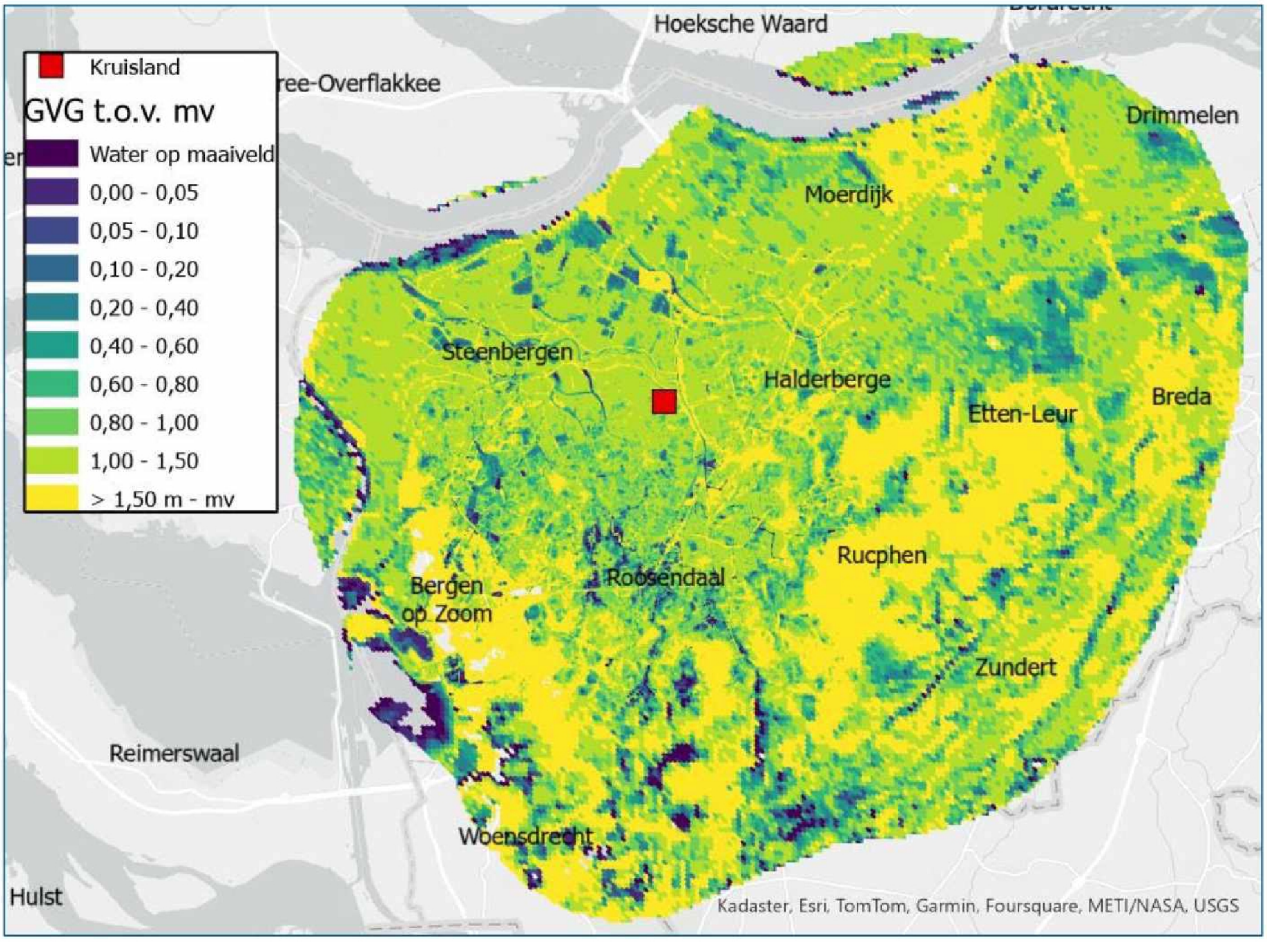
7 Huidige situatie

Met het gekalibreerde grondwatermodel zijn de huidige grondwaterstanden, kwelfluxen en stroombanen berekend. Deze worden in dit hoofdstuk gepresenteerd.

7.1 Berekende grondwaterregime

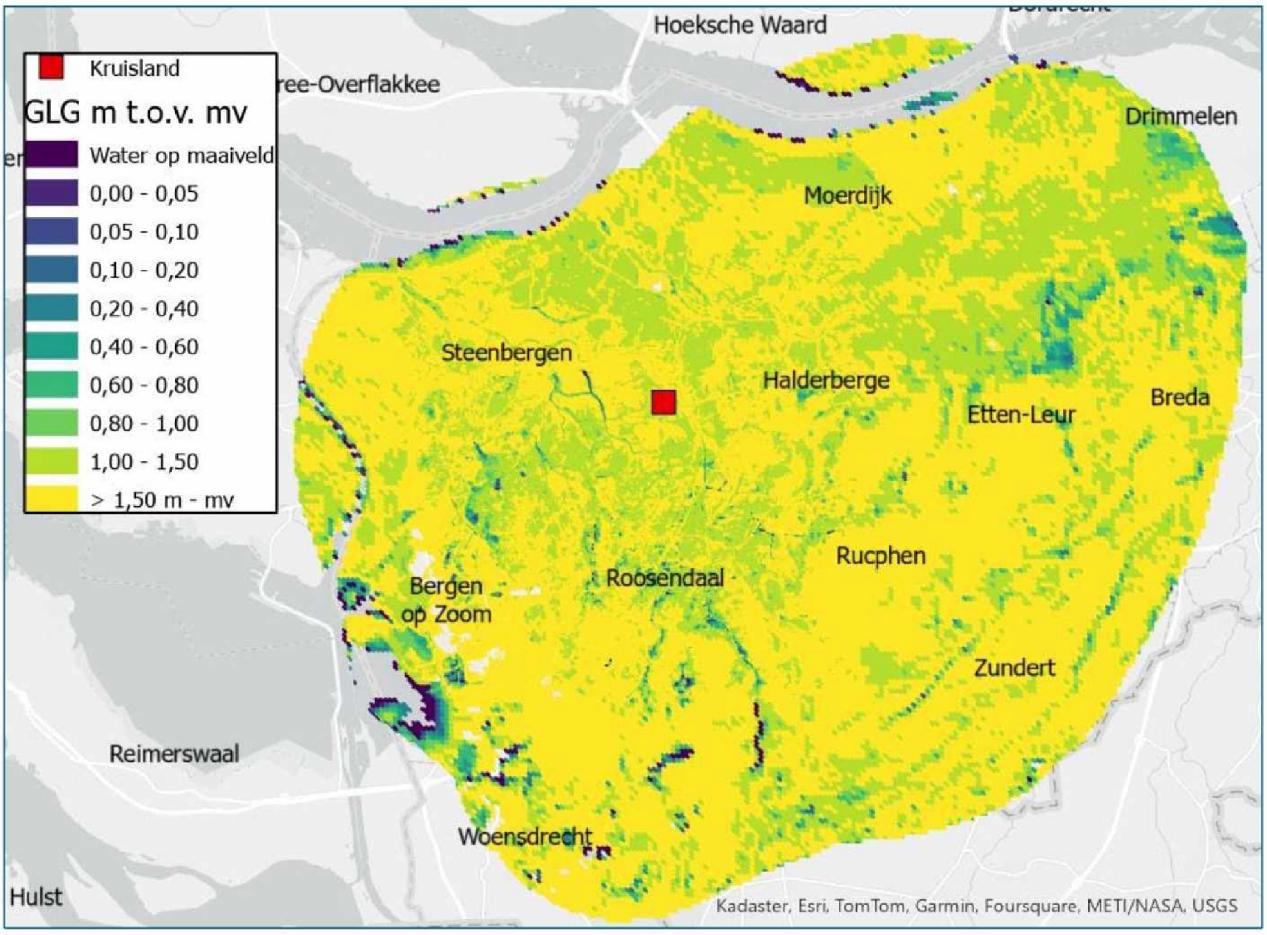
De berekende GVG, GLG, en GHG van de huidige situatie zijn weergegeven in Figuur 7-1, Figuur 7-2 en Figuur 7-3.

In de berekende voorjaarsgrondwaterstand (Figuur 7-1) zijn goed de verschillende landschapstypes te herkennen. De hoge gronden, zoals de Brabantse Wal en de Rucphense bossen, hebben diepe grondwaterstanden, dieper dan 1,5 meter onder maaiveld. De natte gebieden zijn ook goed herkenbaar: de beekdalen in het zuiden (Turfvaart, Molenbeek) en de westrand van de Brabantse Wal. Ook de Naad van Brabant, de overgang van zand naar kleigebied is herkenbaar, in deze zone zijn de grondwaterstanden hoger dan het poldergebied ten noorden hiervan. Grondwater in het poldergebied zit vaak dieper dan 1 meter ten gevolge van drainage.



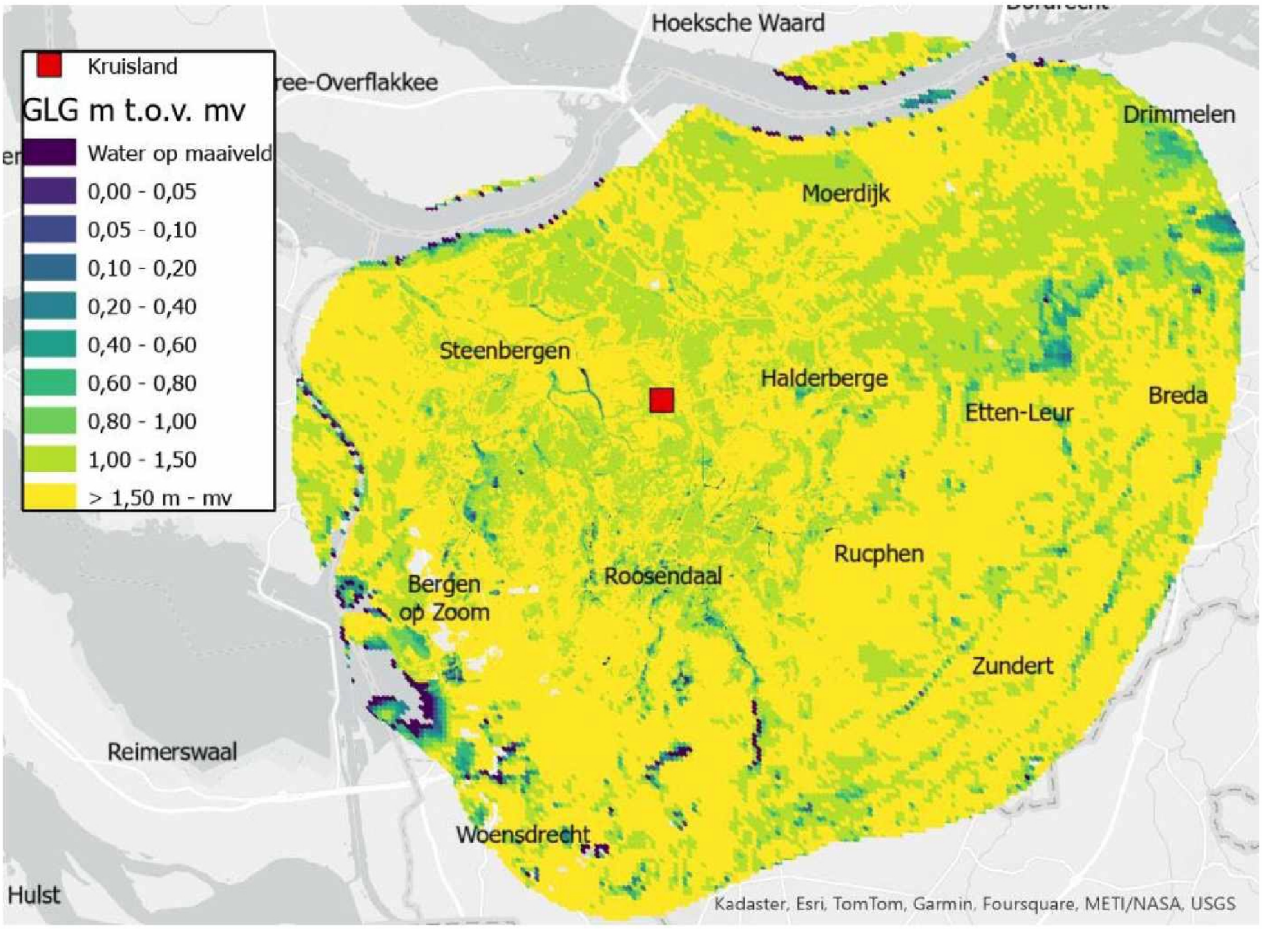
Figuur 7-1: Berekende GVG in huidige situatie

De GLG situatie geeft een situatie weer representatief voor een gemiddelde zomersituatie. Grondwaterstanden zakken dan diep weg. Alleen in de beekdalen, kreken en kwelgebieden zijn de grondwaterstanden hoger dan een halve meter onder maaiveld (Figuur 7-2).



Figuur 7-2: Berekende GLG in de huidige situatie

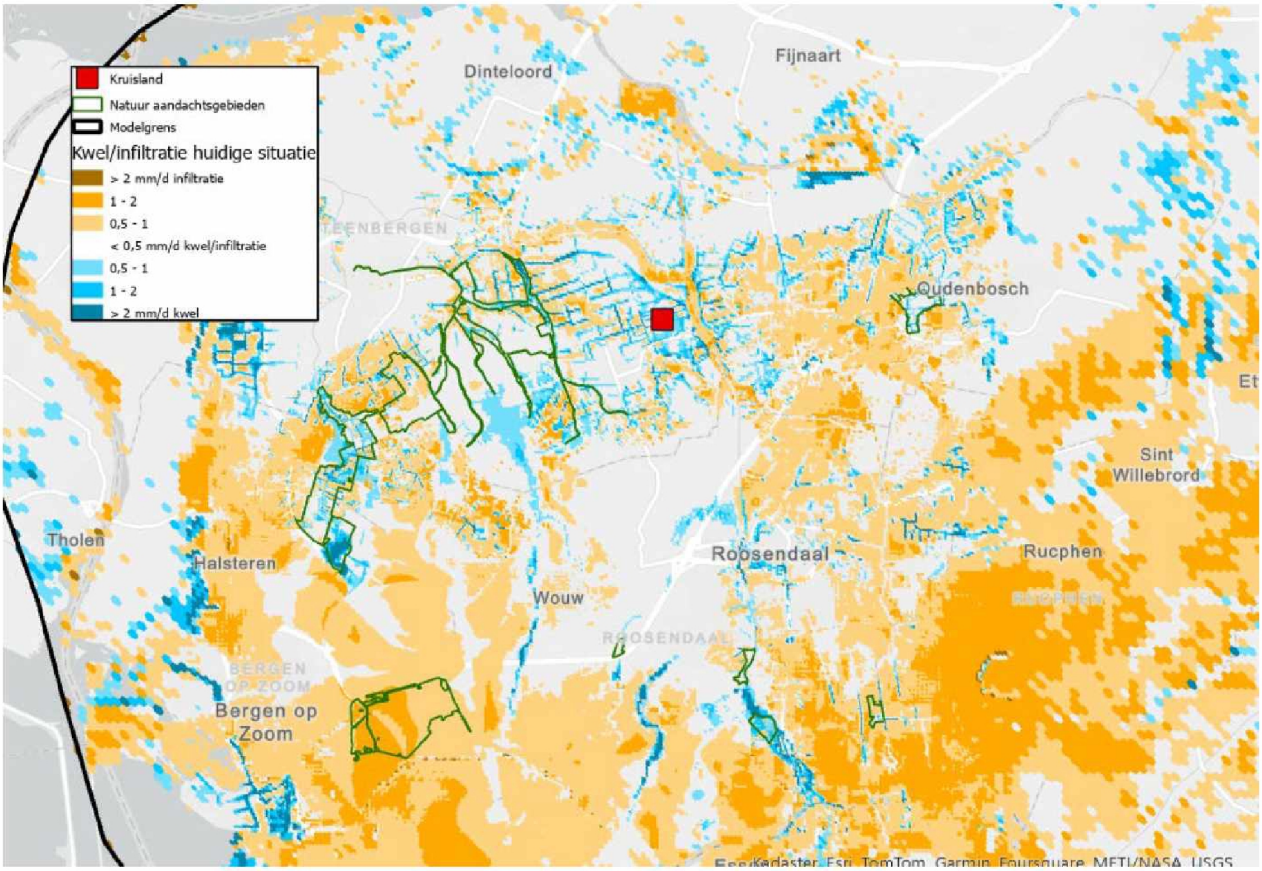
De GHG situatie geeft een situatie weer representatief voor een gemiddelde wintersituatie. Grondwater zit dan dicht aan het maaiveld, met uitzondering van de hoger gelegen zandgebieden zoals de Brabantse Wal en de Rucphense bossen (Figuur 7-3).



Figuur 7-3: Berekende GHG in huidige situatie

7.2 Kwel en infiltratie

Kwel is gedefinieerd als de opwaartse flux van grondwater naar de bovenste grondlagen. Dit water wordt afgevoerd door het oppervlaktewatersysteem, zoals de beken, vaarten, kreken en poldergebieden (Figuur 7-4). In de gebieden waar drainage ontbreekt, wordt water toegevoegd aan het grondwatersysteem: de infiltratiegebieden.



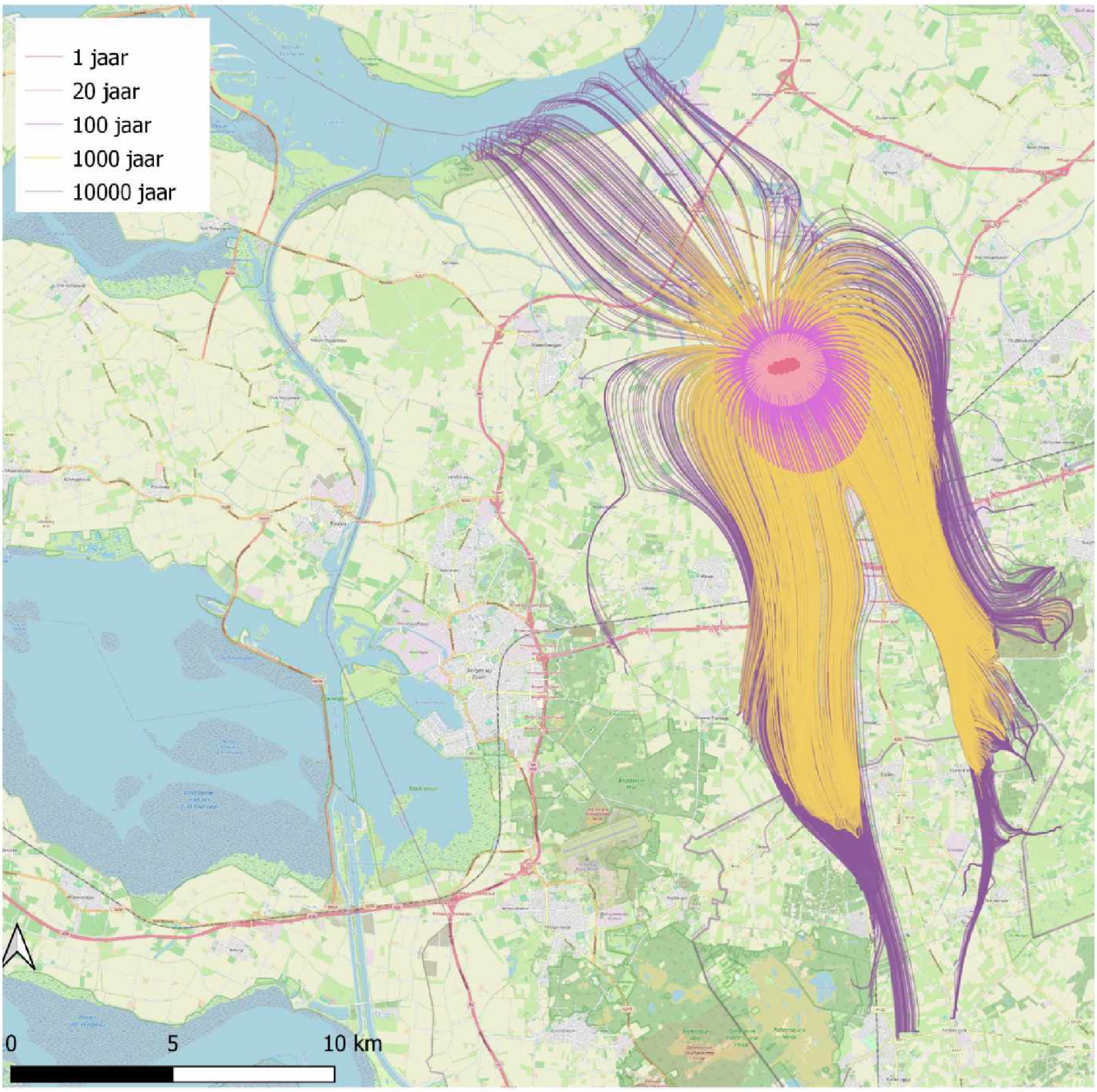
Figuur 7-4: Kaart met berekende kwel/infiltratie in huidige situatie

7.3 Herkomst van het water

Met het grondwatermodel is de herkomst van het grondwater berekend. Dit is gedaan met stroombaanberekeningen vanuit de winningslocatie met de volgende specificaties:

- Tot maximaal 10.000 jaar terug in de tijd;
- 200 stroombanen per put;
- 10 richtingen vanaf een cirkel rond de put;
- 20 diepteniveaus verticaal verdeeld over modellaag 20 en 21.

Het grootste deel van het grondwater komt met de stromingsrichting mee vanuit het zuiden toegestroomd. Het oudste grondwater is meer dan 1000 jaar en komt uit België toegestroomd. Bovenstrooms van de winning Kruisland liggen onder andere de winningen van Wouw en Roosendaal. Grondwater dat naar deze winningen toestroomt komt daarom niet in de winning Kruisland terecht. Dit verklaart de open gebieden ten zuiden van Kruisland waar de stroombanen omheen krullen.



Figuur 7-5: Berekende stroombanen en reistijden naar de winning Kruisland

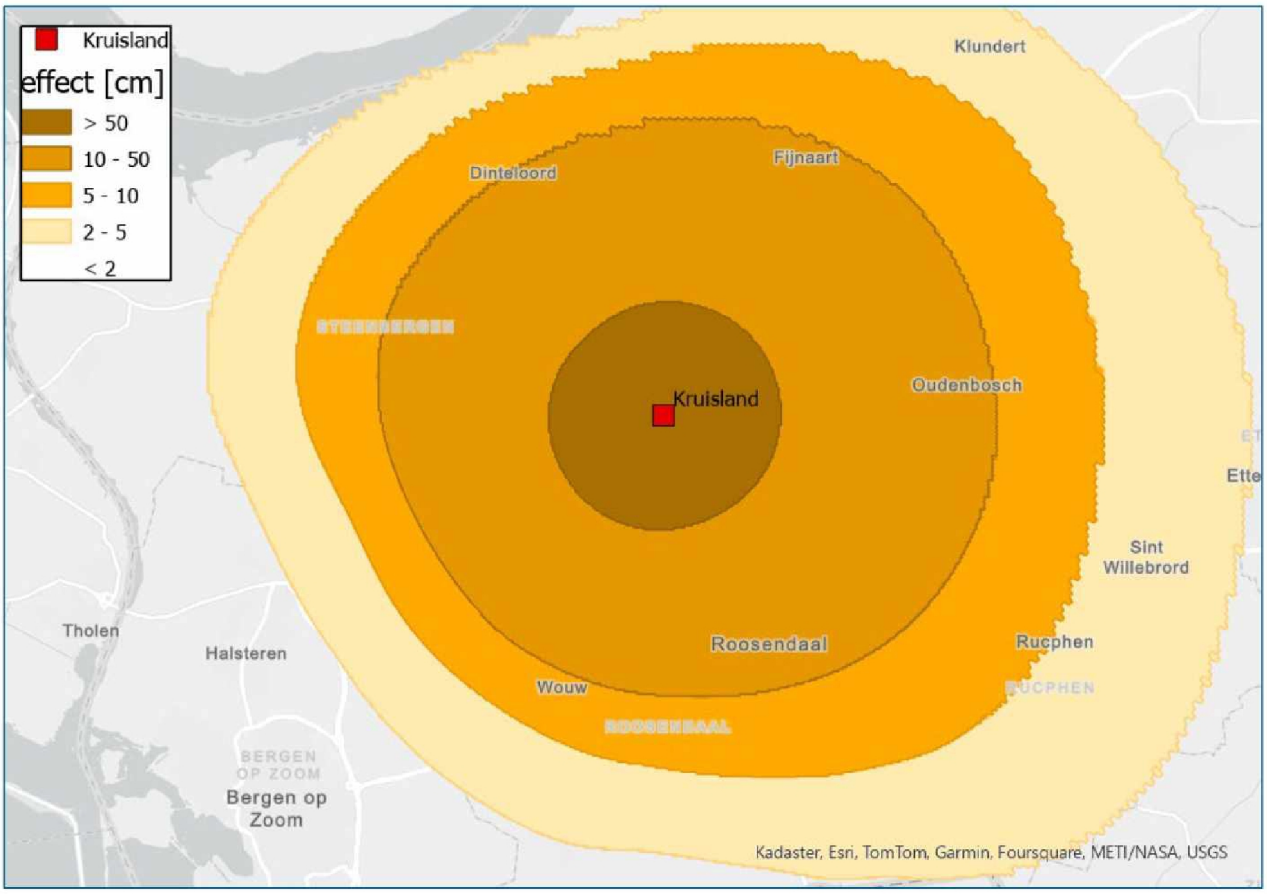
8 Berekende effecten grondwaterwinning Kruisland

8.1 Inleiding

Met het grondwatermodel is berekend wat de effecten zijn van de voorgenomen grondwaterwinning in Kruisland. Dit betekent een jaarlijkse grondwaterwinning van 3,5 miljoen m^3 uit het watervoerende pakket van de Formatie van Oosterhout uit 10 winputten. Voor een optimaal inzicht worden berekende effecten tot 2 cm getoond. Effecten kleiner dan 5 cm worden vaak als niet significant gezien.

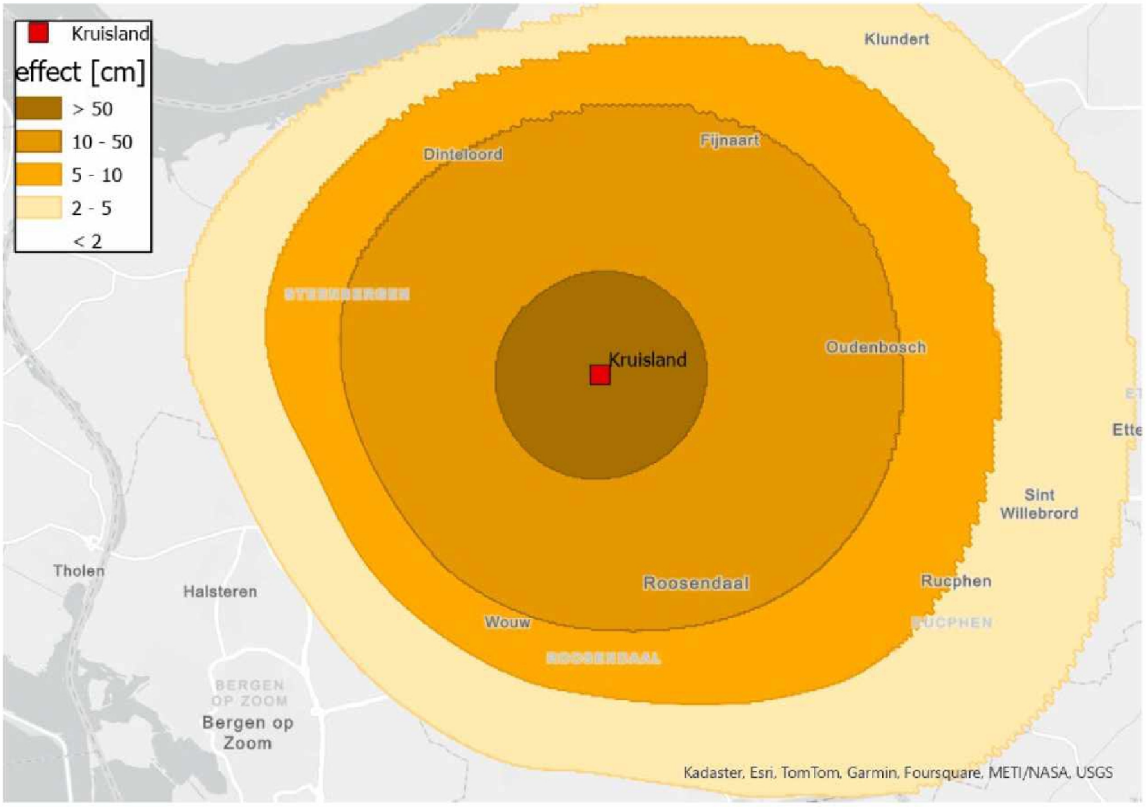
8.2 Gemiddelde verandering in stijghoogten

Door het onttrekken van grondwater daalt de stijghoogte in het bepompte pakket (Formatie van Oosterhout) in een groot gebied rond Kruisland (Figuur 8-1). Uitstraling van de winning wordt in noordelijke richting gedempt door de aanwezigheid van de grote rivieren. In deze paragraaf worden de gemiddelde veranderingen in het jaar gepresenteerd, het stationaire effect. Effecten op de grondwaterstand verschillen voor een zomer- en wintersituatie. Later in dit hoofdstuk bij de beschrijving van effecten op landbouw en beekafvoer wordt dit onderscheid wel gemaakt.

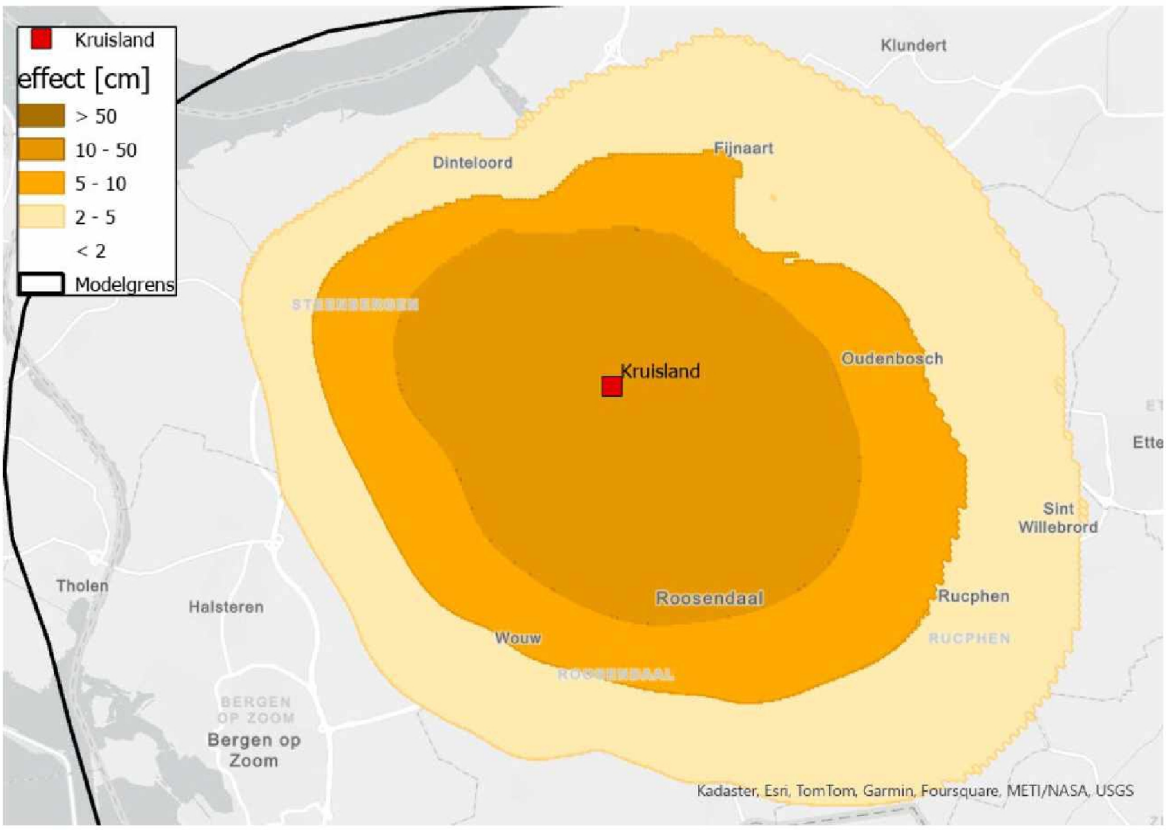


Figuur 8-1: Gemiddeld berekende verlaging in stijghoogte van winning Kruisland in de Formatie van Oosterhout (bepompt pakket)

De effecten van de winning in het bepompte pakket stralen uit naar boven- en onderliggende watervoerende pakketten. Er is nauwelijks weerstand aanwezig tussen de Formatie van Oosterhout en het onderliggende watervoerende pakket van de Formatie van Breda. De verlaging in de Formatie van Breda (Figuur 8-2) is daarom ongeveer hetzelfde als het bepompte pakket (Figuur 8-1; bepompt pakket).

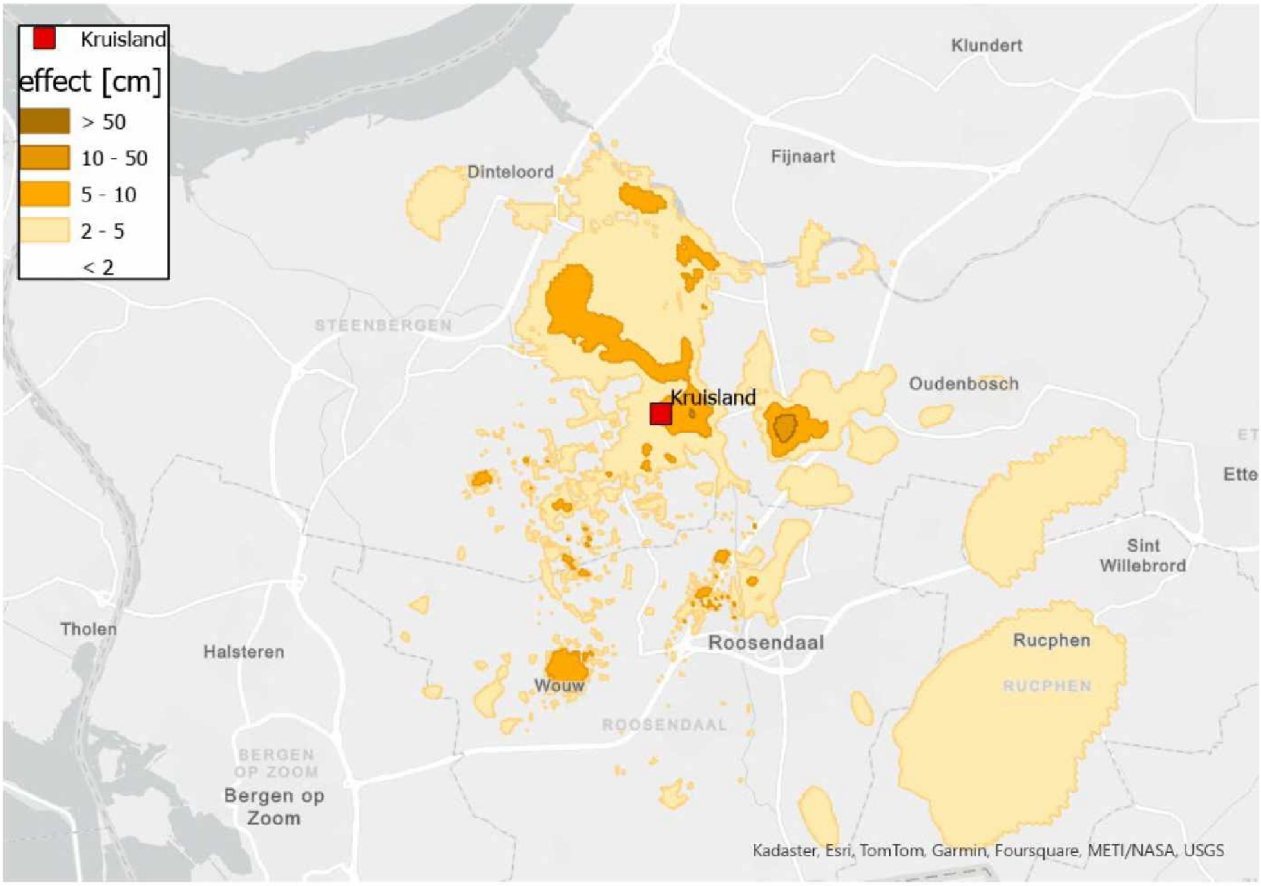


Figuur 8-2: Gemiddeld berekende verlaging in stijghoogte van winning Kruisland in de Formatie van Breda



Figuur 8-3: Gemiddeld berekende verlaging in stijghoogte van winning Kruisland in de Formatie van Maassluis

De verlagingen in het bepompte pakket werken ook door naar boven. De weerstand van de Oosterhoutklei is beperkt zodat de verlagingen nog aanzienlijk zijn in de Formatie van Maassluis (Figuur 8-3). De kleilagen in de Waalreformatie zorgen voor verdere demping van effecten in stijghoogten in de Formatie van Peize-Waalre (Figuur 8-4).



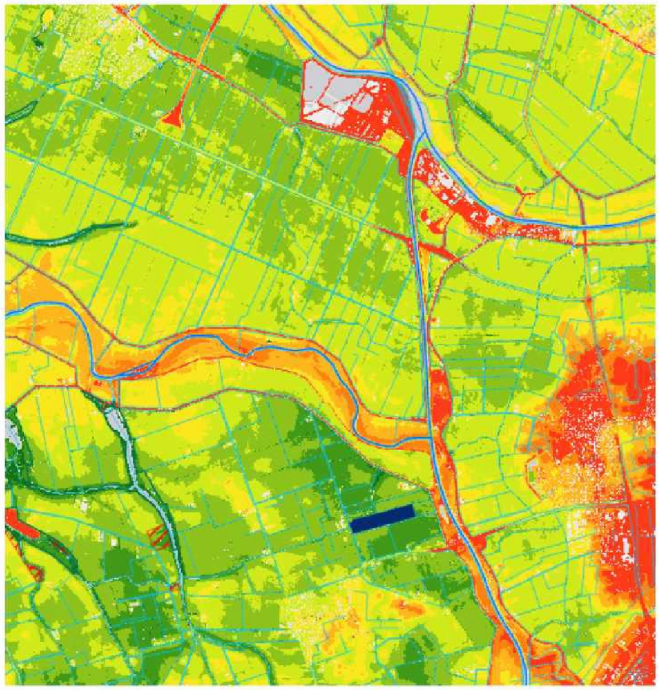
Figuur 8-4: Gemiddeld berekende verlaging in stijghoogte van winning Kruisland in de Formatie van Peize-Waalre

8.3 Veranderingen in grondwaterstand

Effecten van verlagingen in stijghoogte, zoals beschreven in de vorige paragraaf, werken door tot aan het maaiveld. De Waalreklei tussen de bovenste bodemlagen en de Peize-Waalre Formatie zorgt voor verdere demping van effecten. Verlagingen in freatische grondwaterstanden (modellaag 1) zijn daarom lager dan de berekende verlagingen in de Formatie van Peize-Waalre (Figuur 8-4).

Naast de scheidende lagen heeft ook het oppervlaktewatersysteem een dempende werking op de verlaging in grondwaterstanden. De verlaging in grondwaterstand verschilt daarom per seizoen. In deze paragraaf wordt de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG), Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) en de Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand (GVG) getoond in Figuur 8-6, Figuur 8-7 en Figuur 8-8).

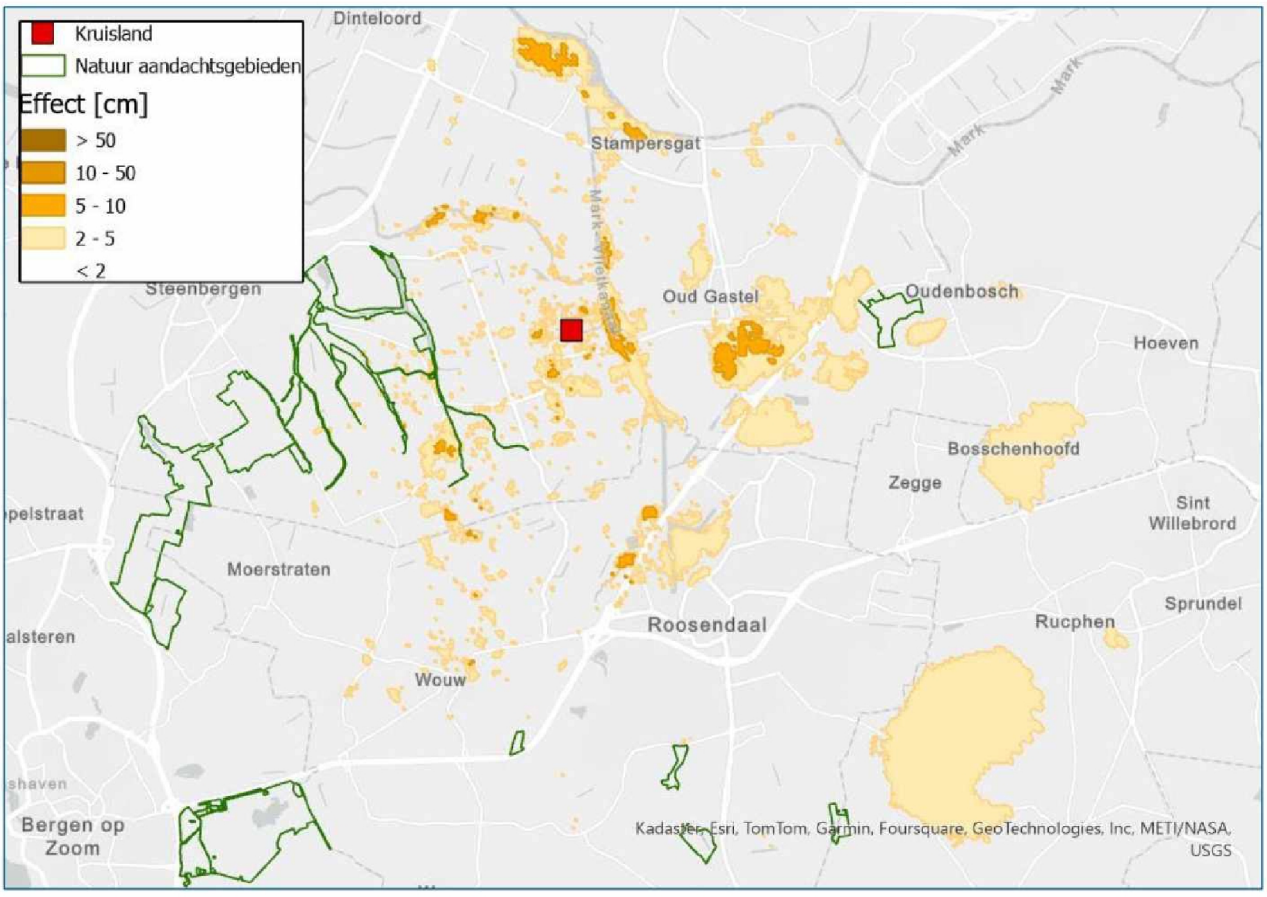
Het effect op de GLG is groter dan op de GHG en GVG, omdat er in de zomer minder drainage actief is, zowel buisdrainage als drainage door waterlopen. Drainage zorgt voor een demping in het effect op verandering in grondwaterstand. Bij een verlaging in grondwaterstand wordt dit effect namelijk deels gecompenseerd door minder afvoer van drainagewater en deels door een daling in grondwaterstand. Dit is de reden dat de grondwaterstandsdalingen minder groot zijn in de omgeving van oppervlaktewater. Rondom de waterlopen direct ten noorden en oosten van Kruisland, zoals de Dintel en de Cruijslandse Kreken, is de daling in grondwaterstand 5 tot 10 cm. Dit geldt ook voor een zone ten zuiden van Oud-Gastel en ten noorden van Wouw. Dit zijn grondwaterstandsdalingen op wat hoger gelegen gronden dicht in de buurt van het oppervlaktewater zoals stroomruggen en dijken (Figuur 8-5). In deze gebieden zijn er minder slootjes die voor drainage kunnen zorgen. Daarom kunnen grondwaterstanden hier meer wegzakken ten gevolge van de winning Kruisland.



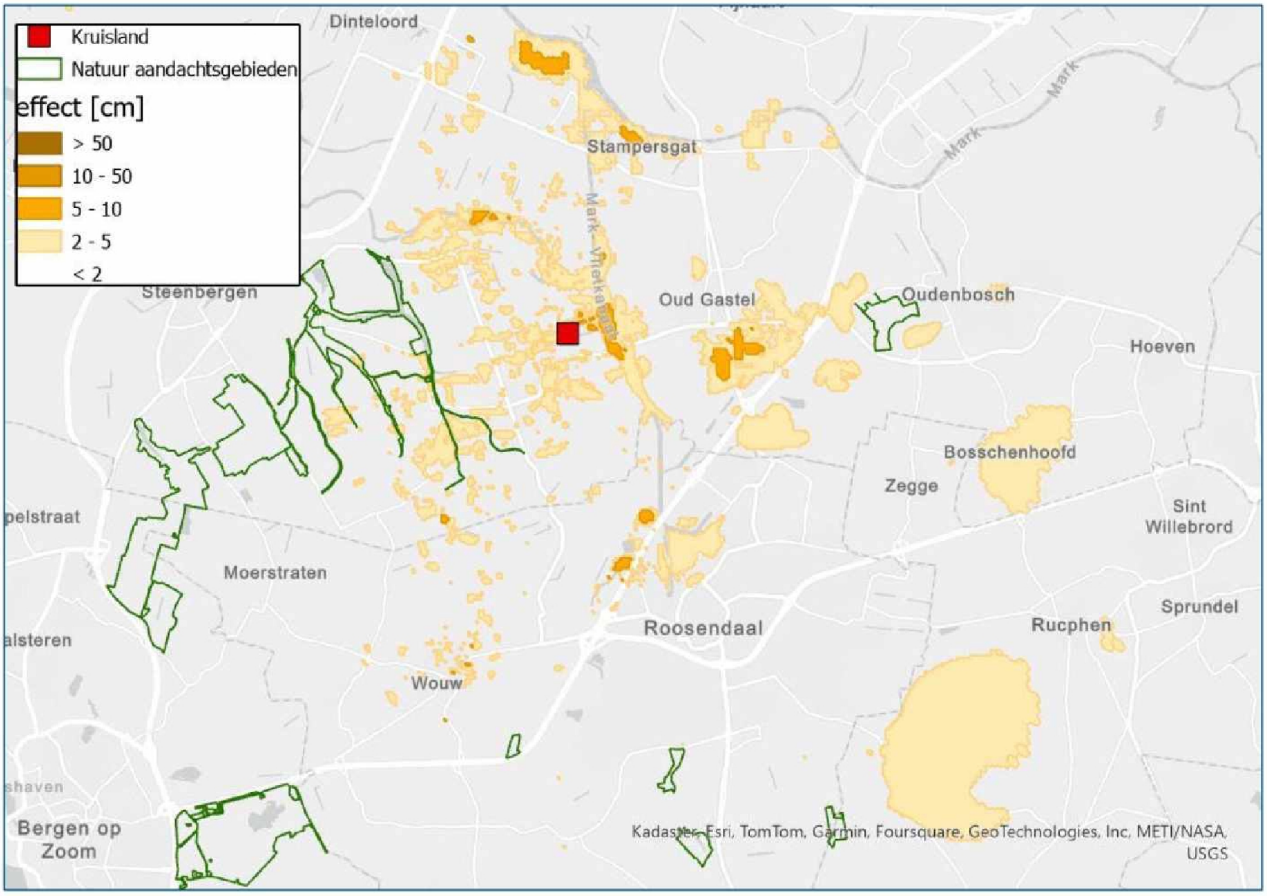
Figuur 8-5: Hoogteligging van maaiveld rond de waterlopen. Langs het Markvlietkanaal, de Steenbergse Vliet en de Dintel liggen hogere gronden (herkenbaar aan de oranje en rode kleuren)

De daling in GHG en GVG is vaak kleiner dan 5 cm. Het effect op de GLG is groter omdat er in de zomer minder drainagesystemen actief zijn; daardoor worden effecten minder gedempt. Dit gebeurt ook in het peilgestuurde gebied.

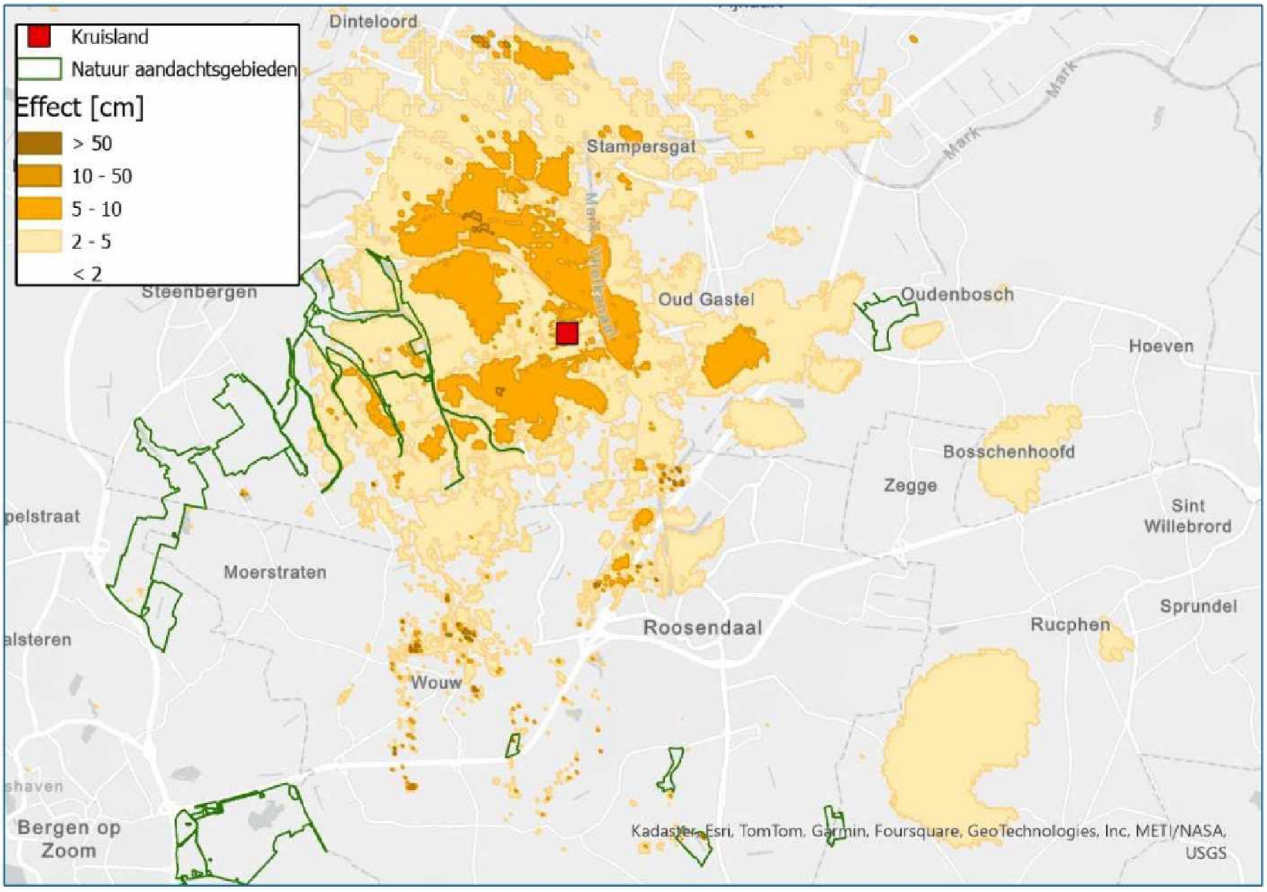
Slootjes blijven hier watervoerend, maar zijn onvoldoende in staat om het grondwater aan te vullen. Rondom de waterlopen direct ten noorden en oosten van Kruisland, zoals de Dintel en de Cruijslandse Kreken, is de daling in GLG 5 tot 10 cm. Dit geldt ook voor een zone ten zuiden van Oud-Gastel en ten noorden van Wouw.



Figuur 8-6: Berekend effect van winning Kruisland op de GHG



Figuur 8-7: Berekend effect van winning Kruisland op de GVG



Figuur 8-8: Berekend effect van winning Kruisland op de GLG

De verlagingen in grondwaterstand komen voor in een vlekkerig patroon. Verlagingen zijn groter op de hoger gelegen locaties, de infiltratiegebieden en gebieden waar de grondwateraanvulling lager is als gevolg van bebouwing (verhard oppervlak) of bebossing (grotere verdamping). De zuidoosthoek bij de bossen bij Rucphen (groot hooggelegen bosgebied voornamelijk naaldhout) en de zuidwesthoek bij de dorpskernen van Heerle, Wouw en Moerstraten zijn hier voorbeelden van.

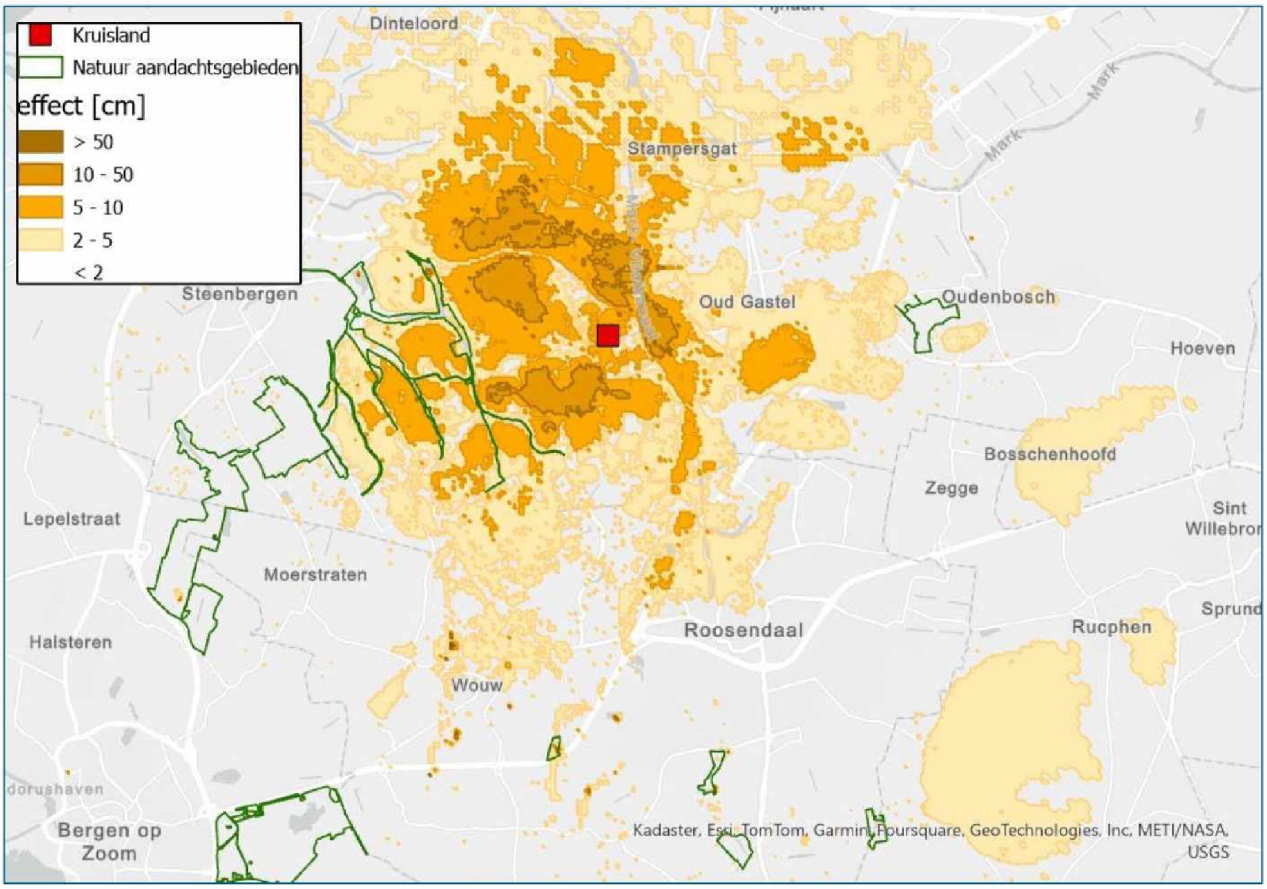
De effecten zijn dus groter in hoger gelegen en verharde gebieden. In gebieden met oppervlaktewater wordt een deel van het effect gecompenseerd door minder drainage door het oppervlaktewater. De effecten rondom de Dintel en Cruijslandse kreken zijn gelegen rond de hogere dekzandruggen rondom deze waterlopen.

In de overige natuurgebieden zijn de effecten in grondwaterstand beperkt. Het MER hoofdrapport gaat in meer detail in op de effecten op de natuurgebieden.

Effect in droge zomers

De verwachting is dat door klimaatverandering de zomers droger worden (KNMI, 2023). De verlagingen in grondwaterstand van de winning Kruisland zullen dan groter zijn, ook al wordt er dezelfde hoeveelheid van gemiddeld 3,5 miljoen m^3 grondwater per jaar onttrokken. Door het gecombineerde effect van minder neerslag, meer verdamping en meer onttrekking in de omgeving voor beregening van landbouwgewassen zullen de grondwaterstanden verder dalen.

Om het potentieel effect van klimaatverandering in beeld te brengen is de situatie van 2018 als voorbeeld doorgerekend. Het betreft een extreem voorbeeld, ook in geval van klimaatverandering, zal een gemiddelde zomer in 2050 of 2080 niet zo extreem droog zijn als in 2018. In geval van sterke klimaatverandering is een gemiddelde zomer in 2100 vergelijkbaar met de zomer van 2018 (KNMI, 2023). Eerst is de werkelijke situatie van 2018 doorgerekend, dat wil zeggen met de hoeveelheid neerslag, verdamping en onttrekking bekend voor dit jaar. Vervolgens is doorgerekend wat het effect is van een winning van 3,5 miljoen m^3 grondwater per jaar. De berekende veranderingen in grondwaterstand zijn dan groter (Figuur 8-9) dan voor een gemiddelde zomer (Figuur 8-8, de GLG situatie).

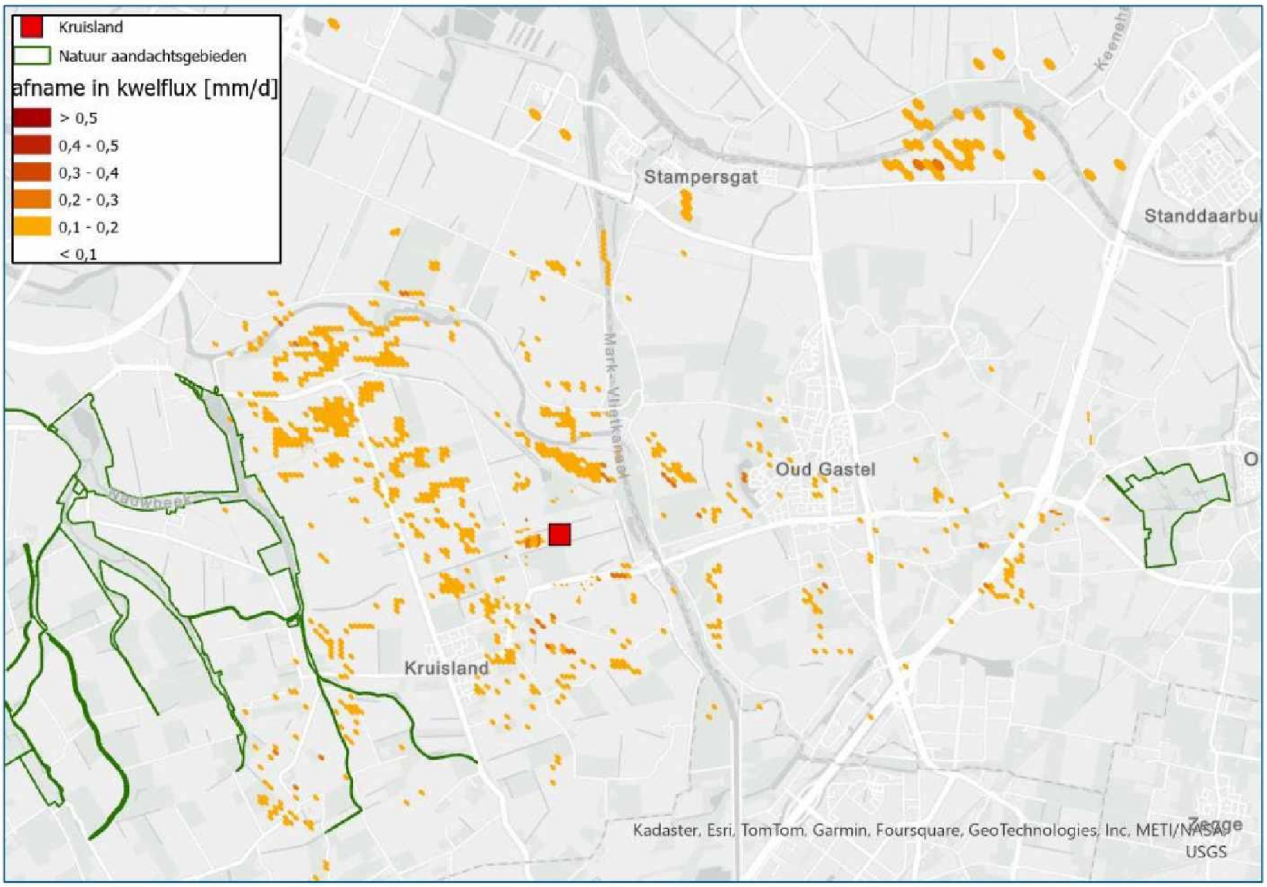


Figuur 8-9: Berekend effect van winning Kruisland in zomer 2018

8.4 Verandering in kwel (opwaartse grondwaterstroming)

De kwel is gedefinieerd als de opwaartse stroming van grondwater over de scheidende laag onder het niveau van de waterlopen/drains. In het grondwatermodel wordt dit berekend door de flux te berekenen over de scheidende laag net onder het slootniveau.

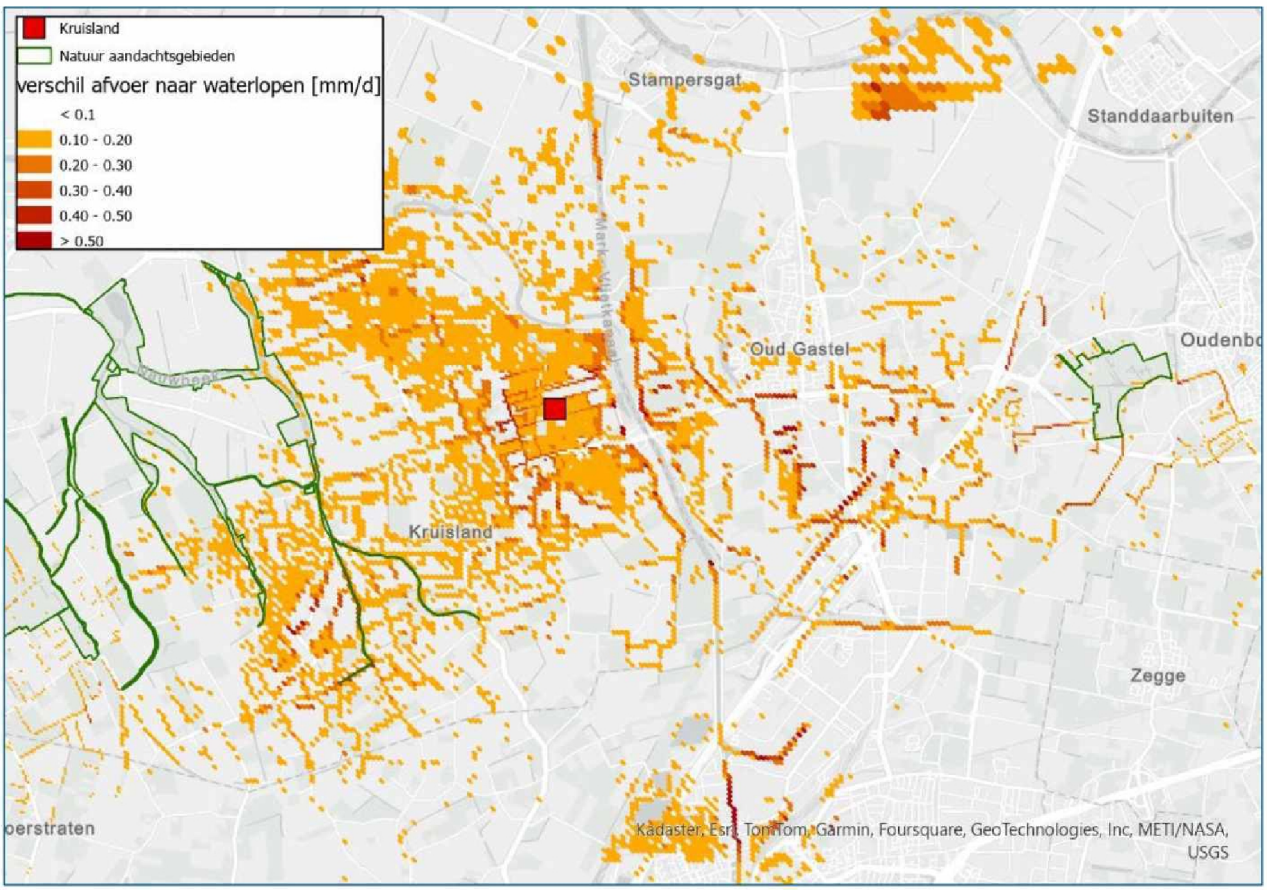
Door de onttrekking Kruisland neemt de infiltratie toe en neemt de kwel af. De effecten op natuur zijn het grootst op de locaties waar nu kwel voorkomt en waar de kwel afneemt. Daarom is op Figuur 8-10 alleen weergegeven waar en hoeveel de kwel afneemt in de bestaande kwelgebieden. De afname in kwel is erg beperkt, altijd kleiner dan 0,2 mm/d (Figuur 8-10). Deze veranderingen vinden plaats rond Kruisland, in de natuurgebieden is de afname in kwel kleiner dan 0,1 mm/d.



Figuur 8-10: Berekend effect op gemiddelde verandering in kwelstroming ten gevolge van de winning Kruisland

8.5 Afvoer naar de waterlopen en drains

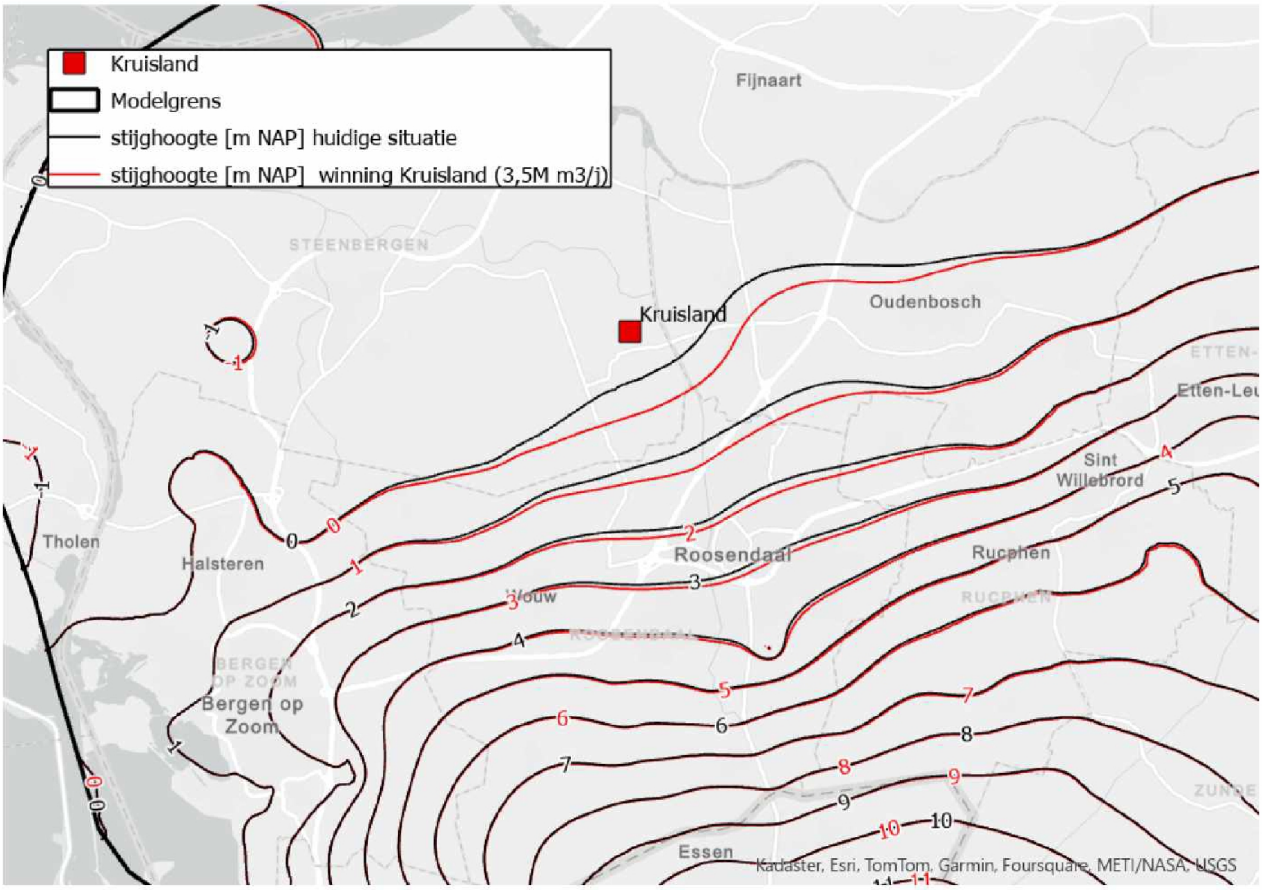
Door de waterlopen wordt zowel kwel als neerslagwater afgevoerd. De mate waarin de totaal berekende drainage naar de waterlopen en drains verandert, is weergegeven in Figuur 8-11. De verminderde drainage veroorzaakt een vermindering van de afvoer van water. Er is met name rondom de winning Kruisland een verschil in afvoer te zien. In de beschouwde natuurgebieden is er sprake van een klein effect, tot maximaal 0,1 tot 0,2 mm/d. Dit komt omdat de natuurgebieden verder weg liggen.



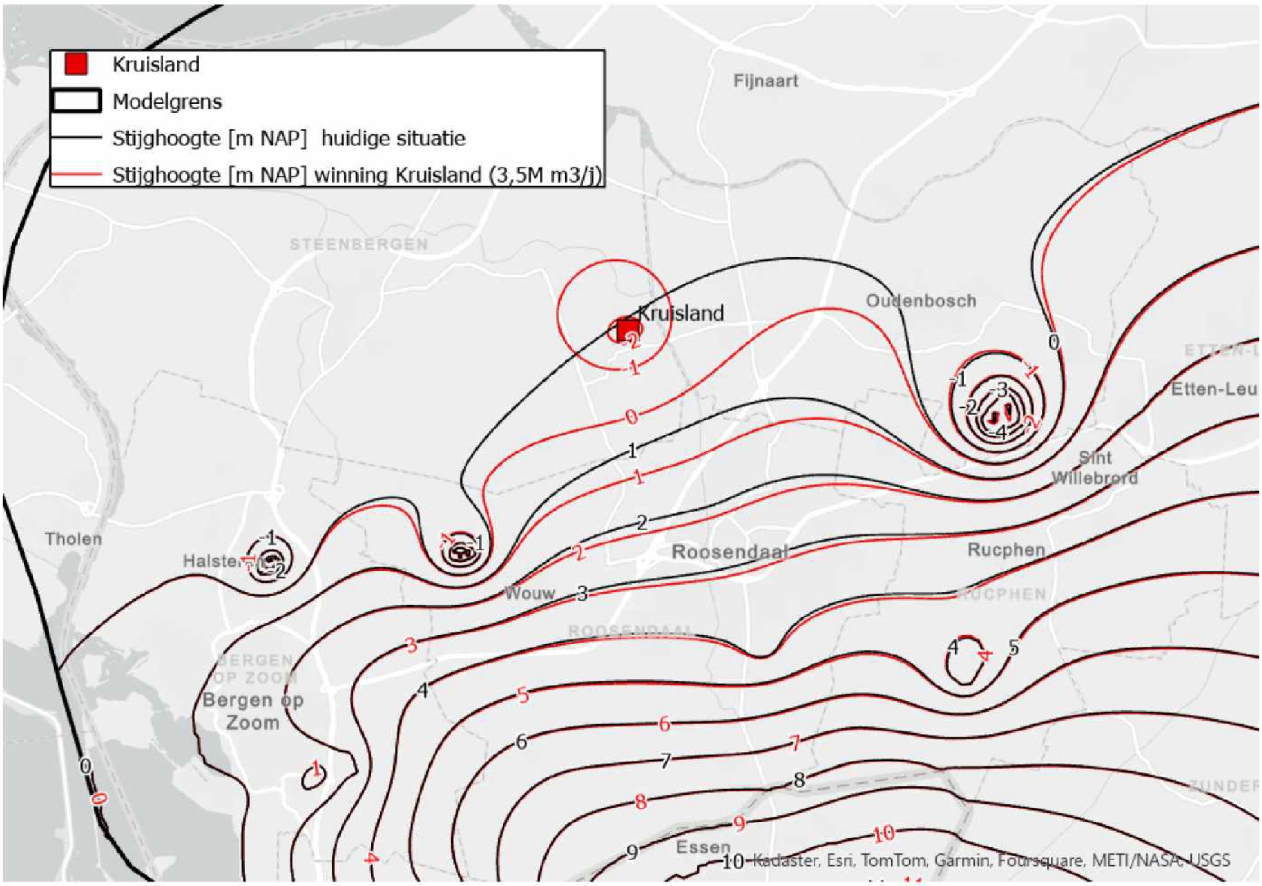
Figuur 8-11: Effect op de berekende afvoer naar de waterlopen

8.6 Berekende verandering in stromingsrichting

Door het onttrekken van grondwater in Kruisland worden de stijghoogten rond de winning verlaagd en verandert het stromingspatroon. Deze veranderingen zijn echter lokaal. Op regionale schaal verandert er weinig aan de grootte en richting van de stroming (Figuur 8-12 en Figuur 8-13). In rood zijn de isohypsen getekend in de situatie met een nieuwe winning, in zwart is de huidige situatie weergegeven. Zowel de veranderingen in het bepompte pakket, de Formatie van Oosterhout (Figuur 8-13), als het pakket hierboven, de Formatie van Maassluis (Figuur 8-12), blijven beperkt tot een klein gebied rond Kruisland.



Figuur 8-12: Isohypsen in een gemiddelde situatie in modellaag 16, Formatie van Maassluis (waardes in m NAP)



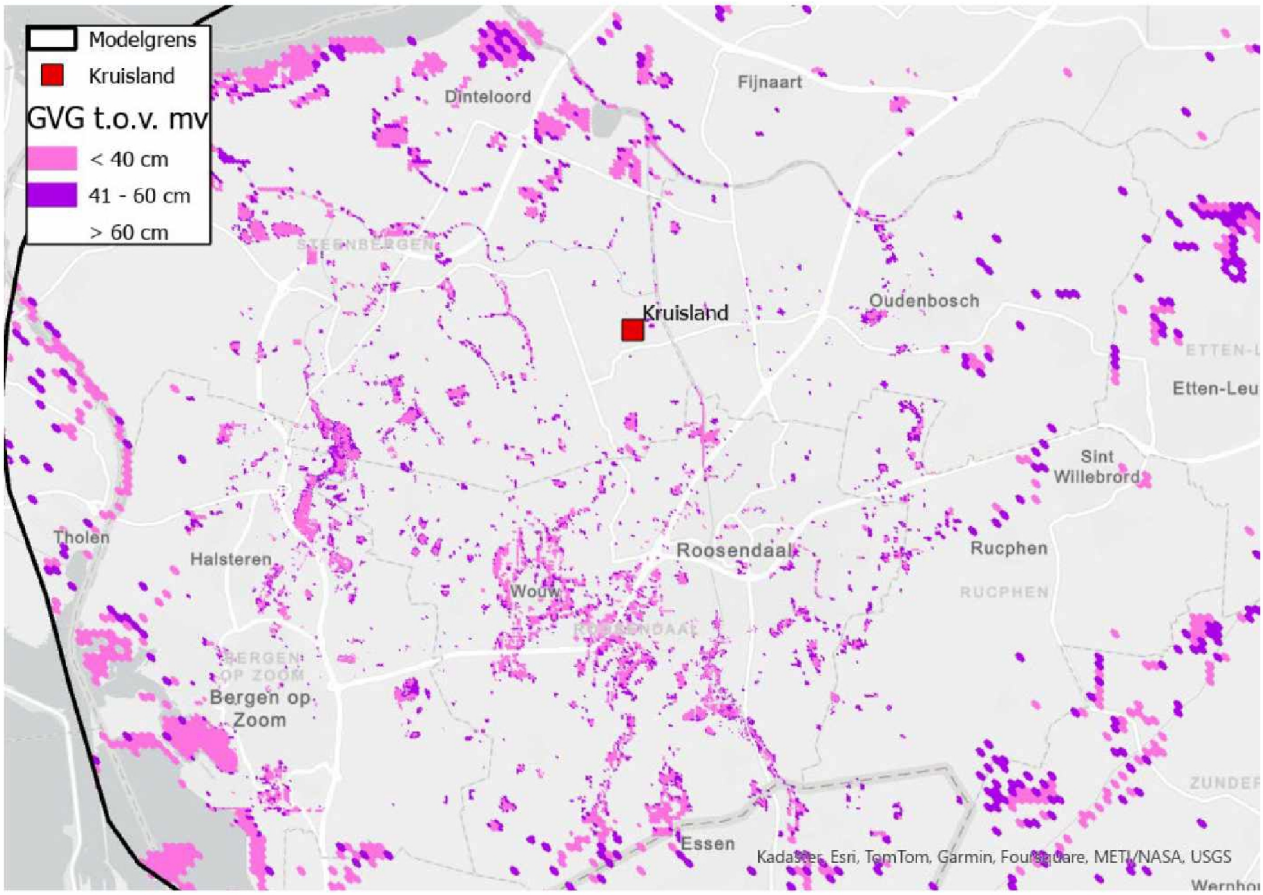
Figuur 8-13: Isohypsen in een gemiddelde situatie in modellaag 19, bepompt pakket (waardes in m NAP)

8.7 Effecten op landbouw

De effecten op landbouw zijn geanalyseerd door de locaties in beeld te brengen waar nat- en droogteschade is te verwachten in de huidige situatie. Vervolgens is geanalyseerd waar en hoeveel dit verandert in een situatie met een winning van 3,5 miljoen m^3/jaar in Kruisland.

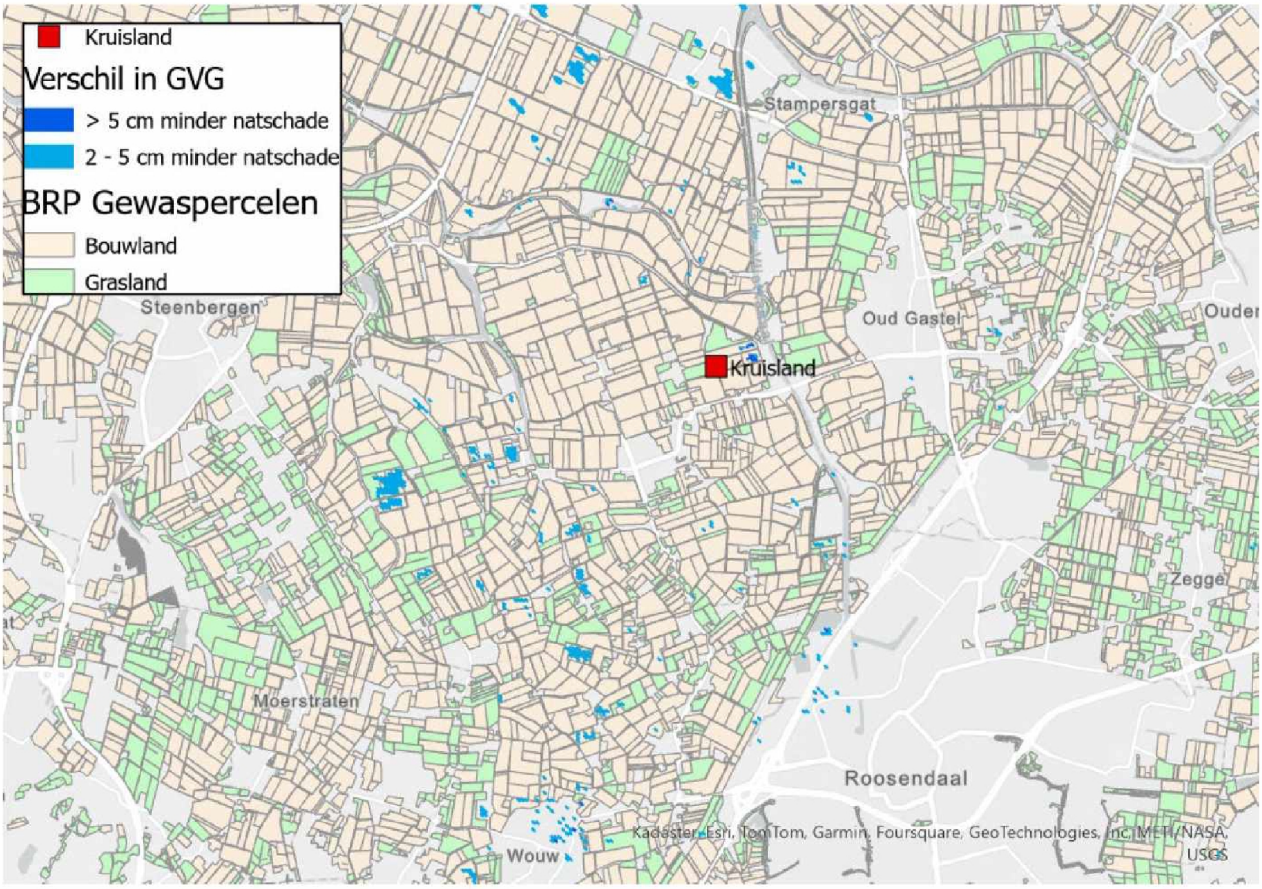
8.7.1 Natschade

Er is uitgegaan van natschade bij grasland als de berekende GVG hoger is dan 40 cm ten opzichte van het maaiveld, voor bouwland is dit 60 cm (RIZA, 1997). In Figuur 8-14 is weergegeven waar er in de huidige situatie een GVG wordt berekend die ondieper is dan 40 en 60 cm beneden het maaiveld. De figuur geeft geen onderscheid in landgebruik. In de praktijk kan namelijk het gebruik van grasland naar bouwland veranderen of omgekeerd. De meest natte gebieden liggen in de beekdalen en langs de kreken en overige waterlopen. In de directe omgeving van Kruisland liggen geen gebieden met erg hoge grondwaterstanden in het voorjaar.



Figuur 8-14: Gebieden waar de Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand (GVG) hoger dan 40 cm onder maaiveld ligt in de huidige situatie. Landbouw kan hier natschade ondervinden

Door de winning Kruisland zal de GVG dalen. In Figuur 8-15 is weergegeven waar vermindering in natschade te verwachten is. Dit zijn locaties waar in de huidige situatie de GVG ondieper is dan 60 cm beneden maaiveld en waar de GVG kan stijgen. Het betreft slechts enkele kleine locaties. Vanwege het beperkte effect is ook de interval tussen 2 en 5 cm grondwaterstandverandering weergegeven.

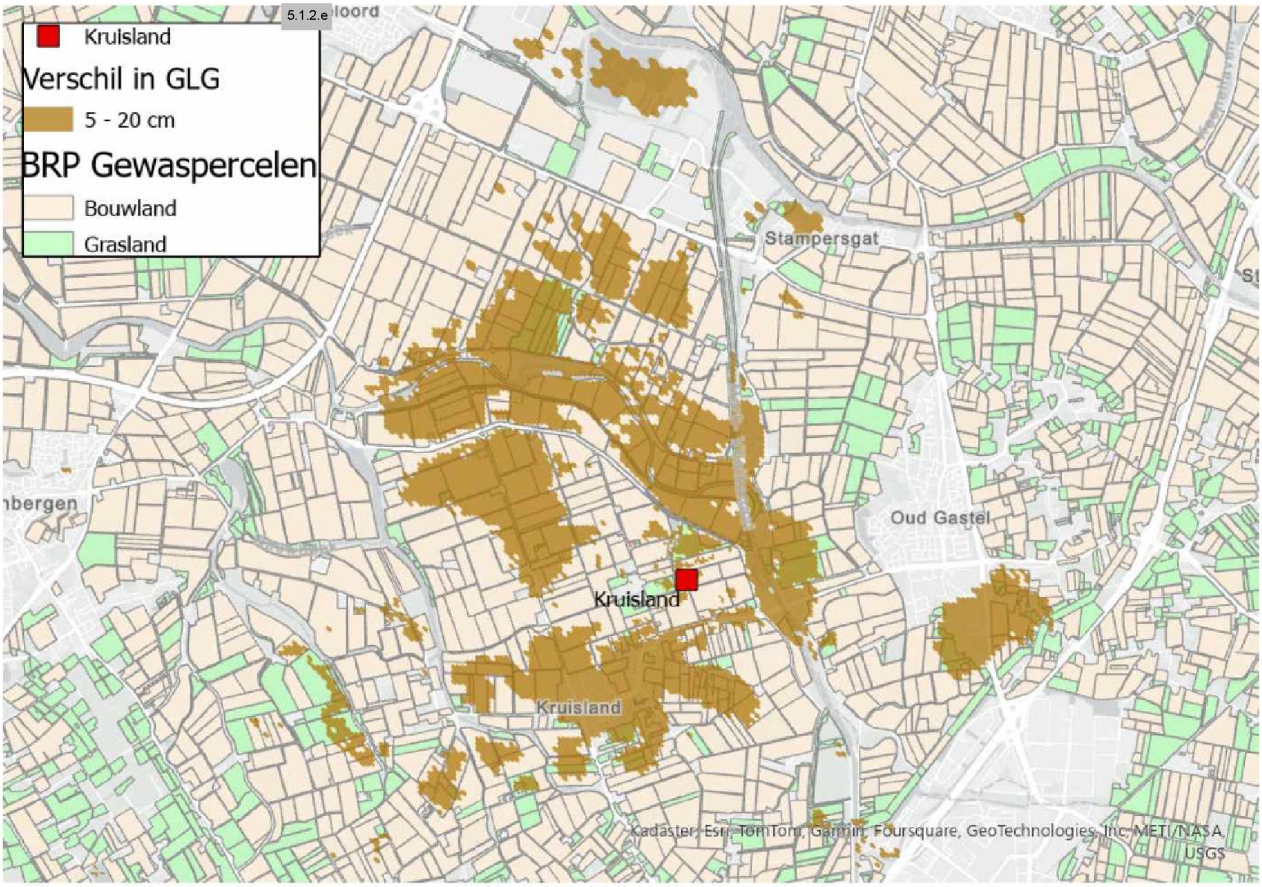


Figuur 8-15: Verschil in GVG ten gevolge van winning Kruisland in landbouwgebieden

8.7.2 Droogteschade

Er kan droogteschade optreden bij landbouwpercelen als de grondwaterstand te ver wegzakt. Wanneer er droogteschade optreedt wordt bepaald door de GLG en is sterk afhankelijk van de bodemsoort (RIZA, 1997). In dit hoofdstuk is een droogtecriterium aangehouden van een GLG van 90 cm beneden maaiveld (30 cm worteldiepte + 60 cm diepte capillaire opstijging). In de huidige situatie ligt de GLG bijna overal onder de 90 cm, deze kaart is daarom achterwege gelaten. Het huidige landbouwgebied van West-Brabant is namelijk aangepast voor de landbouw met diep ontwaterende sloten en de mogelijkheid om water te besproeien uit oppervlaktewater of grondwater als dit in de zomer nodig is. Dit maakt de landbouwgronden dus afhankelijk van beregening en daarom zijn deze potentieel droogtegevoelig.

Rond Kruisland ligt een gebied waar de GLG met meer dan 5 cm daalt (Figuur 8-16). Voor gebieden waar de grondwaterstand meer dan 5 cm daalt bestaat een droogteschaderegeling. Het uit te keren schadebedrag is afhankelijk van de precieze daling in grondwaterstand per jaar, de bodemsoort, het gewastype en de economische waarde van dit gewas per jaar. De precieze selectie van landbouwgebieden met droogteschade en bepaling van het schadebedrag wordt later uitgevoerd met meer gedetailleerde berekeningen.



Figuur 8-16: Gebied waar de GLG met meer dan 5 cm kan dalen ten gevolge van winning Kruisland

8.8 Effecten op aantrekken zout grondwater

Door de winning Kruisland verandert het stromingspatroon en bestaat er het risico dat er meer zout grondwater wordt aangetrokken.

Het is van belang voor de nieuwe grondwaterwinning te weten in hoeverre er zout water wordt aangetrokken. Daarnaast maken we het risico van verzilting van agrarische putten inzichtelijk in deze paragraaf.

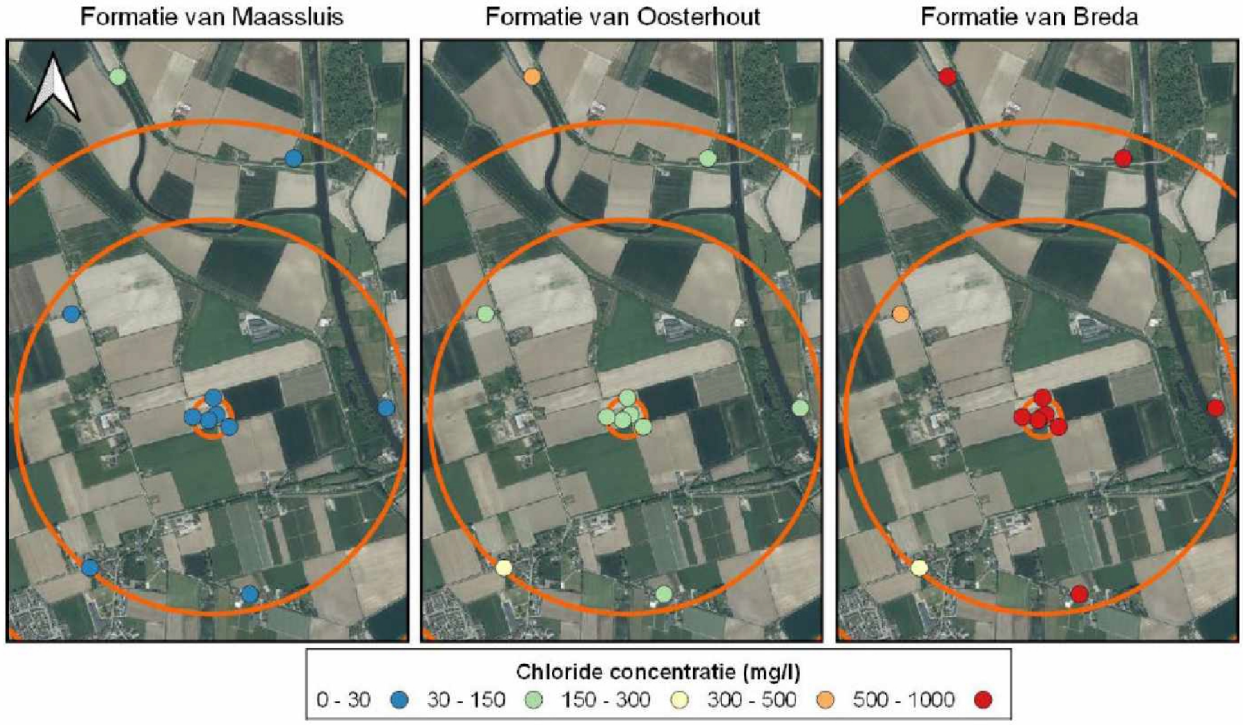
Risico op verzilten van de grondwaterwinning

De verwachte chlorideconcentraties zijn bepaald met stroombaanberekeningen uit het grondwatermodel. In paragraaf 7.3 zijn eerder de berekende stroombanen gepresenteerd. Met deze berekeningen is afgeleid wat de herkomst is van het toestromende grondwater per horizontale richting en per diepteniveau. Voor een periode van 2, 20, 100 en 1000 jaar is samengevat vanuit welke hoofdrichting en formatie het grondwater afkomstig is dat in de winning wordt opgepompt.

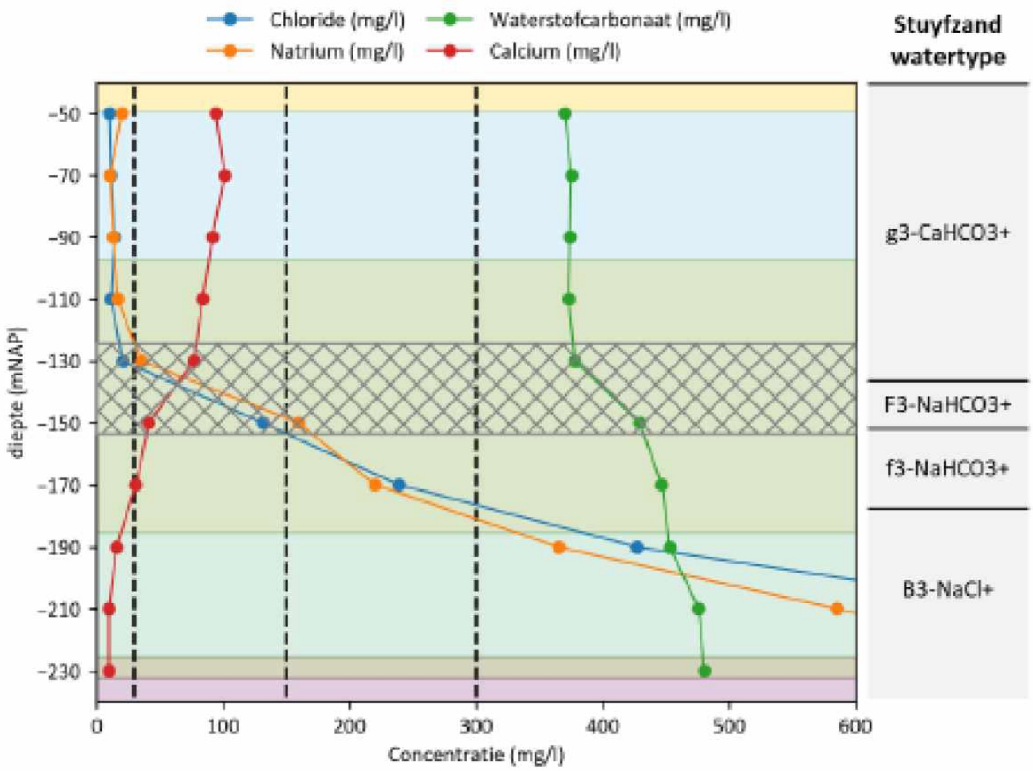
Uit aanvullend onderzoek is een beter beeld gekomen van de chloridegehaltes in de diepte. Tijdens de pompproef van een maand werd een zeer constante waterkwaliteit geproduceerd: het chloridegehalte in het onttrokken water lag voor de pompproef op 35 mg/l en na een maand onttrekking was deze vrijwel onveranderd (37 mg/l). Dit is logisch omdat het langer dan een maand tijd kost voordat grondwater van grotere diepte of grotere afstand kan toestromen.

Uit metingen van de grondwaterkwaliteit rondom de winning Kruisland komt het volgende beeld (KWR, 2023):

- Formatie van Maassluis: < 30 mg/l;
- Formatie van Oosterhout uit zuidelijke richting: 150-300 mg/l. Hier komt het meeste aanstromende grondwater vandaan. Naar de diepte is het grondwater zouter;
- Formatie van Oosterhout uit noordelijke richting: 15-300 mg/l, maar verder naar het noorden wordt het grondwater zouter: > 500 mg/l;
- Formatie van Breda, direct onder de put: 500 – 1000 mg/l.



Figuur 8-17: Gemiddeld gemeten chloride concentraties in waarnemingsfilters in de Formaties van Maassluis, Oosterhout en Breda. Oranje cirkels geven gelijke afstand tot de proefput weer van respectievelijk 1500, 1000 en 100 meter (Bron: KWR, 2023)



Figuur 8-18: Gemiddelde gemeten concentratie van chloride, calcium, HCO3 en natrium per diepte-interval van 20 m (links) en dominante Stuyfzand watertype per diepte interval (rechts) (Bron: KWR, 2023)

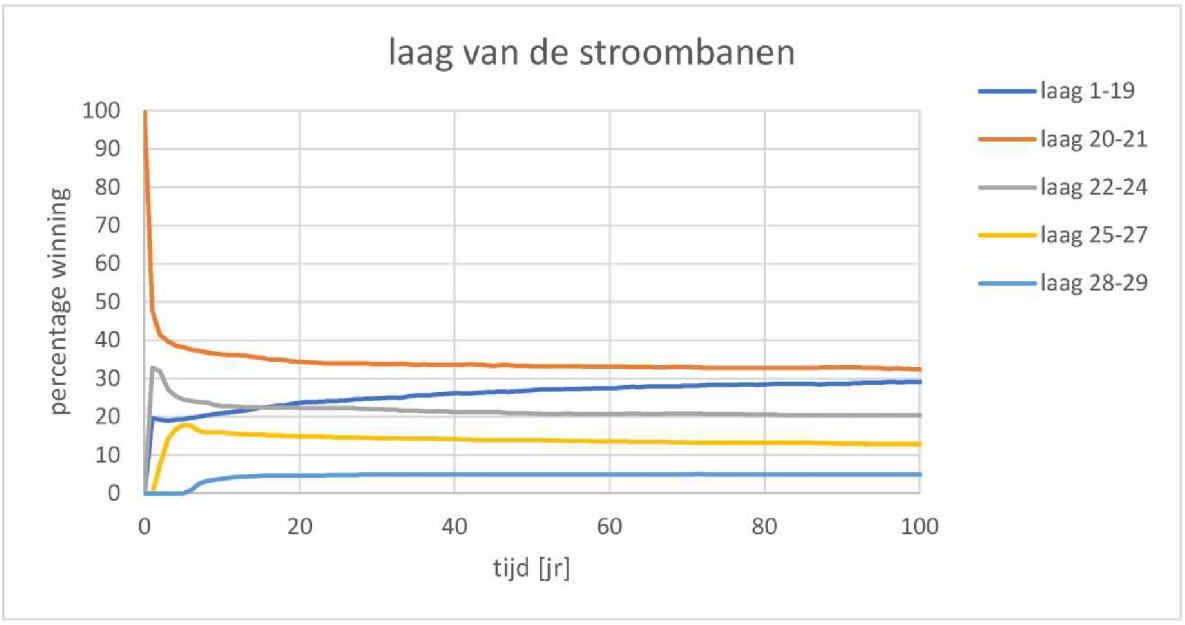
De gemeten concentraties chloride zijn gecombineerd met de herkomst van het water (Tabel 8-1). Op die manier kan een schatting worden gemaakt van de verwachte chlorideconcentraties op de langere termijn.

Tabel 8-1: Bepaald aandeel grondwater per diepteniveau en bijbehorende aangenomen chloride concentratie

Model laag	Diepteligging (in m NAP)		Formatie	Berekend aandeel van totaal onttrokken volume na 20 jaar (%)	Aangenomen chlorideconcentratie (mg/l) Ten zuiden van Kruisland	
	Boven	Onder			Ten zuiden van Kruisland	Ten noorden van Kruisland
1 - 16	0	93	Peize-Waalre, Maassluis	13	20	150
18 -19	103	123	Oosterhout	10	20	300
20 - 21	123	151	Oosterhout, bepompt	35	35	300
22 - 24	151	183	Oosterhout	22	220	500
25 - 27	183	213	Oosterhout	15	500	750
29	213	237	Breda	5	750	750

We hebben het aandeel van het toestromende water en de chlorideconcentraties hiervan bepaald voor zes diepteniveaus (Tabel 8-1). In deze tabel is het aandeel onttrokken grondwater weergegeven na 20 jaar, maar dit aandeel varieert in de tijd.

Het aandeel van het onttrokken volume water in de tijd is bepaald uit de stroombaan berekeningen (Figuur 8-19). Aan het begin van onttrekken, zoals in de pompproef, komt al het water uit het bepompte pakket (laag 20-21). De invloed van de Formatie van Breda is pas merkbaar na enkele jaren. En na 20 jaar wordt ongeveer een evenwichtssituatie bereikt, hierna verandert het aandeel water per laag niet veel meer. In werkelijkheid verandert het aandeel wel heel geleidelijk. Op termijn van duizenden jaren zal steeds meer water van bovenaf worden aangetrokken (niet zichtbaar in de grafiek) en zal het onttrokken grondwater steeds zoeter worden.



Figuur 8-19: Berekend aandeel van onttrokken volume grondwater per modellaag

De chlorideconcentraties zijn bepaald uit het KWR onderzoek (Figuur 8-17 en Figuur 8-18) en de wetenschap dat de chlorideconcentratie in het onttrokken grondwater van de pompproef gelijk aan 35 mg/l is.

De te verwachten concentratie in het onttrokken grondwater is berekend door de vracht chloride per laag en richting (noord/zuid) te sommeren en te delen door het totale volume toestromend grondwater. Uit deze berekeningen komt dat de chlorideconcentratie start met 35 mg/l en binnen 2 jaar stijgt tot 134 mg/l (Tabel 8-2). We hebben aangenomen dat aantrekking van meer brak water uit noordelijke richting pas na 100 jaar doorwerkt. Dit is de belangrijkste reden dat de chloride concentraties in het onttrokken grondwater nog stijgen na 20 jaar tot een niveau boven de 200 mg/l.

Tabel 8-2: Verwachte chlorideconcentratie in het onttrokken grondwater

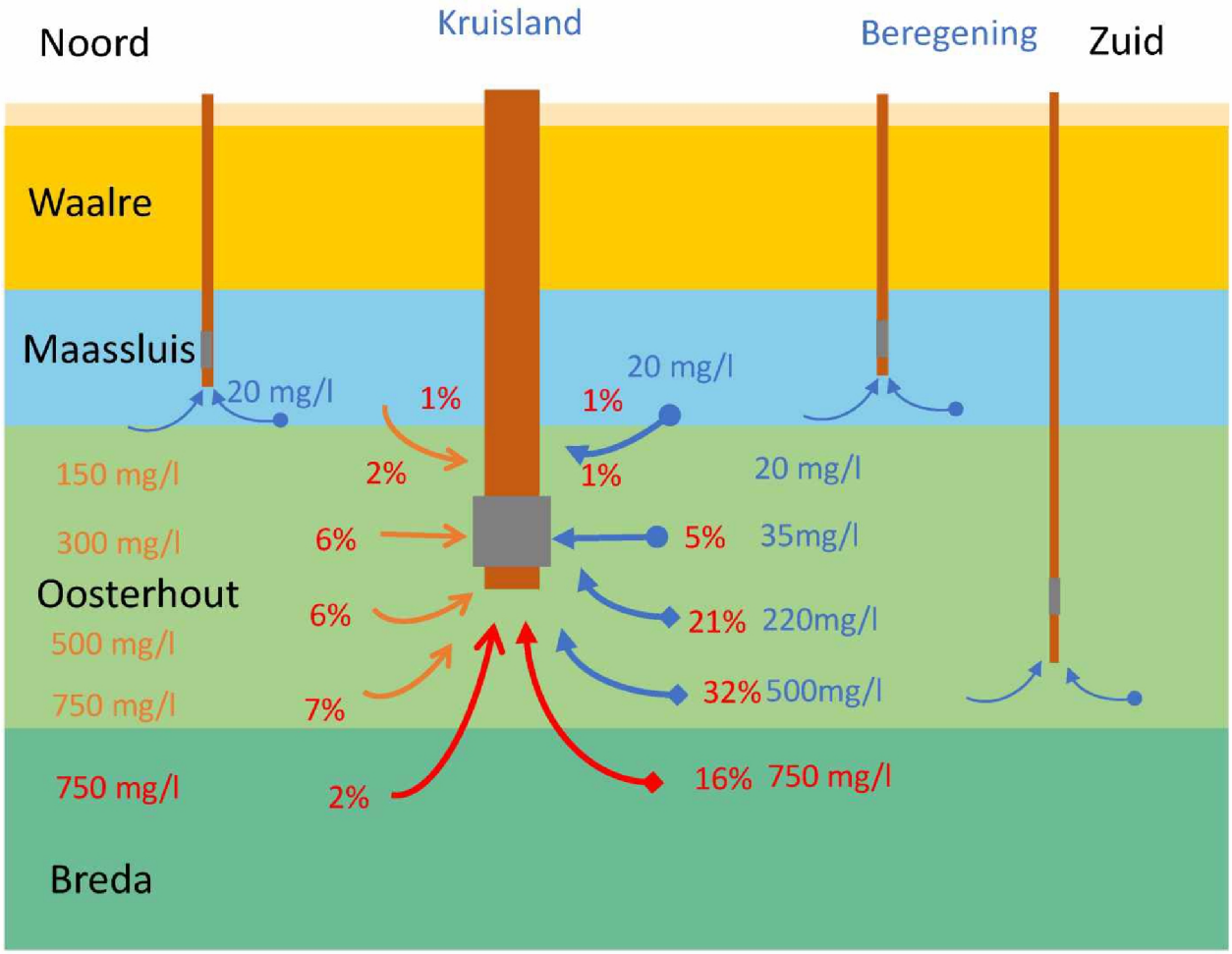
Periode	Verwachte chloride concentratie (mg/l)
1 maand	35
2 jaar	134
20 jaar	178
100 jaar	206

66% van de chloridevracht is afkomstig uit het onderste gedeelte van de Formatie van Oosterhout. De berekening is daarom vooral gevoelig voor de aanname die is gedaan voor de chlorideconcentraties in dit dieptebereik. We hebben aangenomen dat de chlorideconcentraties hier 220 tot 500 mg/l zijn (Tabel 8-3). In noordelijke richting kunnen de concentraties chloride nog hoger zijn, maar dit heeft minder invloed omdat er minder water uit noordelijke richting komt toestromen.

Tabel 8-3: Bepaald aandeel grondwater per diepteniveau en bijbehorende aangenomen chloride concentratie

Model laag	Diepteligging (in m NAP)		Formatie	Aandeel van de chloridevracht (%) per herkomstrichting (na 20 jaar)	
	Boven	Onder		Ten zuiden van Kruisland	Ten noorden van Kruisland
1 - 16	0	93	Peize-Waalre, Maassluis	1%	1%
18 -19	103	123	Oosterhout	1%	2%
20 - 21	123	151	Oosterhout, bepompt	5%	6%
22 - 24	151	183	Oosterhout	21%	6%
25 - 27	183	213	Oosterhout	32%	7%
29	213	237	Breda	16%	2%

De analyse wordt samengevat in 5.1.2.e Onzekerheid in de uitkomst zit vooral in het verloop van de chlorideconcentratie onder het bepompte pakket in de Formatie van Oosterhout (op diepte van 150 tot 200 meter onder maaiveld).



Figuur 8-20: Aandeel van de onttrokken zoutvracht (in %) door winning Kruisland (na 20 jaar) onderverdeeld naar zes diepteniveaus en toestromingsrichting noord en zuid op basis van de aangenomen chlorideconcentratie op dit diepteniveau

Invloed op onttrokken grondwater uit beregeningsputten

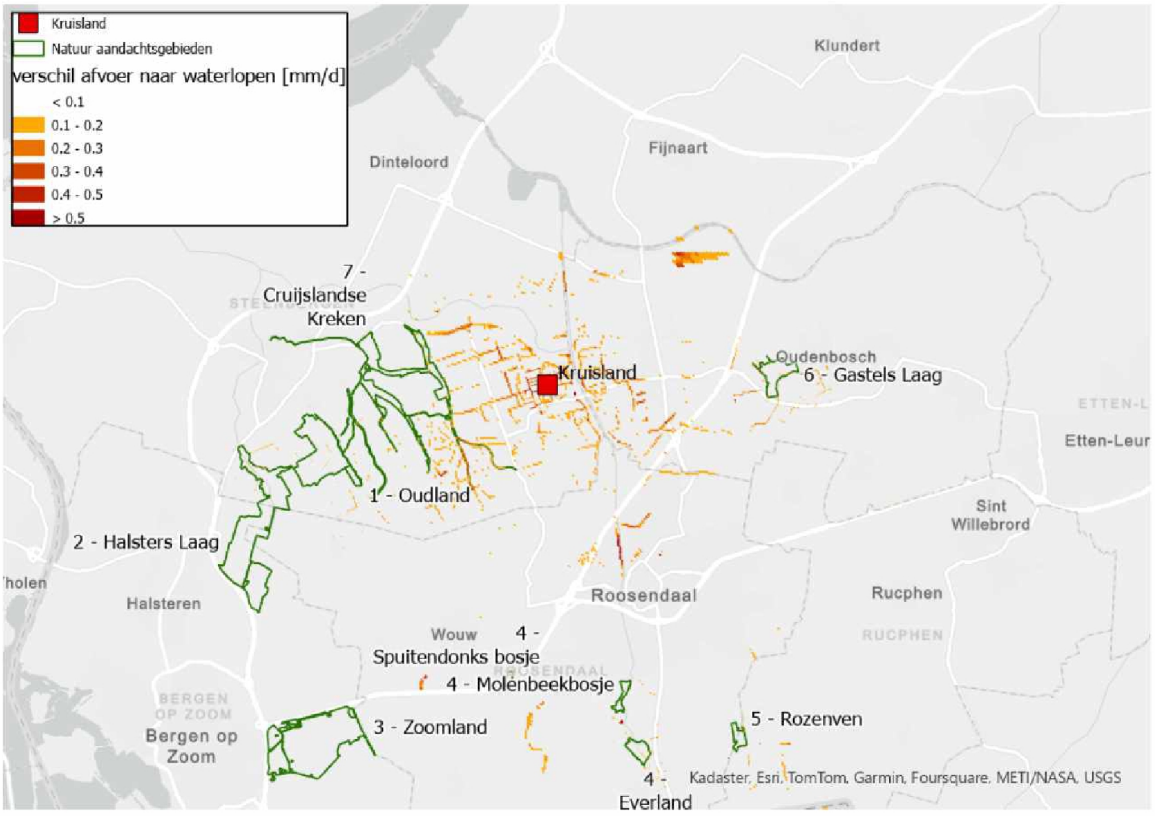
Grondwater voor beregening van gewassen wordt onttrokken uit beregeningsputten. Het huidige beleid is dat grondwater voor beregening niet dieper dan 80 meter mag worden onttrokken.

Maar agrariërs die een oudere vergunning hebben onttrekken soms wel van grotere diepte, omdat dit water van betere kwaliteit is (lagere natrium- en ijzerconcentraties). De diepte van deze putten is niet geregistreerd bij het waterschap en daarom onbekend. Door de nieuwe winning Kruisland wordt mogelijk water met verhoogde chlorideconcentraties naar boven aangetrokken. Dit water wordt onttrokken van ongeveer 125 tot 150 meter diepte onder maaiveld. Het zoute water kan niet hoger komen dan 125 meter omdat de winning ook (zoet)water van bovenaf aantrekt. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 8-20. Grondwaterputten met filters ondieper dan 125 meter lopen daarom geen risico op het aantrekken van extra brak grondwater.

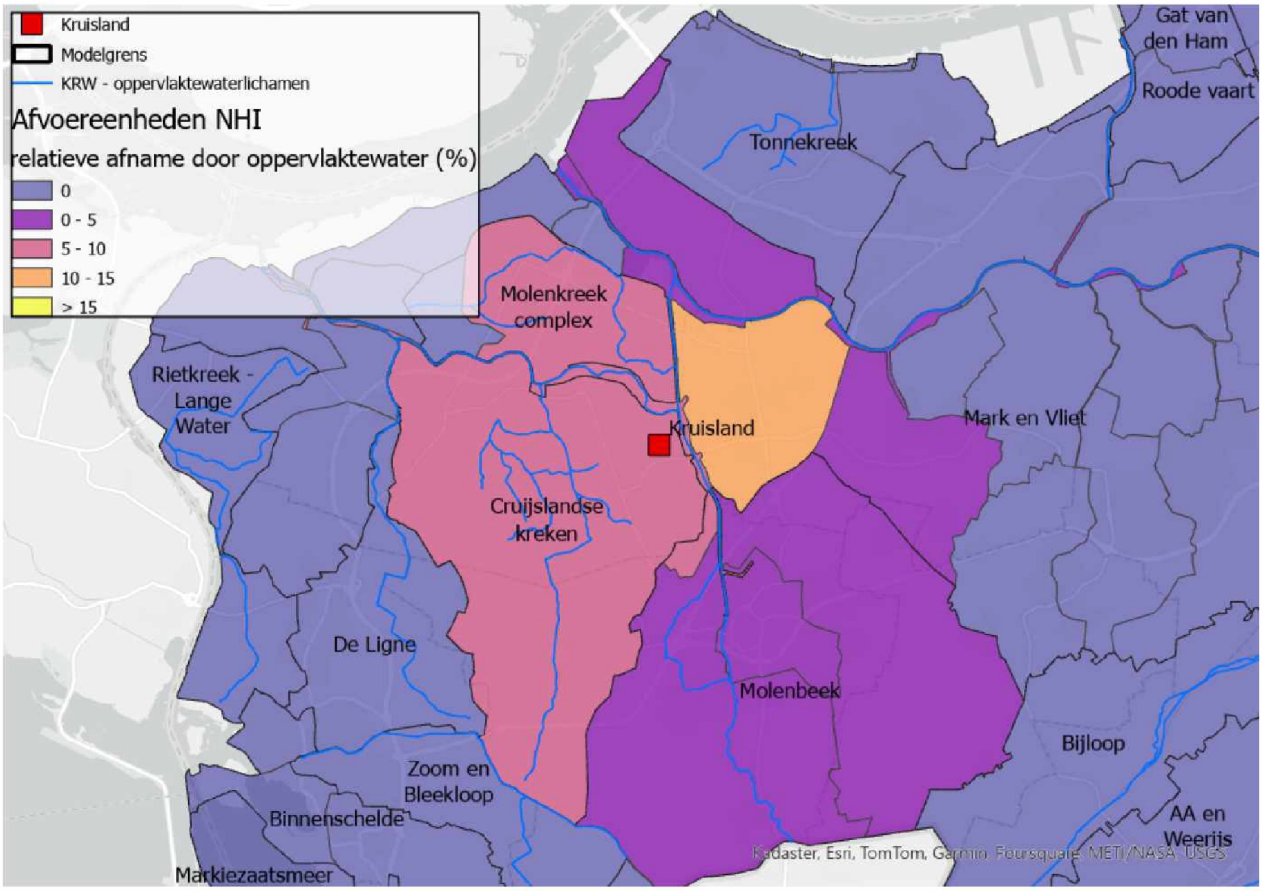
Beregeningsputten die dieper dan 125 meter staan kunnen mogelijk wel te maken krijgen met invloed van brak water. Echter als deze putten zo diep water onttrekken zal dit risico er ook zijn zonder winning Kruisland. Op deze diepte nemen de chlorideconcentraties al toe. Door de winning Kruisland zou dit risico nog wat groter kunnen worden voor putten die in de directe nabijheid staan van de winning Kruisland.

8.9 Effecten op beekafvoer

De grondwaterwinning Kruisland resulteert in lagere grondwaterstanden en daarmee minder drainage naar het oppervlaktewater ofwel minder afvoer via het oppervlaktewater. Het effect van winning Kruisland is eerder gepresenteerd in paragraaf 8.4 en weergegeven in Figuur 8-11. Voor de Europese Kaderrichtlijn Water gelden eisen ten aanzien van de doorstroming en waterdiepte van waterlopen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende typen KRW wateren. Voldoende waterstroming en waterdiepte zijn soms een knelpunt in het zomerhalfjaar; in de winter is er voldoende water en zijn de ecologische eisen minder streng. Daarom betrekken we in onze analyse de verandering in de afvoer van de hoofdwaterlopen voor de periode 1 april – 1 oktober. Rond de winning Kruisland neemt de afvoer naar de hoofdwaterlopen af. Verder weg, bijvoorbeeld ten zuiden van Roosendaal, zijn de veranderingen klein (Figuur 8-21).



Figuur 8-21: Berekend gemiddeld verschil [mm/d] in afvoer door de hoofdwaterlopen in de zomerperiode (1 april – 1 oktober)



Figuur 8-22: Berekende relatieve afname van afvoer per afvoereenheid in het zomerseizoen ten gevolge van winning Kruisland

In Figuur 8-22 is de afname in beekafvoer weergegeven per KRW deelstroomgebied. De stroomgebieden in donkerblauw hebben nauwelijks een effect in verandering in basisafvoer, deze worden buiten beschouwing gelaten.

Tabel 8-4: KRW waterlichamen rond Kruisland en eisen ten aanzien van de waterkwaliteit

KRW waterlichaam	Oppervlak (km^2)	Doel type	Watertype	Huidige toestand en KRW wensbeeld
Ligne	28,1	M10	Laagveen vaarten en kanalen	Het betreft een stagnant watertype waarvoor geen eisen gelden ten aanzien van de waterstroming (waterschap Brabantse Delta, 2017).
Cruijslandse kreken	29,2	M3	Gebufferde (regionale) kanalen	Het watersysteem is niet op orde, vooral vanwege waterkwaliteitsproblemen. Aan dit watertype zijn geen eisen gesteld aan stroming. Er wordt geadviseerd op het verhogen van de basisafvoer (Wi+Bo, 2018b).
Molenbeek	94	R5	Langzaam stromende middenloop/benedenloop op zand	Soms zeer lage stroomsnelheden (0 cm/s) in verschillende trajecten. Er is geen sprake meer van een stromend systeem, maar van een stagnant systeem (Wi+Bo, 2018a)
Markvlietkanaal en Roosendaalse Vliet				De huidige stroomsnelheid is zeer laag (0,01 – 0,1 m/s). Ecologisch is dit geen groot knelpunt. Kanaal wordt vooral voor scheepvaart gebruikt en heeft weinig ecologische waarde (Arcadis, 2019)

Voor drie stroomgebieden is uitgerekend wat het effect is op verandering in basisafvoer (Tabel 8-5). Het Markvlietkanaal en de Roosendaalse Vliet hebben we buiten beschouwing gelaten omdat dit kanaal weinig ecologische waarde heeft.

Tabel 8-5: Berekende afname in afvoer van grondwater naar oppervlaktewaterlichaam in de periode 1 april – 1 september

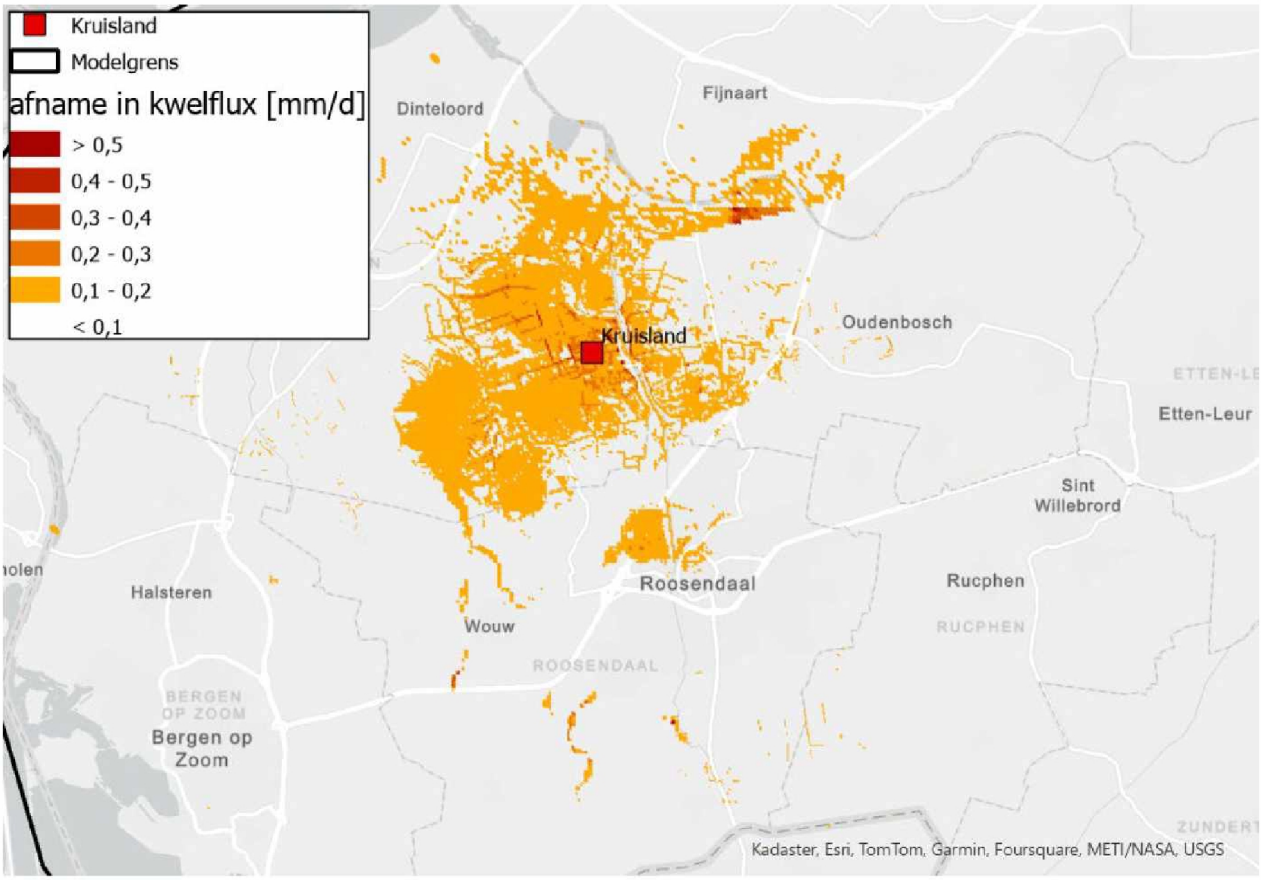
Oppervlaktewaterlichaam	Huidige afvoer (l/s)	Afname afvoer (l/s)	Relatieve afname (%)
De Ligne	104	0.5	0.5
Cruijslandse kreken	282	20.5	7.3
Molenbeek	393	6.5	1.7

De conclusie is dat:

- De Ligne een stagnant watertype is. Hier worden geen eisen gesteld aan de stroming. De berekende afname in afvoer is minimaal (0,5 %);
- De Cruijslandse kreken beschouwd worden als een stagnant watertype voor de KRW, maar de KRW systeemanalyse vraagt wel aandacht voor verhoging van de basisafvoer. De afname in afvoer is 7,3%. Binnen het stroomgebied ligt bovenstrooms de Smalle Beek, een vrij afwaterend systeem. De verandering in afvoer is hier nihil;
- De Molenbeek nu nauwelijks stroomt, dit is een knelpunt voor de KRW. De invloed van winning Kruisland is klein; de afname in de huidige basisafvoer is 1,7%.

8.10 Effecten op aanvoerbehoefte

De poldergebieden (weergegeven op kaart in Figuur 4-11) hebben een gewenst zomer- en winterpeil. In de winter is er een neerslagoverschot en wordt er water uitgelaten uit het systeem. In de zomer is er een neerslagtekort en wordt er soms water ingelaten om het watersysteem op peil te houden als de natuurlijke stroming naar de waterlopen onvoldoende is om voor deze watertoevoer te zorgen. Door de winning Kruisland neemt deze toestroming af. In Figuur 8-23 wordt weergegeven wat de verandering in afvoer van kwelwater en neerslagwater is in het zomerseizoen (1 april – 1 oktober). We hebben aangenomen dat dit tekort aangevuld moet worden. Dit is een voorzichtige benadering omdat er in werkelijkheid niet altijd in de zomer een tekort aan water is dat moet worden aangevoerd.



Figuur 8-23: Berekend verschil in toestroming in kwel en neerslagwater naar de waterlopen in een gemiddelde zomer

9 Conclusies

Voor de nieuwe winning Kruisland is een grondwatermodel opgesteld. Hiervoor is gebruik gemaakt van informatie uit het Brabantmodel en actuele ondergrondinformatie van TNO zoals de H3O modellen. Aan het model is informatie toegevoegd, zoals kennis uit de Landschappelijke Systeem Analyses.

Het grondwatermodel is uitgebreid gekalibreerd aan metingen van grondwaterstanden en stijghoogten. Na kalibratie zijn de afwijkingen tussen berekende en gemeten grondwaterstanden en stijghoogten sterk gereduceerd. Voor kalibratie was de gemiddelde afwijking 28 cm (te droog) en na kalibratie is deze afwijking 2 cm. Het model is gevalideerd aan diverse andere metingen, zoals eerder uitgevoerde pompproeven en gemeten afvoer door het oppervlaktewater. De validatie bevestigt dat het grondwatermodel plausibele resultaten geeft.

Met het grondwatermodel zijn de effecten van de voorgenomen winning Kruisland berekend. De berekende verlagingen in grondwaterstand zijn beperkt en slechts in een klein oppervlak groter dan 10 cm. Effecten zijn groter in (extreem) droge periodes. De resultaten uit deze berekeningen worden verwerkt in de Milieu Effect Rapportage.

Royal HaskoningDHV

Bronnen

Anoniem, zonder datum. FLUZO beschrijving (Engelstalig document)

Arcadis (2019). Watersysteemanalyse Mark Dintel Vliet. Arcadis rapport 083762597 0.3. 28 januari 2019

Artesia (2017). Evaluatie Hydrologisch Meetnet Brabant Water. Fase 2: Hydrologische evaluatie van het meetnet. Projectnummer: 16.35.16. 16 juni 2017

Artesia (2023). Pompproef Kruisland. Analyse. 20 maart 2023

5.1.2.e 5.1.2.e 5.1.2.e). Numerical modelling of groundwater basins. A user-oriented manual. Second edition 1990. ISBN 9070260697

Brabant Water (2023). Syntheserapport Pompproef Kruisland

5.1.2.e 5.1.2.e 5.1.2.e 5.1.2.e 5.1.2.e 5.1.2.e 5.1.2.e (2017). Documentation for the MODFLOW 6 framework: 5.1.2.e Techniques and Methods, book 6, chap. A57, 42 p., https://doi.org/10.3133/tm6A57

IWACO, 1992. Modelling of flow in the unsaturated zone: The programme Fluzo. Rotterdam

KNMI, 2023. KNMI wetenschappelijk rapport, 2023: KNMI national climate scenarios 2023 for the Netherlands, KNMI, De Bilt, WR 23-02.

KWR (2023). Grondwaterkwaliteit bij de nieuwe waterwinlocatie in Kruisland: analyse van de nulmeting en pompproef. KWR rapport 2023.034. Mei 2023

RIZA (1997). Gewenste grondwatersituatie Noord-Brabant deelrapport 2. RIZA rapportnummer 98.028

Royal HaskoningDHV (2018). Verkenning uitbreiding grondwaterwinning West-Brabant. Rapport BF8757R002F01WM. 29 oktober 2018

Royal HaskoningDHV (2019). Update Hydrologische Gereedschapskist Noord-Brabant Rapport BF3823WATRP1902061020WM. 6 februari 2019

Royal HaskoningDHV (2019b). Documentatie NHI-lagentool, Tutorial versie d.d. 28 juni 2019, https://www.nhi.nu/nl/files/4615/6398/2369/Tutorial_NHI_Lagentool_juni_2019.pdf

Royal HaskoningDHV (2021). Berekening herkomst grondwater nieuwe winlocatie Kruisland. RHDHV memo BH6186WATNT2106171127. 21 juli 2021

Royal HaskoningDHV (2022a). Systeemanalyse natuurgebieden West-Brabant; Oudland. RHDHV-rapport BG6186-WM-RP-220726-1447WM. 25 november 2022.

Royal HaskoningDHV (2022b). Systeemanalyse natuurgebieden West-Brabant; Halsters Laag. RHDHV-BI8614-RHD-XX-ZZ-RP-Z-0001. 25 november 2022.

Royal HaskoningDHV (2022c). Systeemanalyse natuurgebieden West-Brabant; Zoomland. RHDHV-BG6186-WM-RP-220726-1643WM. 25 november 2022.

Royal HaskoningDHV (2022d). Systeemanalyse natuurgebieden West-Brabant; Percelen langs Molenbeek en Spuitendonks bosje. BI8614-RHD-XX-ZZ-RP-Z-0001. 25 november 2022.

Royal HaskoningDHV (2022e). Systeemanalyse natuurgebieden West-Brabant; Rozenven. RHDHV-rapport BG6186-WM-RP-220726-1556WM. 25 november 2022.

Royal HaskoningDHV (2022f). Systeemanalyse natuurgebieden West-Brabant; Gastels Laag. RHDHV-rapport BG6186-WM-RP-220726-0938WM. 25 november 2022.

Royal HaskoningDHV (2022g). Systeemanalyse natuurgebieden West-Brabant; Cruijslandse Kreken. RHDHV-rapport BG6186-WM-RP-220726-0938WM. 25 november 2022.

Royal HaskoningDHV (2023). Comparison of H3O with REGIS. Royal HaskoningDHV note 16 februari 2023.

TNO (2022). Hydrogeologisch basismodel Zuid-Nederland. TNO rapport 2022 R11720. 14 april 2022

TNO (2023) Geologisch en hydrogeologisch 3D model van het Cenozoïcum van de Belgisch-Nederlandse grensstreek van De Noorderkempen/West-Brabant (H3O-De Voorkempen). TNO rapport R10347. April 2023

5.1.2.e 5.1.2.e en 5.1.2.e 5.1.2.e (2002). Multiple-objective optimization of drinking water production strategies using a genetic algorithm, Water Resour. Res., 38(9), 1181, doi:10.1029/2000WR000034, 2002

Waterschap Brabantse Delta (2017). Watersysteemanalyse Ligne. Brabantse Delta rapport 17IT009230. 17 november 2017.

5.1.2.e 5.1.2.e 2014. Visserijkundig Onderzoek Roode Weel te Steenbergen. 7 februari 2014

5.1.2.e 5.1.2.e 5.1.2.e (2018a). Molenbeek; Watersysteemanalyse. Wi+Bo rapport 17IN033287. 28 februari 2018

5.1.2.e 5.1.2.e 5.1.2.e (2018b). Cruijslandse Kreken; Watersysteemanalyse. Wi+Bo rapport 17IN032590. 28 februari 2018


Royal
HaskoningDHV