



RAPPORT

Update Hydrologische Gereedschapskist Noord-Brabant

Klant: Brabant Water

Referentie: BF3823WATRP1902061020WM

Status: Finale versie/P01.01

Datum: 6 februari 2019

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Water

Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Update Hydrologische Gereedschapskist Noord-Brabant

Referentie: BF3823WATRP1902061020WM

Status: P01.01/Finale versie

Datum: 6 februari 2019

Projectnaam:

Projectnummer: BF3823R001F01WM

Auteur(s): Floris Verhagen, Tom van Steijn, Ben van der Wal, Wouter Swierstra, Han Vermue

Gecontroleerd door: Floris Verhagen

Datum/Initialen: 06-02-2019 / FV

Goedgekeurd door: Frans Jorna

Datum/Initialen: 06-02-2019 / FJ



Disclaimer

No part of these specifications/printed matter may be reproduced and/or published by print, photocopy, microfilm or by any other means, without the prior written permission of HaskoningDHV Nederland B.V.; nor may they be used, without such permission, for any purposes other than that for which they were produced. HaskoningDHV Nederland B.V. accepts no responsibility or liability for these specifications/printed matter to any party other than the persons by whom it was commissioned and as concluded under that Appointment. The integrated QHSE management system of HaskoningDHV Nederland B.V. has been certified in accordance with ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 and OHSAS 18001:2007.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Inleiding	1
1.2	Leeswijzer	1
1.3	Belangrijke verbeterpunten 2018	3
2	Modelconcept op hoofdlijnen	4
3	Model	6
3.1	Modelgrenzen	6
3.2	Resolutie (ruimte en tijd)	7
3.3	Tijdstappen	7
3.4	Randvoorwaarden	7
3.5	Begintoestand	7
3.6	Rekentijd	9
3.7	Aannames grondwatermodel	9
4	Onverzadigde zone	10
4.1	Modelconcept	11
4.2	Neerslag	12
4.3	Oppervlakkige afstroming	14
4.4	Potentiele verdamping (referentie-gewasverdamping)	14
4.5	Berekening actuele verdamping en grondwaternaanvulling	17
4.6	Interceptieverdamping en interceptiecapaciteit	18
4.7	Landgebruik	18
4.8	Bodemeigenschappen	23
4.9	Dikte onverzadigde zone	27
4.10	Berekende grondwaternaanvulling	28
5	Ondergrond	30
5.1	Indeling in vijf deelgebieden	30
5.2	Databronnen geologie	31
5.3	NHI Lagentool	32
5.4	Lagenopbouw met NHI-tool	33
5.4.1	Hernoemen formaties	34
5.4.2	Stap 1: NHI lagentool	34
5.4.3	Stap 2: samenvoegen geologische modellen	35
5.4.4	Stap 3: afleiden lagenmodel uit geologische basisdataset	36
5.5	Resultaat 19-lagenmodel	38

5.6	Aansluiting op België en Duitsland	40
5.7	Breuken	42
5.8	Eigenschappen ondergrond	49
5.9	Bergingscoëfficiënt	53
5.10	Onttrekkingen	55
5.10.1	Basisbestanden onttrekkingen	56
5.10.2	Handmatige bewerkingen (in Excel)	58
5.10.3	Conversie naar IPF	60
5.10.4	Toekenning aan lagen (MKWellIPF)	60
5.10.5	Controle stationaire debieten	62
5.10.6	Tijdsafhankelijke invoer (IPF2ADO)	64
5.11	Beregening	65
6	Interactie grond-oppervlaktewater	69
6.1	Inleiding en modelconcept	69
6.2	Gebruikte gegevens en werkwijze per databron	71
6.2.1	Waterschap de Dommel	72
6.2.2	Waterschap Aa en Maas	73
6.2.3	Waterschap Brabantse Delta	74
6.2.4	Waterschap Limburg	74
6.2.5	Maas en Waal	74
6.2.6	Peilbeheerst gebied	77
6.2.7	Secundaire en tertiaire waterlopen	77
6.2.8	Buisdrainage	77
6.2.9	Oppervlaktewater in België	79
6.2.10	Controle aansluiting waterlopen	81
6.3	Modellering en tools	83
6.3.1	Geolinqs module primaire waterlopen en kanalen	83
6.3.2	Depfilter voor bepaling drainageniveau	84
6.3.3	AHN filter voor bepaling drainageniveau grotere waterlopen	85
6.3.4	Onderscheid drainage en infiltratieweerstand in MODFLOW	86
6.4	Insnijdingsconcept en natte omtrek	88
6.5	Weerstanden waterlopen	93
6.6	Maaiveld (hoogte)	95
7	Kalibratie	97
7.1	Methode en werkwijze op hoofdlijnen	97
7.2	Monte Carlo analyse	97
7.3	Gebruikte meetdata grondwaterstanden en stijghoogten	99
7.4	Kalibratieperiode	104
7.5	IJking diepe systeem (stap 1)	105
7.6	IJking ondiepe systeem (Stap 2)	111

7.7	Lokale aandachtspunten (Stap 3)	114
7.8	Gevoeligheid voor veranderingen in grondwateraanvulling	116
7.9	Gevoeligheid voor verandering in drainageweerstand	118
7.10	Resultaat stationaire ijking	119
8	Modeluitkomsten en validatie	122
8.1	Waterbalansen	122
8.2	Potentialen	124
8.3	Grondwaterstanden en GxG	125
8.4	Opwaartse stroming	129
8.5	Afvoeren	130
8.6	Tijdreeksen	133
8.7	Grondwaterreeksen rond grondwaterwinningen	135
9	Ontsluiting	145
9.1	Opzet, toegang en werkwijze van de HGK-server	145
9.2	Toepassingsmogelijkheden	147
9.3	Ruimtelijke en temporele verschillen in invoer	148
10	Mogelijke verbeterpunten	149
10.1	Modelinvoer / Basisdata	149
10.2	Modelconcept	150
10.3	IJking / validatie	152
11	Literatuur	154

Bijlagen

Bijlage 1: Beschrijving FLUZO

Bijlage 2: Update onverzadigde zone modellering

Bijlage 3: Grondwateraanvulling van Thiessenpolygone naar modelknopen

Bijlage 4: Koppeltabel gebruikte ondergrondmodellen

Bijlage 5: Eisen naamgeving

Bijlage 6: Toegekende k-waarden HCOV en H3O modellen

Bijlage 7: Gemiddelde k-waarde per REGIS laag

Bijlage 8: Gemiddelde onttrekkingdebieten drinkwater

Bijlage 9: Aanname watervoerendheid Roerdalslenk Duitsland

1 Inleiding

1.1 Inleiding

Het Brabant model is ontwikkeld sinds 2006 volgens de principes van de Hydrologische Gereedschapskist (HGK). Het model is een instrumentarium dat gebruik maakt van verschillende programma's om geautomatiseerd en gestructureerd van basisdata tot modellen te komen en ook modellen na te bewerken. Op het moment dat basisgegevens in de databank verbeterd zijn, kan snel weer een nieuw model gemaakt worden. Er is de laatste jaren veel inspanning gestopt in de ontwikkeling van de HGK. De achterliggende data is verbeterd, zowel voor het oppervlaktewater als voor de schematisatie van de ondergrond. Er wordt regelmatig gewerkt aan het verbeteren van de rekeninstrumenten en het verzamelen en verbeteren van de basisgegevens. In dit rapport wordt de opzet van het Brabant-model van 2018 beschreven.

Eerdere versies van het Brabantmodel zijn niet eerder beschreven. In dit rapport wordt soms gerefereerd naar de vorige versie van 2014 of de gebruikte versie voor de Draagkrachtstudie uit 2017 (Royal HaskoningDHV 2017c). Het doel van dit rapport is niet een vergelijking met het voorgaande model. Er zijn zo veel zaken verbeterd en veranderd dat een vergelijking op onderdelen moeilijk mogelijk is.

1.2 Leeswijzer

Dit rapport is bedoeld om inzicht te geven in opzet en achtergronden van het Brabantmodel voor geohydrologen die bekend zijn met grondwatermodellering. Algemene uitgangspunten over grondwatermodellering of geohydrologie worden als bekend verondersteld. Het rapport is ook niet een handleiding voor het gebruik van de tools.

In hoofdstuk 2 wordt eerst een algemene beschrijving gegeven van de opzet van het Brabantmodel en de verschillende tools. In hoofdstuk 3 worden de gehanteerde uitgangspunten van het model beschreven zoals de modelgrenzen en de randvoorwaarden. De onverzadigde zone wordt gemodelleerd met het pakket FLUZO (hoofdstuk 4). Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 een beschrijving gegeven van de schematisatie van het ondergrondmodel. In hoofdstuk 6 wordt beschreven hoe de interactie met het oppervlaktewatersysteem is gemodelleerd. Hoofdstuk 7 beschrijft de stationaire kalibratie en hoofdstuk 8 de validatie van het model. Hoofdstuk 9 beschrijft op welke wijze het model en data zijn ontsloten op de modellenserver van waterschap de Dommel en wat de mogelijkheden en beperkingen van het model zijn. Het rapport wordt afgesloten met mogelijke toekomstige verbeterpunten in hoofdstuk 10.

Gebruikte iconen in dit rapport

Het lezen van dit rapport wordt vergemakkelijkt met het gebruik van zes iconen die illustreren om wat voor type beschrijving het gaat.

	Beschrijving van de gebruikte databronnen
	Beschrijving van de methodiek en modelconcepten
	Toelichting bij een tool of programma
	Beschrijving van doorgevoerde modelverbeteringen of de wijze van genereren van modelinvoer
	Controle van modelinvoer of modeluitkomsten, zoals ijking of validatie
	Beschrijving van de oplevering van een eindproduct of resultaat

1.3 Belangrijke verbeterpunten 2018

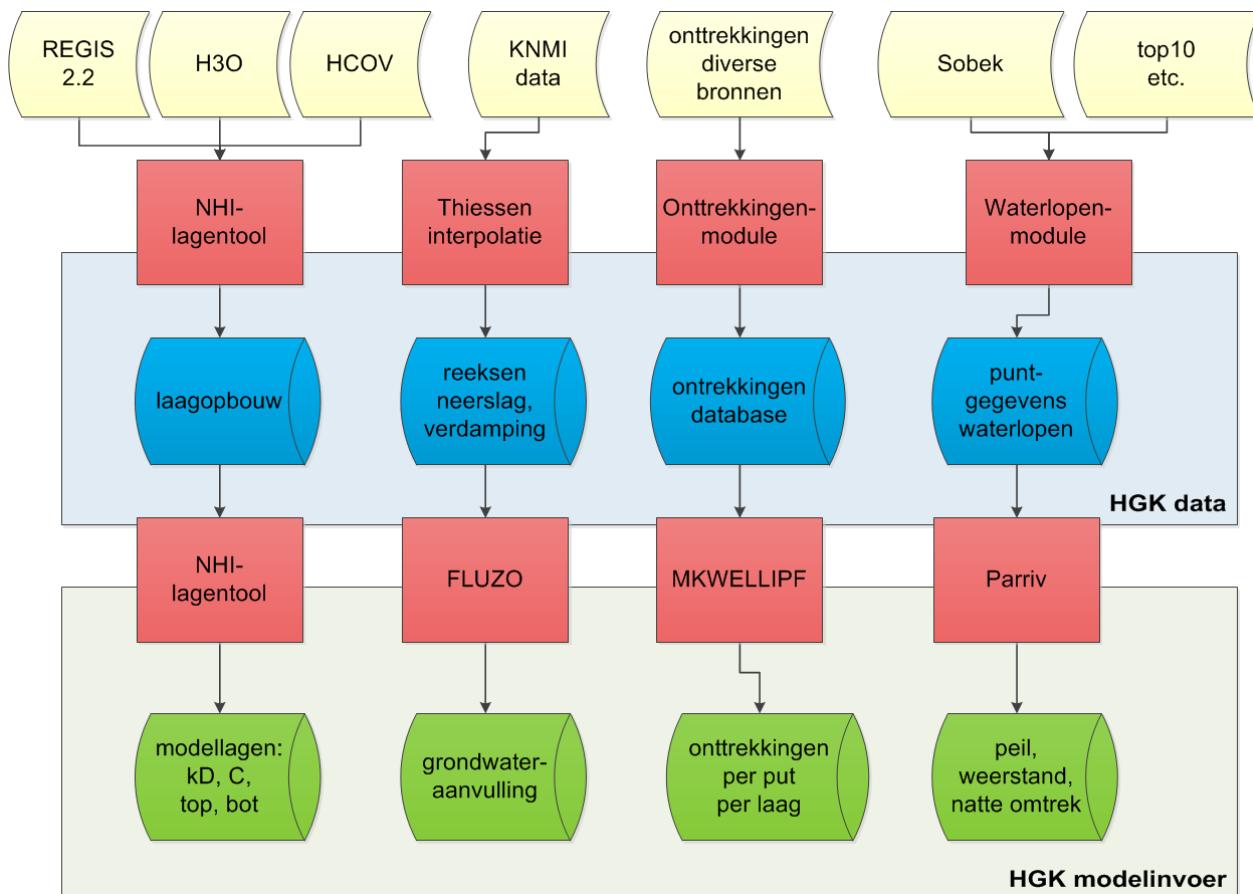
Het grondwatermodel is in 2018 op veel punten aangepast en verbeterd ten opzichte van voorgaande versies van het Brabantmodel. De belangrijkste verbeterpunten zijn samengevat in Tabel 1-1.

Tabel 1-1: Belangrijkste doorgevoerde verbeteringen in het Brabantmodel 2018

Onderdeel	Belangrijkste doorgevoerde verbetering	Onderdeel rapport
Modeltijd	Het model is geactualiseerd en geïjkt voor de periode 2009-2016. De grondwaternaamvulling vanaf 1970 is beschikbaar.	Paragraaf 3.2
Onverzadigde zone	FLUZO is aangepast en geactualiseerd door te rekenen met meer actuele versies van de bodemkaart en een geactualiseerde versie van de Staringreeks	Hoofdstuk 4 en Bijlage 2
Berekening grondwaternaamvulling	De wijze van interpolatie van grondwaternaamvulling is veranderd zodat de vorm van de Thiessenpolygone minder hard doorwerken in het invoerbestand.	Paragraaf 4.2 en Bijlage 3
Lagenmodel	Voor het opstellen van het lagenmodel is gebruik gemaakt van de nieuwe NHI-lagentool en de nieuwe REGISII v2.2, H3O en GeoTOP bestanden	Paragraaf 5.3
Breuken	De wijze van berekening van de breukweerstand is gelijk gemaakt aan de wijze waarop dit in de iMOD modellen wordt gedaan	Paragraaf 5.7
Onttrekkingen	Onttrekkingsgegevens zijn in het Hydromonitor formaat (https://gwo.nhi.nu/) gezet en volgens een standaardwijze verwerkt tot modelinvoer. De gegevens van Brabant Water en grote industrieën zijn tijdsafhankelijk ingevoerd.	Paragraaf 5.10
Waterlopen	De gegevens van de grote rivieren (Maas en Waal) zijn tijdsafhankelijk ingevoerd.	Paragraaf 6.2.5
Buisdrainage	Voor de buisdrainage is gebruik gemaakt van de landelijke buisdrainagekaart	Paragraaf 6.2.8
AHN filter	Drainageniveau's voor de secundaire en tertiaire waterlopen zijn bepaald uit het AHN filter.	Paragraaf 6.3.3
Insnijdingsconcept	De vertaling van de mate vaninsnijding van waterlopen in het watervoerende pakket is op een andere manier bepaald. Dit bepaalt de drainageweerstanden.	Paragraaf 6.4
Validatie	Het model is tijdsafhankelijk gevalideerd op gemeten afvoeren en gemeten grondwaterstanden en stijghoogten	Hoofdstuk 8

2 Modelconcept op hoofdlijnen

Het Brabant modelinstrumentarium maakt gebruik 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. Alle software en databestanden zijn geïnstalleerd op de modelserver van waterschap De Dommel (zie paragraaf 9.1).



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

Het schema van Figuur 2-1 is een weergave op hoofdlijnen. In detail worden nog meer achterliggende bestanden en tools gebruikt.

De meest relevante programma's en tools zijn kort beschreven in Tabel 2-1. De rol van deze programma's wordt meer uitgebreid verder in het rapport beschreven.

Tabel 2-1: Onderdelen van het Brabant model

Hoofd onderdeel	Onderdeel	Omschrijving
Algemeen	Hydrologische databank	Dataverzameling van achterliggende gegevens die in het geohydrologisch model worden gebruikt, zoals meteorologie, landgebruik, waterlopen, geologie en ontrekkingen. De gegevens kunnen verschillend van aard zijn (punten/lijnen/vlakken), van formaat (shapes, Excel, rasters) en indien gewenst gevareerd in de tijd zijn.
	Projectgebied	Afbakening van het gebied dat doorgerekend gaat worden. Dit kan het gehele modelgebied van het Brabant-model zijn, of een uitsnede van een kleiner gebied.
	Gridgenerator	Een tool (ArcGIS) die op basis van het projectgebied en de aangegeven watergangen verdichtingspolygonen genereert. Deze bestanden kunnen gebruikt worden in Triwaco om een eerste eindig elementengrid te genereren (Flairs). Voor Modflow berekeningen is de bepaling van verdichtingspolygonen niet van toepassing.
	Triwaco	Modelgenerator waarmee op flexibele wijze modelopzet, discretisatie (modelgrid) en modelparameters gedefinieerd kan worden. De link tussen basisdata en modelparameters is vastgelegd in relaties (expressies) en relaties tussen parameters zijn ook vastgelegd in expressies en daardoor herleidbaar tot brondata.
	Grondwatermodel	Modelcode waarmee de grondwaterstanden en stijghoogten berekend worden. Het Brabant model maakt gebruik van MODFLOW 2000 (Eindig Differentieel model), maar gebruikers kunnen ook voor Flairs kiezen (Eindig Elementen model).
Overzadigd	FLUZO	Programma ontwikkeld door Royal HaskoningDHV waarmee grondwaternaauvulling wordt berekend op basis van de combinatie in grondgebruik, bodemtype, neerslag, verdamping en grondwaterstand.
	Fluzolees	Programma waarmee van tevoren berekende reeksen grondwaternaauvulling door FLUZO kunnen worden uitgelezen per modelknooppunt van het grondwatermodel. De grondwaternaauvulling wordt per tijdstap uitgelezen.
	Beregengingstool	Programma (Delphi) dat in de batch file voor de tijdsafhankelijke berekening is opgenomen voor het bepalen van de beregning per modelcel per tijdstap op basis van het vochttekort en het landgebruik.
	NHI-lagentool	Tool om een geohydrologisch lagenmodel op te zetten binnen de Deltashell ontwikkeld door Royal HaskoningDHV in samenwerking met Deltares. De tool werkt met bestanden die zijn omgezet naar het bestandsformaat IDF.
	Breukentool	Allocator binnen de Trishell waarmee het doorlaatvermogen ter plaatse van de breuk kan worden gereduceerd op basis van een opgegeven weerstandswaarde.
	Boringentool	Python tool waarmee data (mediaan van de korrelgrootte) van boorstaten wordt omgezet in een doorlatendheidswaarde.
	Bergingstool	Programma (Delphi) waarmee de verzadigde bergingscoëfficiënt wordt berekend afhankelijk van de dikte van de onverzadigde zone en het evenwichtsvuchtprofiel behorende bij de ondergrondcode van de Staringreeks. Loopt mee met de batch file in de niet stationaire berekening.
	MKWELLIPF	IMOD tool die de onttrekkingsdebieten aan de modellagen toekent op basis van filterlengte en filterdiepte van de onttrekkingsputten.
Oppervlakte water	IPF2ADO	Door Royal HaskoningDHV ontwikkeld programma dat tijdsafhankelijke onttrekkingsdata met het IPF-formaat (uit iMOD) omzet in ADO formaat ten behoeve van Triwaco.
	Geolinqs Waterlopen module	Triwaco module waarmee verschillende gegevens van het hoofdwatersysteem (peil, natte omtrek, bodemhoogte) uit het oppervlaktewatermodel Sobek worden gecombineerd met topografische gegevens van tertiaire watergangen en weggeschreven naar één consistente dataset met puntwaarden per watergang (shapefile). Dit wordt los van het grondwatermodel gedaan omdat het om grote hoeveelheden data gaat en dit (her)gebruikt kan worden voor detailmodellen.
	Pariv	Triwaco allocator waarmee puntgegevens per watergang in de modelinvoer worden gekoppeld aan de modelwatergangen.
	Sobek2Shape	Door waterschap De Dommel ontwikkelde tool die de uitwisseling tussen gegevens van het oppervlaktewatermodel naar het grondwatermodel voor een groot deel automatiseert.
	MODEL2UNG	RHDHV programma (Delphi) om van gridinformatie uit de waterlopenmodule (ADO file), puntinformatie (UNG file) te maken. De UNG files worden vervolgens weer gealloceerd in het model.
	ISGGGRID	De iMOD batch-functie om de waterpeilen in de ISG files om te zetten naar IDF bestanden met dezelfde omvang, resolutie en tijdstappen als het grondwatermodel.

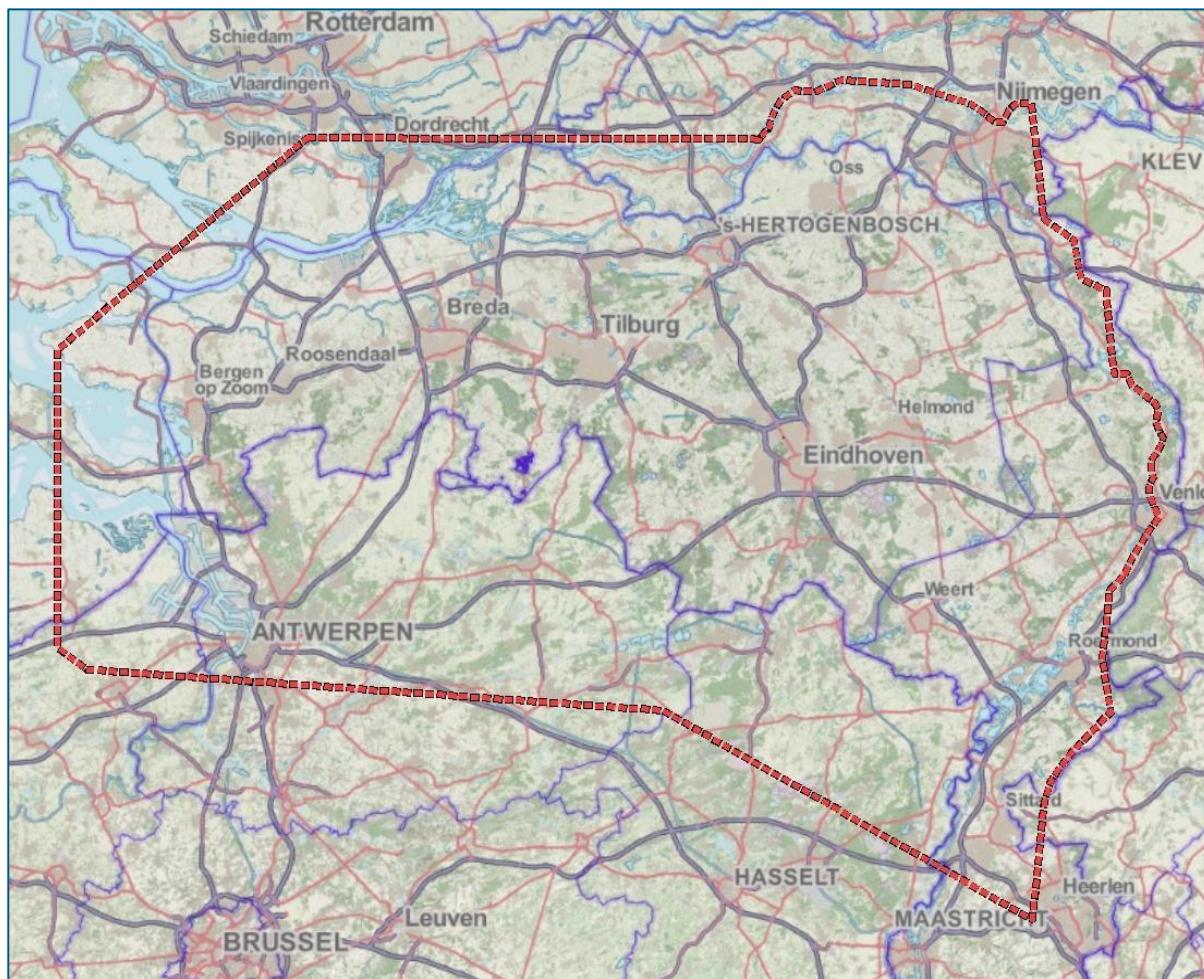


3 Model

3.1 Modelgrenzen

Het modelgebied omvat een ruim deel rondom de provincie Noord-Brabant (Figuur 3-1). Het modelgebied is in 2018 vergroot:

- Naar het noorden tot en met de Waal. Dit is gedaan omdat de fluctuaties in Waalpeilen sterk kunnen afwijken van de Maaspeilen. De Waal heeft nog invloed op de geohydrologie van Noord-Brabant.
- Naar het oosten tot en met de Maas omdat dit een logische geohydrologische grens is. In de Roerdalslenk is het modelgebied tot en met de Duitse grens doorgetrokken omdat de effecten van winningen in de Slenk zich ver kunnen uitstrekken.
- Naar het zuiden is de modelgrens verder opgeschoven, omdat de oorspronkelijke modelgrens zich in het zuidoosten erg dicht bij de provinciegrens bevond.
- In het westen is de ligging van de grens niet veranderd en fungeren de open wateren van Zeeland als hydrologische grens.



Figuur 3-1: Modelgrenzen van het Brabantmodel

3.2 Resolutie (ruimte en tijd)

Het model is doorgerekend met een uniform rechthoekig grid van 250 bij 250 meter. De achterliggende basisinformatie is opgeslagen in de aangeleverde resolutie. Gebruikers kunnen het model verfijnen voor een te kiezen deelgebied. In paragraaf 9.2 wordt nader uitgelegd onder welke voorwaarden dit mogelijk is.

Het grondwatermodel is opgezet en geijkt voor de periode 2009 tot en met 2016. Het model kan door gebruikers aangepast worden voor een andere tijdsperiode omdat de berekende grondwaternaamvulling vanaf 1970 beschikbaar is. Voor deze lange periode is gekozen om ook het extreem droge jaar 1976 of een periode van 30 jaar te kunnen doorrekenen. Dit sluit aan bij de praktijk van landelijke studies.

3.3 Tijdstappen

Het grondwatermodel van Brabant is doorgerekend met tijdstappen van 5 dagen.

3.4 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. In paragraaf 3.5 wordt ingegaan op de beginwaarden die aan de modelranden zijn opgelegd.

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. Tevens is de grondwaternaamvulling opgegeven.

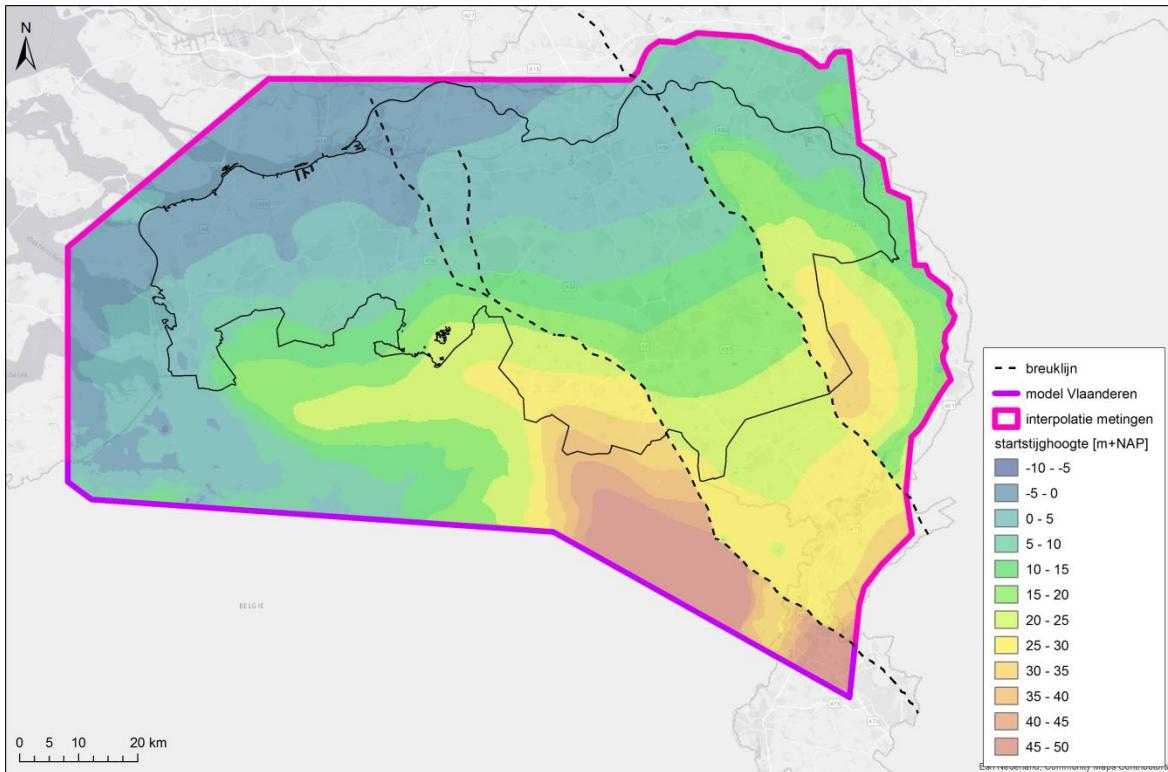
3.5 Begintoestand

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 grondwaternaamvulling.

De stationaire grondwaternaamvulling is iteratief bijgesteld gedurende de modellering. De grondwaternaamvulling is namelijk afhankelijk van de diepte van de grondwaterstand. Wanneer de grondwaterstanden veranderen in het kalibratieproces, moet de grondwaternaamvulling ook weer bepaald worden. In paragraaf 4.10 wordt in meer detail ingegaan op de wijze waarop de grondwaternaamvulling is berekend.

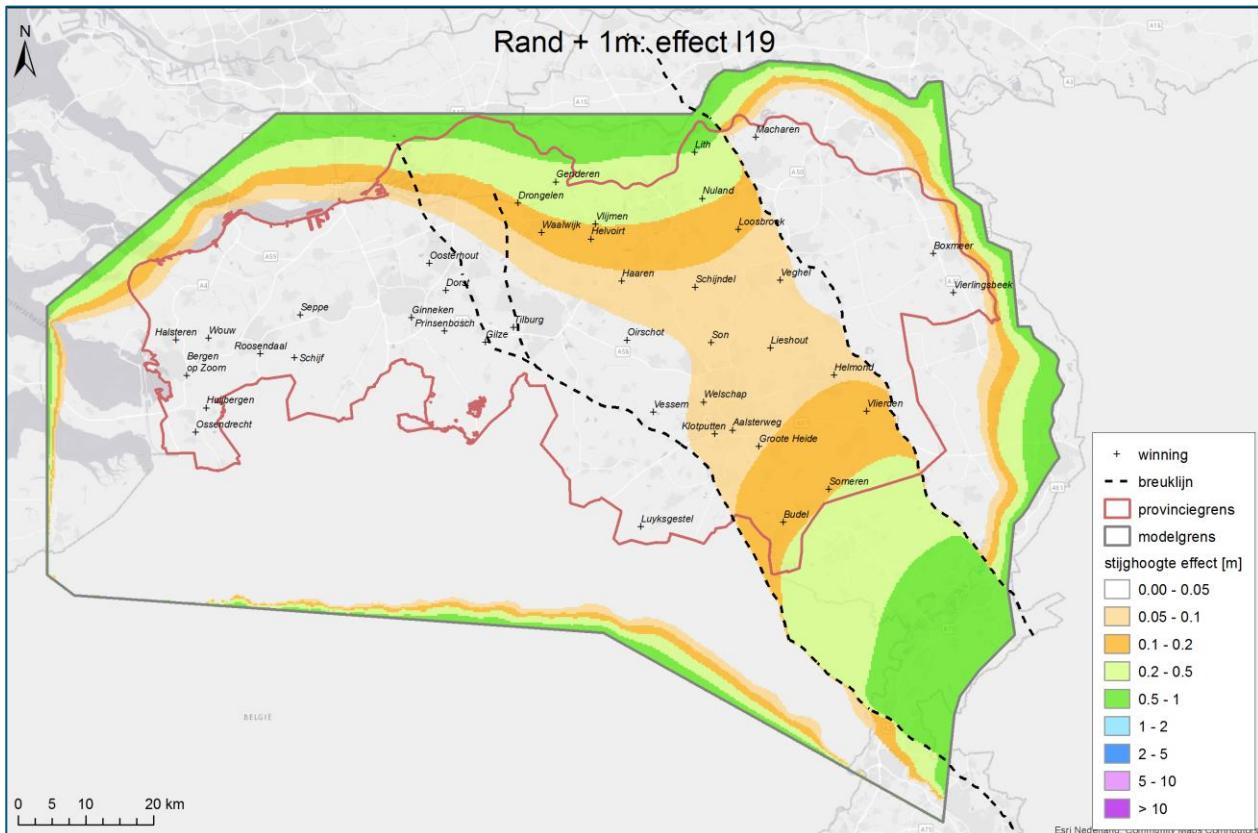
Hoe meer de begintoestand in de tijdsafhankelijke berekening afwijkt van het stationaire resultaat hoe langer de berekening nodig heeft om zich in te stellen. De inloopperiode bedraagt enkele jaren.

Voor de startwaarden van de stijghoogte voor het stationaire model is gebruik gemaakt van een interpolatie van metingen. De gemiddelde gemeten stijghoogte in de periode 2009 tot en met 2016 zijn geïnterpoleerd met de "inverse distance methode". Alle beschikbare meetpunten zijn gebruikt (zie paragraaf 7.3 en Figuur 7-2) met een overzicht van de beschikbare meetpunten). In Vlaanderen zijn minder meetpunten beschikbaar op de modelrand. Hier is gebruik gemaakt van de berekende stijghoogten in het Vlaanderenmodel (Royal Haskoning, 2010).



Figuur 3-2: Startwaarden voor de stijghoogten in de modellagen 9 tot en met 19

De stijghoogten zijn vastgezet op de rand (Figuur 3-2). De stijghoogte kan in werkelijkheid echter wel veranderen, bijvoorbeeld door een ingreep in het hydrologisch systeem. Om een idee te hebben hoeveel de stijghoogte op de rand doorwerkt op de rest van het modelgebied, is een indicatieve berekening gemaakt waarbij de stijghoogte op de rand met 1 meter is verhoogd in alle modellagen onder Waalre klei 1. Vooral in de Centrale Slenk werkt de modelrand ver door tot in het modelgebied. De grootste effecten treden op in de onderste modellaag (Figuur 3-3). Bij het uitvoeren van scenarioberekeningen moet hierbij rekening worden gehouden (zie paragraaf 9.2).



Figuur 3-3: Effect op de stijghoogte in modellaag 19 bij het verhogen van de vaste stijghoogte op de modelrand met 1 meter

3.6 Rekentijd

De rekentijd voor het doorrekenen van de verzadigde zone in de modelperiode 1970 – 2016 bedraagt 3 dagen. Voor de onverzadigde zone kan gebruik worden gemaakt van de vooraf gegenereerde FLUZO databank.

3.7 Aannames grondwatermodel

Het Brabant model is een quasi 3D grondwaterstromingsmodel. Er is aangenomen dat de horizontale stroming plaatsvindt in de watervoerende lagen (zand en grind) en verticale stroming binnen de scheidende lagen (klei-/leem-/bruinkoollagen). In het grondwatermodel zijn de modellagen de watervoerende lagen met de scheidende lagen ertussenin.



4 Onverzadigde zone

Voor het Brabant model is de grondwateraanvulling berekend voor de periode 1970 – 2016. De reeksen van de gemiddelde grondwateraanvulling, actuele verdamping en potentiele verdamping zijn met tijdstappen van 5 dagen weggeschreven in een databank. Er is gekozen voor deze lange periode zodat gebruikers altijd een reeks beschikbaar hebben die lang genoeg is om in te voeren in het grondwatermodel. Het is daarom niet nodig om zelf FLUZO berekeningen te maken. Een uitgebreide beschrijving van FLUZO is opgenomen in Bijlage 1.

FLUZO is gevoed met modelinvoer voor neerslag (paragraaf 4.2) en referentieverdamping (paragraaf 4.4). Het model houdt geen rekening met oppervlakkige afstroming (paragraaf 4.3). Uit de referentieverdamping is de actuele verdamping afgeleid (paragraaf 4.5) waarbij rekening is gehouden met interceptieverdamping (paragraaf 4.6). De actuele verdamping is afhankelijk van het landgebruik (paragraaf 4.7), de bodemeigenschappen (paragraaf 4.8) en de dikte van de onverzadigde zone (paragraaf 4.9). Tot slot wordt het resultaat gepresenteerd van de berekende grondwateraanvulling (paragraaf 4.10).



Verbeteringen 2018

De modelinvoer is verbeterd door gebruik te maken van meer actuele modelinvoer:

- Gebruik van de Staringreeks 2001 leidt tot een meer realistische benadering van de verdamping in de zomer op lemige gronden en zwak leemhoudende zandgronden. Aanpassing van de bodemparameters geeft meer grondwateraanvulling op de hoger gelegen zandige gronden en minder grondwateraanvulling op lemige gronden.
- Bodemkaart BOFEK2012 bevat een groter aantal bodemeenheden en daardoor een grotere ruimtelijke nauwkeurigheid. Deze vervangt de PAWN bodemkaart. Aanpassing van de bodemkaart gecombineerd met de nieuwe bodemparameters geeft minder grondwateraanvulling op de kleigronden en de hoger gelegen lemige zand- en enkeerdgronden.

Meer details over de verbeteringen zijn opgenomen in Bijlage 2.

4.1 Modelconcept

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 en capillaire opstijging zijn invoertermen waarmee de actuele verdamping en percolatie worden berekend. De bodemvocht balans in de wortelzone is omschreven als:

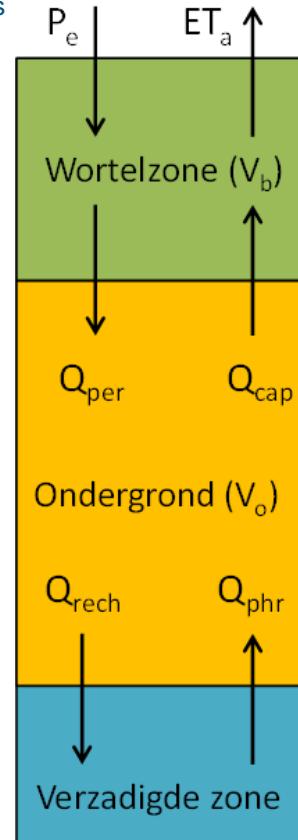
$$V_b = P_e + Q_{cap} - ET_a - Q_{per}$$

Waarbij V_b het volume van de bovengrond is, P_e de netto neerslag, Q_{cap} de capillaire flux van de ondergrond naar de wortelzone, ET_a de actuele verdamping en Q_{per} percolatie van de wortelzone naar de ondergrond.

Ondergrond

De dikte van de ondergrond varieert in de tijd afhankelijk van de grondwaterstand. Wanneer de grondwaterstand gelijk of hoger is dan de onderkant van de wortel zone is de dikte van de ondergrond nul. Percolatie vanuit de wortel zone naar de onverzadigde zone en capillaire opstijging vanuit de verzadigde zone dienen als invoerterm in de waterbalans van de ondergrond. Grondwaternaanvulling en capillaire opstijging naar de wortel zone zijn uitvoer van de waterbalans welke wordt geschreven als: $V_o = Q_{phr} + Q_{per} - Q_{rech} - Q_{cap}$

Waarbij V_o het volume van de ondergrond is, Q_{phr} de flux van de verzadigde zone naar de ondergrond en Q_{rech} de grondwaternaanvulling naar de verzadigde zone. De verzadigde zone wordt met het grondwatermodel gemodelleerd. Dit model levert de grondwaterstanden en dus de dikte van de onverzadigde zone. FLUZO levert de grondwaternaanvulling/capillaire opstijging aan het grondwatermodel.



Figuur 4-1: Componenten van de waterbalans

Er is rekening gehouden met interceptieverdamping (zie paragraaf 4.6). Elk gewas heeft een eigen interceptie reservoir 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 (zie paragraaf 4.4).

Demping

In het model gaat het water dat vanuit de wortelzone naar de ondergrond percoleert direct naar de verzadigde zone, mits het vochtgehalte in de ondergrond groot genoeg is. Echter bij grote onverzadigde zones zal de neerslag vertraagd en afgevlakt bij het grondwater aankomen. Fluzo kan rekening houden met deze vertraging en demping. Dit kan door Fluzo berekend worden met een vertragings(retardatie) en dempingfactor. Wanneer de onverzadigde zone groter is dan een bepaalde kritische diepte vindt in Fluzo geen capillaire opstijging meer plaats naar de wortelzone en is de retardatie en demping berekend. Door Custers (2005) is nader onderzocht wat het effect is van deze dempingsfunctie. De vertragings- en dempingsfunctie is in het Brabantmodel niet gebruikt.

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), die ingaat op de stappen die nodig zijn om een model op te zetten. Door Custers (2005) is een afstudeerverslag gemaakt, waarin een goede Nederlandse beschrijving van FLUZO is opgenomen. Dit hoofdstuk is in dit rapport als **Bijlage 1** opgenomen.

4.2 Neerslag



Gebruikte gegevens

Voor de neerslag is gebruik gemaakt van een interpolatie van de dagelijks gemeten neerslag door de KNMI stations in Nederland (RD1), databron 3 in het onderstaande kader. Voor het Belgische deel is gebruik gemaakt van een selectie van regenmeters van de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), databron 5 in onderstaand kader.

Beschikbare en selectie van databronnen voor meteorologie

1. NHI referentiedataset 1981 -2010. Voor dezelfde periode zijn klimaatscenario's beschikbaar. Het gaat om een interpolatie van 294 regenmeters en 14 weerstations in Nederland voor de referentieverdamping. Deze zijn niet gebruikt omdat de reeksen te kort zijn.
2. Neerslagradar gecorigeerd met behulp van regenmeters. Beschikbaar vanaf 2007. Dit is volgens het KNMI de beste neerslagdata. Dit is niet gebruikt omdat de data voor 2007 niet beschikbaar is en de verwerking van de data gecompliceerder is.
3. Historische dataset (RD1 en EV24) datasets: neerslag vanaf 1951 tot heden en Makkink referentieverdamping vanaf 1965 tot heden. Het betreft een interpolatie van 270 tot 310 neerslagstations en 7 tot 32 weerstations voor de referentieverdamping (voor heel Nederland). Deze data is gebruikt.
4. Dagelijks gemeten neerslag in de individuele KNMI stations. Het aantal beschikbare stations verschilt per jaar (vroeger waren er minder stations). Deze data is niet gebruikt omdat een aantal reeksen te kort is en/of onderbrekingen bevat.
5. Dagelijks gemeten neerslag in individuele VMM regenmeters in België, beschikbaar vanaf 2002 of 2008. Data is gebruikt van 4 VMM stations beschikbaar vanaf 2002 en 4 stations beschikbaar vanaf 2008.

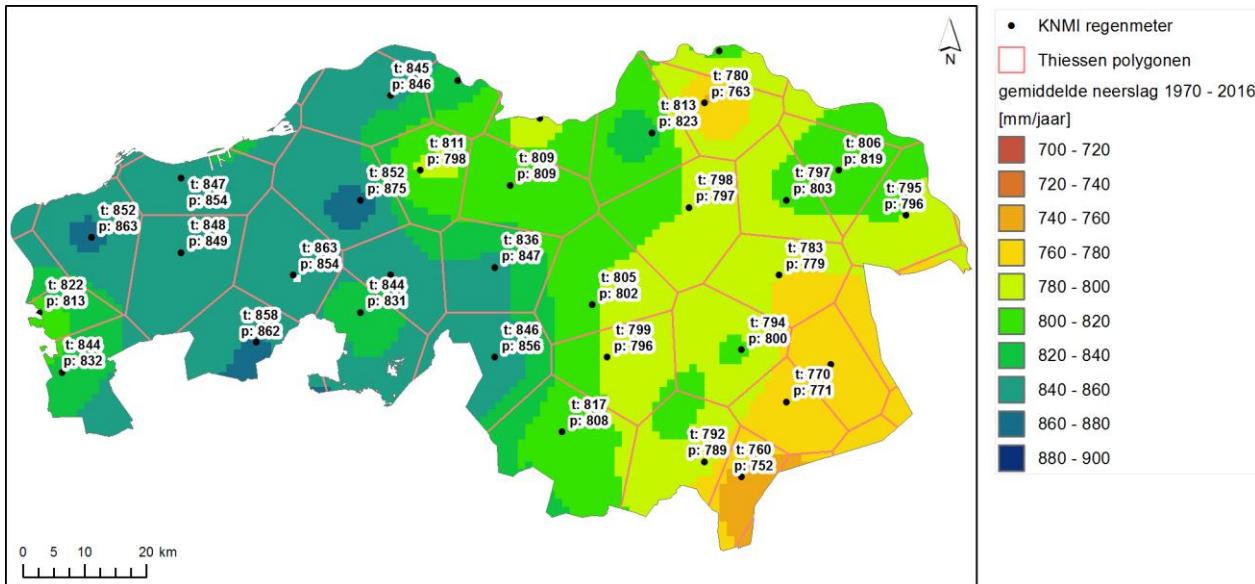


Voor Nederland is geïntpoleerde rasterdata beschikbaar. FLUZO kan rekentechnisch alleen overweg met grotere polygonen. Er is gekozen om de waarde uit het KNMI-raster op de punten van de KNMI-stations te gebruiken. Dit heeft het voordeel dat er altijd een waarde beschikbaar is, ook in het geval op een dag een meetwaarde mist in een bepaald station. Op basis van deze data is een gemiddelde waarde berekend voor een veelhoek. Deze Thiessen polygoon heeft een vorm waarbij elke locatie binnen de polygoon dichter bij dat station ligt dan bij een van de andere stations. Vervolgens is de neerslag bepaald per polygoon. Het gewicht van een KNMI station voor het te beschouwen gebied is evenredig aan de oppervlakte van de veelhoek waarvoor het station het dichtstbijzijnde punt is (= de Thiessen-polygoon). Onder Nederlandse omstandigheden is er voor de berekening van gebiedsgemiddelde neerslag weinig verschil tussen deze methode en het eenvoudige rekentijdige gemiddelde van een aantal stations.



Resultaat interpolatie neerslag

Het resultaat van de interpolatie is gepresenteerd in Figuur 4-2. Voor België zijn voor de periode voor 2002 geen gegevens publiek beschikbaar (alleen betaald). Voor deze periode is de neerslag vanuit Nederland geëxtrapoleerd naar het Belgische deel van het model. De neerslag in België is niet precies gelijk aan de neerslag in Nederland over de grens. Dit kan meer of minder zijn, maar de gradiënt met toenemende neerslag in oostelijke richting in Vlaanderen is voldoende nauwkeurig omdat het Belgisch deel fungert als rand voor het model en niet bedoeld is om hier studies uit te voeren.



Figuur 4-2: Gemiddeld gemeten neerslag in de periode 1970 – 2016 in Noord-Brabant, ruimtelijk geïnterpoleerd, per KNMI station (*p*-waarde) en de geïnterpoleerde waarde voor het Thiessen polygoon (*t*-waarde)



Vertaling neerslag in grondwateraanvulling

Het gebruik van Thiessenpolygone heeft als nadeel dat de polygonen als harde grenzen terugkomen in de berekende grondwateraanvulling. Bovendien is het de vraag hoe representatief de waarde in het neerslagstation is voor de polygoon. De grondwateraanvulling is binnen een polygoon berekend met de neerslag van het neerslagstation. In periodes met veel regenval kan dit abrupte overgangen geven in berekende grondwateraanvulling per Thiessenpolygoon. Daarom is voor tijdstappen met relatief veel neerslag de grondwateraanvulling gecorrigeerd. De correctiefactor is bepaald als het verschil van de geïnterpoleerde neerslag (KNMI-rasterwaarde) met de bepaalde neerslag binnen de polygonen. Deze correctie is alleen voor grote neerslaghoeveelheden gedaan. In droge tijden zou deze correctiefactor namelijk ook een negatieve neerslag kunnen opleveren. Hoe de correctie uitpakt is weergegeven in Bijlage 3. Dit laat zien dat de berekende grondwateraanvulling vlak bij de neerslagstations gelijk blijft, maar dat de scherpe overgangen verdwijnen. De precieze werkwijze is vastgelegd in het script van de batchfile van de tijdsafhankelijke berekening.



4.3 Oppervlakkige afstroming

Er is voor het landelijk gebied geen rekening gehouden met oppervlakkige afstroming. Dit is neerslag die via het maaiveld in het oppervlaktewatersysteem terecht komt. Binnen FLUZO zal dit water infiltreren en via het ondiepe grondwatersysteem door waterlopen of andere drainagemiddelen worden afgevoerd. Hierdoor kan de berekening van de grondwateraanvulling bij hevige neerslag enigszins worden overschat. Het is wel mogelijk om hier rekening mee te houden door gebruik te maken van een neerslag-afvoer module. Deze module, NACHO genaamd, moet nog beoordeeld worden voor het Brabant model. Dit is niet gedaan in 2018.

In stedelijk gebied is aangenomen dat de neerslag deels wordt afgevoerd door het riool en dus niet ten gunste aan het grondwater komt. De mate van grondwateraanvulling in stedelijk gebied wordt nader toegelicht in paragraaf 4.7. Er is geen rekening gehouden met het type bui, zoals piekbuien. In het niet verharde deel van het stedelijk gebied is een verdamping aangenomen gelijk aan gras. De reductie is uitgevoerd voor al het stedelijk gebied, onafhankelijk van het type rioolstelsel. De ligging van het stedelijk gebied is ontleend aan de LGN6 kaart.

4.4 Potentiële verdamping (referentie-gewasverdamping)

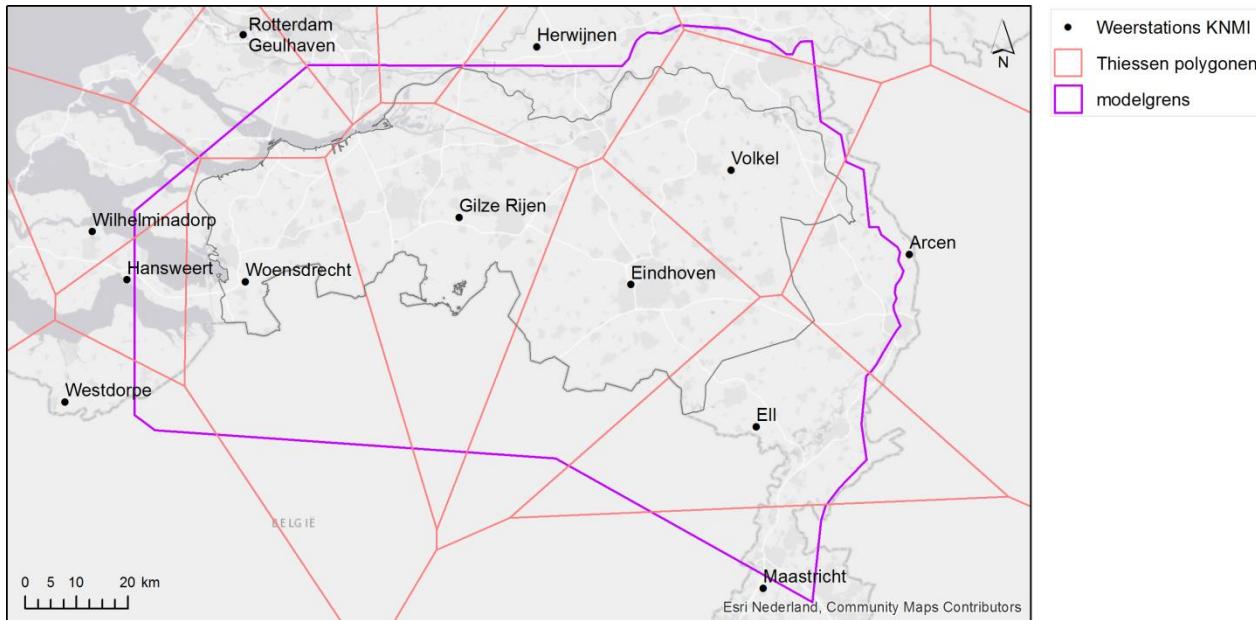
De potentiële verdamping is de hoeveelheid water die verdampst uit een grasveld dat goed voorzien is van water en nutriënten. Deze waarde is de basis voor de berekening van de verdamping voor alle gewassen.



Gebruikte gegevens van het KNMI

Voor de potentiële verdamping is gebruik gemaakt van de Makkink referentieverdamping van het KNMI. Voor de overige gewassen gelden andere getallen. Uit proeven met lysimeters is de verhouding bepaald tussen de verdamping van diverse planten tot de referentie-gewasverdamping.

De Makkink referentieverdamping (Makkink, 1957) wordt dagelijks door het KNMI berekend op basis van de inkomende kortgolvige straling en de temperatuur. De ruimtelijke variabiliteit in referentieverdamping is minder groot in vergelijking met de neerslag. Daarom wordt de verdamping in een beperkt aantal weerstations gemeten. In Noord-Brabant zijn er vier weerstations waar verdamping wordt gemeten: Woensdrecht, Gilze-Rijen, Eindhoven en Volkel. Buiten de provincie Noord-Brabant is gebruik gemaakt van data uit drie KNMI stations in Limburg (Arcen, Ell en Maastricht), drie KNMI stations in Zeeland (Westdorpe, Wilhelminadorp en Hansweert), station Herwijnen in de provincie Gelderland en station Rotterdam Geulhaven in Zuid-Holland.



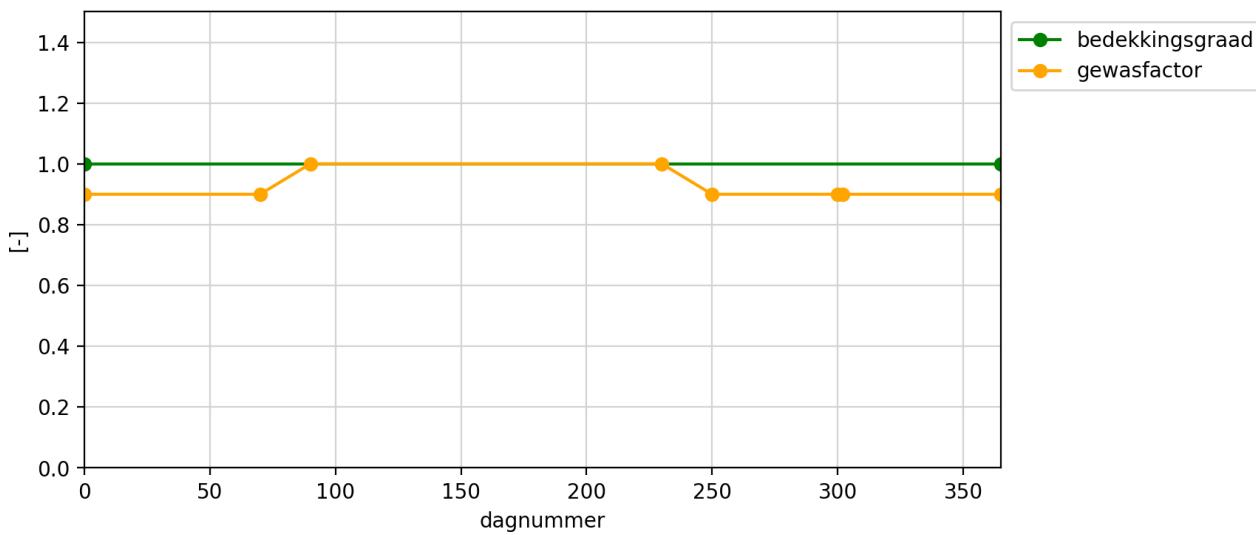
Figuur 4-3: Weerstations van het KNMI waar de Makkink referentieverdamping bepaald is

De Makkink referentieverdamping is net als de neerslag afgeleid uit de geïnterpoleerde landsdekkende dataset geleverd door het KNMI (EV24). Thiessen polygonen rondom de KNMI regenmeters krijgen de waarde van het verdampingsgrid op de locatie van de regenmeter. Het regenmeternetwerk heeft een grotere dichtheid dan het netwerk van weerstations waar de Makkink referentieverdamping wordt bepaald. Voor België is de hoeveelheid verdamping alleen beschikbaar in Penman-Monteith. Daarom is ervoor gekozen om de verdamping te extrapoleren vanuit Nederland.

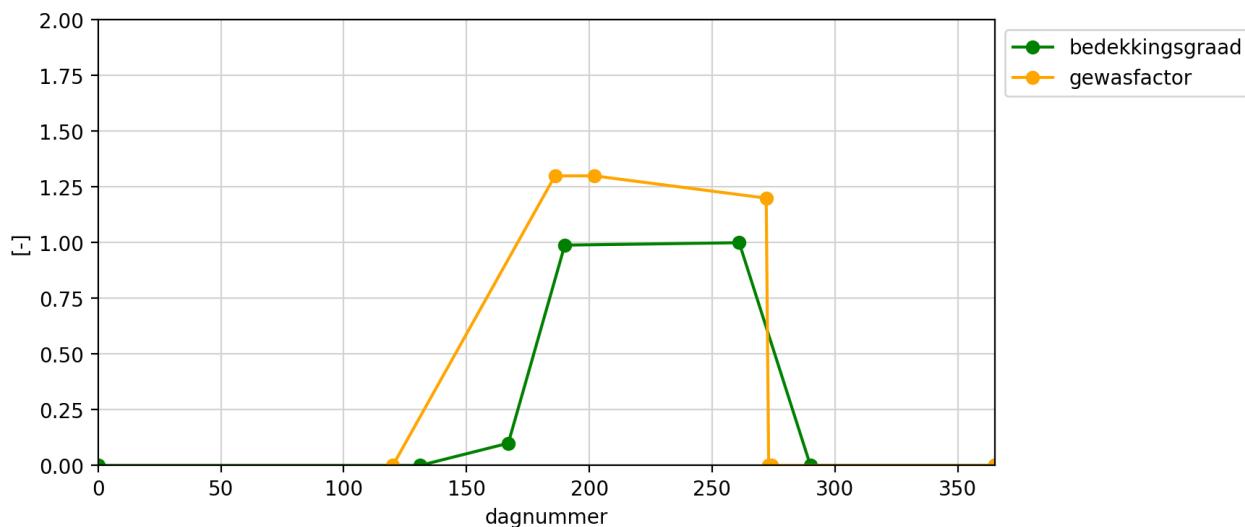


Gewasfactoren

De referentiegewasverdamping voor gras is vertaald in een referentieverdamping per gewas per maand. Hiervoor worden grafieken gebruikt met gewasfactoren die verschillen per (landbouw)gewas en per maand. Gedurende het groeiseizoen varieert voor de meeste landbouwgewassen de gewasfactor afhankelijk van het ontwikkelingsstadium. Als voorbeeld is de grafiek van de gewasfactor voor gras (Figuur 4-2) en mais (Figuur 4-5) opgenomen. Te zien is dat voor mais er geen verdamping is in de winter. De bedekkingsgraad is gebruikt voor de berekening van de interceptieverdamping (zie paragraaf 4.6).



Figuur 4-4: Gewasfactor en bodembedekkingsgraad voor gras in FLUZO



Figuur 4-5: Gewasfactor en bodembedekkingsgraad voor mais in FLUZO

De neerslag is verder gebruikt in de berekening van de grondwateraanvulling (zie paragraaf 4.10).

4.5 Berekening actuele verdamping en grondwateraanvulling



Modelconcept

FLUZO berekent de actuele verdamping en zo ook de grondwateraanvulling. Het modelinstrumentarium is zo opgezet dat berekening van het verzedigde grondwater (FLAIRS / MODFLOW) apart wordt gedaan van het onverzedigde grondwater (FLUZO). De rekentijd kan zo beperkt worden gehouden door de rekenmethode van FLUZO te vereenvoudigen. Er is vooraf een beperkt aantal reeksen doorgerekend voor verschillende combinaties van parameters. De berekende reeksen worden opgeslagen in de FLUZOdatabank. Met het programma "FLUZOlees" kan de berekende grondwateraanvulling snel worden uitgelezen voor de modelknopen van het grondwatermodel.

FLUZO maakt gebruik van de Mualem-Van Genuchten relaties tussen drukhoogte en bodemvochtgehalte en drukhoogte en onverzedigde doorlatendheid (Schaap et al., 2005). Deze relaties bepalen het bodemvochtprofiel in functie van de dikte van de onverzedigde zone en de aanvulling. Voor een FLUZO berekening zijn dus gegevens nodig over de bodemeigenschappen, onderverdeeld in het type bodem en de eigenschappen van de bodem. De bodemtypes in de bodemkaart worden gekoppeld aan de bodemfysische eenheden uit de Staringgreeks 2001 (voor toelichting zie paragraaf 4.8). En er is informatie nodig over de ligging van de grondwaterstand (de dikte van de onverzedigde zone). De grondwaterstand onder maaiveld is opgegeven als onderrandvoorwaarde van het model en is afgeleid uit de tijdsafhankelijke grondwatermodel berekening. De berekende stationaire grondwaterstand verandert gedurende het opzetten en ijken van het model en is daarom diverse keren bijgesteld in het ijkproces.



Gemaakte verbeteringen

De modelinvoer is in 2018 ten opzichte van het 2014 model geactualiseerd op twee punten: (1) het gebruik van de BOFEK bodemkaart in plaats van de PAWN kaart en (2) de meest actuele versie van de Staringgreeks uit 2001 (in plaats van de versie uit 1987). Er is ook overwogen om de gewasfactoren aan te passen en te synchroniseren met MetaSwap. Daar is uiteindelijk niet voor gekozen. In Bijlage 2 is een uitgebreide vergelijking opgenomen van de effecten van de aanpassingen van de grondwateraanvulling op de grondwaterstanden.



Benodigde invoergegevens

De in FLUZO in te voeren parameters zijn vermeld in Tabel 4-1. De neerslag en verdamping worden als een tijdreeks per knooppunt opgegeven. Er kunnen verschillende bodemtypes en landgebruik worden gekozen die per knooppunt worden gedefinieerd. Het landgebruik bestaat uit landbougewassen, bomen, kale grond, open water en bebouwing. De bodemtypes bestaan uit combinaties van boven- en ondergrond uit de BOFEK bodemkaart.

In totaal zijn per neerslagstation 16.354 combinaties (37 bodemtypen * 17 landgebruikstypen * 26 diepte-intervallen) van parameters berekend. Deze waarden zijn opgeslagen in de FLUZO databank.

Tabel 4-1: Invoerparameters voor Fluzo

Soort parameter	Parameternaam	Opmerkingen	Toelichtende Tabel
Neerslag	PR	Tijdsafhankelijk	-
Verdamping	EV	Tijdsafhankelijk	-
Bodemtype van de wortelzone	RZ	Keuze uit 18 bodemsoorten	Paragraaf 4.7 Tabel 4-2
Bodemtype van de ondergrond	SS	Keuze uit 18 bodemsoorten	
Diepte grondwaterstand onder maaiveld	GW	Onderrandvoorwaarde onderverdeeld in 26 diepte-intervallen	Tabel 4-7
Hoogte Maaiveld	GL	-	-



4.6 Interceptieverdamping en interceptiecapaciteit

De interceptieverdamping is het water dat direct door de bladeren wordt opgevangen en zal verdampen. Dit is berekend per gewas met een interceptiereservoir. Het interceptiereservoir wordt gedurende de dag leger door evaporatie. De werkelijke interceptiecapaciteit is berekend door rekening te houden met de bedekkingsgraad van het gewas. Gedurende het groeiseizoen zijn er meer bladeren die voor meer interceptieverdamping zorgen. Op basis van de mate van gewasbedekking geïllustreerd in de voorbeelden in Figuur 4-4 en Figuur 4-5 is de mate van interceptie berekend.

De interceptiecapaciteit is de hoeveelheid water die in de bodem kan infiltreren. Deze hoeveelheid is op dagbasis berekend en van de neerslag afgetrokken. Als de interceptie groter is dan de neerslag is de infiltratiecapaciteit op nul gezet. Voor berekening van de effectieve neerslag voor een tijdstap van meerdere dagen is de effectieve neerslag voor de verschillende dagen opgeteld.

4.7 Landgebruik



Landgebruik en gewasfactoren

Per grondgebruikstype kan de verdamping gevarieerd worden en zo de grondwateraanvulling variëren. Om van potentieel verdamping naar actuele verdamping te komen worden gewasfactoren gebruikt. Dit is nodig omdat er verschillen zijn tussen stralingseigenschappen (albedo, emissiviteit) en vegetatie-eigenschappen (bladindex en ruwheid) van grasland in vergelijking met andere gewassen of natuurtypes. Begin jaren tachtig zijn bij het maken van FLUZO gewasfactoren opgesteld. Later is door Feddes (1987) een lijst met gewasfactoren opgesteld, gebaseerd op waterbalansexperimenten in standaard landbougewassen. Door Custers (2005) zijn de FLUZO factoren vergeleken met de factoren afgeleid door Feddes. Voor sommige gewassen zijn er verschillen omdat in Fluzo voor de gewasfactor een continue functie is gebruikt en voor Feddes een discrete functie. Dit geeft verwaarloosbare verschillen in de grondwateraanvulling.



LGN6

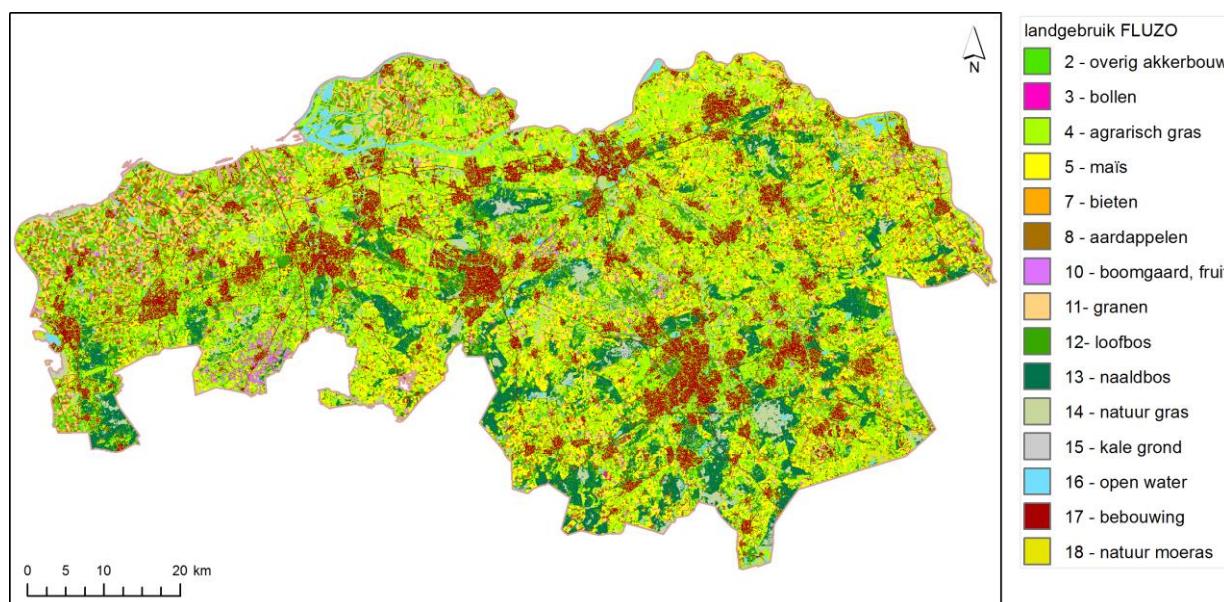
Het landgebruik is gebaseerd op het landgebruik afkomstig uit het LGN6 bestand (Hazeu et al., 2014). Het LGN6-bestand is een rasterbestand met een resolutie van 25*25 m. Het bestand geeft het Nederlandse landgebruik voor de jaren 2007/2008 weer. In het bestand worden 39 verschillende typen van landgebruik onderscheiden. Het LGN7 bestand met het landgebruik in 2012 is de opvolger van LGN6. Dit bestand heeft dezelfde 39 landgebruikstypen. LGN7 was niet beschikbaar voor het Brabantmodel 2018, maar kan relatief eenvoudig later verwerkt worden.

Voor Vlaanderen is uitgegaan van het Geo-Vlaanderen bestand (Royal Haskoning, 2010). Het bestand is opgebouwd uit een combinatie tussen het Bodembedekkingsbestand (2001)¹ en andere geografische datasets (bodemassociaties, CORINE landcover en het wegennet van de Grote Structuren). De grondresolutie bedraagt 15 m en het landgebruik is ingedeeld in 19 klassen. Dit bestand is te downloaden op www.geopunt.be.



Omvorming landgebruik naar FLUZO codes

De landgebruikcodes in Nederland en Vlaanderen worden vereenvoudigd door deze om te zetten in 15 FLUZO landgebruikcodes (Figuur 4-6). Voor de omzetting is een koppeltabel beschikbaar Tabel 4-2.



Figuur 4-6: Landgebruik volgens LGN6 vertaald naar FLUZO codes

De FLUZO-codes voor peulvruchten (2) en uien (6) zijn niet in het Brabantmodel gebruikt, omdat deze niet als aparte categorie in LGN6 zijn opgenomen. FLUZO-code 13 (naaldbos) is niet gebruikt, in plaats daarvan is code 24 gebruikt met samengestelde grondgebruikstypes. De FLUZO-codes 19 en 20 (Bos en Open Bos) zijn alleen in Vlaanderen gebruikt. Voor Vlaanderen is een Vlaams landgebruiksbestand² gebruikt waarvoor de codes zijn omgezet naar LGN6 codes.

De grondwateraanvulling is berekend per modelcel van 250 * 250 meter. Binnen deze modelcel kunnen meerdere grondgebruikstypes vallen, omdat de ruimtelijke resolutie van LGN6 25*25 meter is. Daarom is per

¹ Opname 2001:

<http://www.geopunt.be/download?container=bodemgebruik-2001&title=Bodemgebruiksbestand,%20opname%202001>

² Opname 2001:

<http://www.geopunt.be/download?container=bodemgebruik-2001&title=Bodemgebruiksbestand,%20opname%202001>

modelcel het aandeel grondgebruik bepaald en zo is de grondwateraanvulling in de modelcel per evenredig deel van het grondgebruik uitgerekend.

Wat betreft grondgebruik kan de gebruiker zelf een mix samenstellen van standaardreeksen (Tabel 4-3). Er zijn 10 FLUZO-codes beschikbaar met een samengesteld landgebruik. De codes 13, 23 en 31 worden niet in het huidige Brabantmodel gebruikt. Deze codes zijn dus vrij om eventueel wel te gebruiken of in te zetten voor een alternatief type landgebruik. Samengevat worden in het Brabantmodel 17 (samengestelde) landgebruikslijscodes gebruikt (de codes 1 -24, waarbij de codes 2, 6, 13, 21, 22, 23 en 24 niet worden gebruikt; code weergegeven met een *). Alle FLUZO codes met de link aan de LGN6 tabel zijn weergegeven in Tabel 4-2.

Tabel 4-2: grondgebruikstypes in FLUZO

FLUZO-code	Grondgebruikstypes Fluzo	LGN6 categorie
1	Alfalfa	Overige landbouwgewassen (groente)
2*	Peulvruchten	
3	Bollen	Bollen
4	Gras	No data Agrarisch gras Gras in bebouwd gebied Gras in secundair bebouwd gebied
5	Mais	Maïs
6*	Uien	
7	Suikerbiet	Bieten
8	Aardappelen	Aardappelen
9*	Wortelen	Afwezig in Noord-Brabant
10	Fruitbomen	Boomgaard Boomkwekerijen Fruitkwekerijen
11	Granen	Granen
12	Loofbos	Loofbos Loofbos in bebouwd gebied Bos in secundair bebouwd gebied Bos in hoogveengebied Bos in moerasgebied
13	Naaldbos	
14	Natuur (gras met ET reductie)	Open duinvegetatie Gesloten duinvegetatie Duinheide Heide Matig vergraste heide Sterk vergraste heide Overig open gegroeid natuurgebied
15	Open grond	Kale grond in bebouwd buitengebied Open zand in kustgebied Open stuifzand en/of rivierzand
16	Open water	Zoet water Zout water
17	Stedelijk	Glastuinbouw Stedelijk bebouwd gebied Bebouwing in buitengebied Hoofdwegen en spoorwegen Bebouwing in agrarisch gebied
18	Natuur (gras zonder ET reductie)	Kwelders Hoogveen Overige moerasvegetatie Rietvegetatie
19	Bos	
20	Open bos	
21*	-	
22*	-	
23*	-	
24	Naaldbos	Naaldbos



Berekening samengesteld grondgebruik

Voor de samengestelde landgebruikstypes vermeld in Tabel 4-3 kan de grondwateraanvulling worden bepaald met een formule:

$$gwa = f1 * (f2 * neerslag) + (1 - f1) * \sum (fgwa(x) * gwa(x)) - f3 * Makkinkverdamping$$

met:

$fgwa(x)$ = aandeel grondwateraanvulling type x

$gwa(x)$ = berekende grondwateraanvulling type x

$f1$ = aandeel stedelijk gebied

$f2$ = deel neerslag dat niet wordt afgevoerd naar het riool (alleen relevant voor stedelijk gebied)

$f3$ = open water verdamping tot Makkinkverdamping

Tabel 4-3: Samengestelde grondgebruikstypen

Nr	Land gebruik	Factor grondwateraanvulling per landgebruik fgwa															Factor		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	f1	f2	f3
12	loofbos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75	0	0	0.25	0	0	0
13	donker naaldbos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.97	0	0.03	0	0	0
16	open water	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1.3
17	stedelijk	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0.1	0	0
18	natuur	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	Bos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.86	0	0	0.14	0	0	0
20	open bos	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0.37 5	0	0	0.12 5	0	0	0
23	licht naaldbos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.46	0	0.14	0	0	0
24	naaldbos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.7	0.2	0	0.1	0	0	0
31	landbouw mix	0	0	0	0	0.25	0	0.25	0.25	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0

Grondgebruikstype open water (16) wordt berekend met:

$$gwa = neerslag - 1.3 * Makkinkverdamping (f1=1; f2=1; f3=1.3)$$

Dit gebeurt (als enige grondgebruikstype) buiten FLUZO om. De grondwateraanvulling wordt direct berekend uit de neerslag en de openwaterverdamping.



Grondwateraanvulling stedelijk gebied

Voor stedelijk gebied (type 17) is aangenomen dat 80% van het gebied verhard is. In het verharde gebied is aangenomen dat maar 10% van de neerslag het grondwater kan bereiken; de overige 90% wordt afgevoerd door het riool. Voor de overige 20% van het oppervlak is de verdamping van gras aangehouden. De formule wordt daarom:

$$gwa = 0.8 * (0.1 * neerslag) + 0.2 * gwa4 (f1=0.5; f2=0.1; fgwa4=1)$$

De grondwaternaavulling in stedelijk gebied komt uit op 115 mm/jaar. In het grondwatermodel bestaan de modelcellen vaak uit een combinatie van stedelijk gebied en ander landgebruik zodat de grondwaternaavulling per modelcel veel hoger is dan 115 mm/jaar.

Er zijn niet veel literatuurgegevens bekend over grondwaternaavulling in stedelijk gebied. Metingen van Waternet (2013) op Prinseneiland in Amsterdam gaven een gemiddelde grondwaternaavulling van 157 mm/jaar. In het NHI wordt gerekend met een factor van 40% bebouwd gebied waarbij de hoeveelheid te infiltreren water afhankelijk is van het type verharding (Deltares, 2011).

Gewasfactoren naaldbos en loofbos



Door Gehrels (1999) zijn voor een studie naar grondwaterstandfluctuaties op de Veluwe gewasfactoren voor bossen bepaald aan de hand van bestaande literatuur en door modellering.

Voor loofbos is de gewasfactor geschat met behulp van inverse modellering met een model voor de onverzadigde zone en transpiratiesommen voor loofbos bekend uit literatuur. De gewasfactoren in FLUZO bleken aanmerkelijk hoger te zijn dan de factoren afgeleid door Gehrels (Tabel 4-4). De oorspronkelijke gewasfactoren voor loofbos en naaldbos zijn daarom aangepast door te werken met samengestelde gewastypen (Tabel 4-3). In Fluzo is geen onderscheid gemaakt in donker en licht naaldbos. In de praktijk kan dit wel grote verschillen geven in verdamping. Op dit punt kan de modellering mogelijk in de toekomst verbeterd worden.

Tabel 4-4: Gemiddelde gewasfactoren per jaar voor loofbos, licht- en donker naaldbos gebruikt in Fluzo en door Gehrels (1999)

Gewasfactoren	Fluzo (oorspronkelijk)	Gehrels (1999)
Loofbos	0.9	0.625
Licht naaldbos	1.2	0.625
Donker naaldbos	1.2	0.8

4.8 Bodemeigenschappen

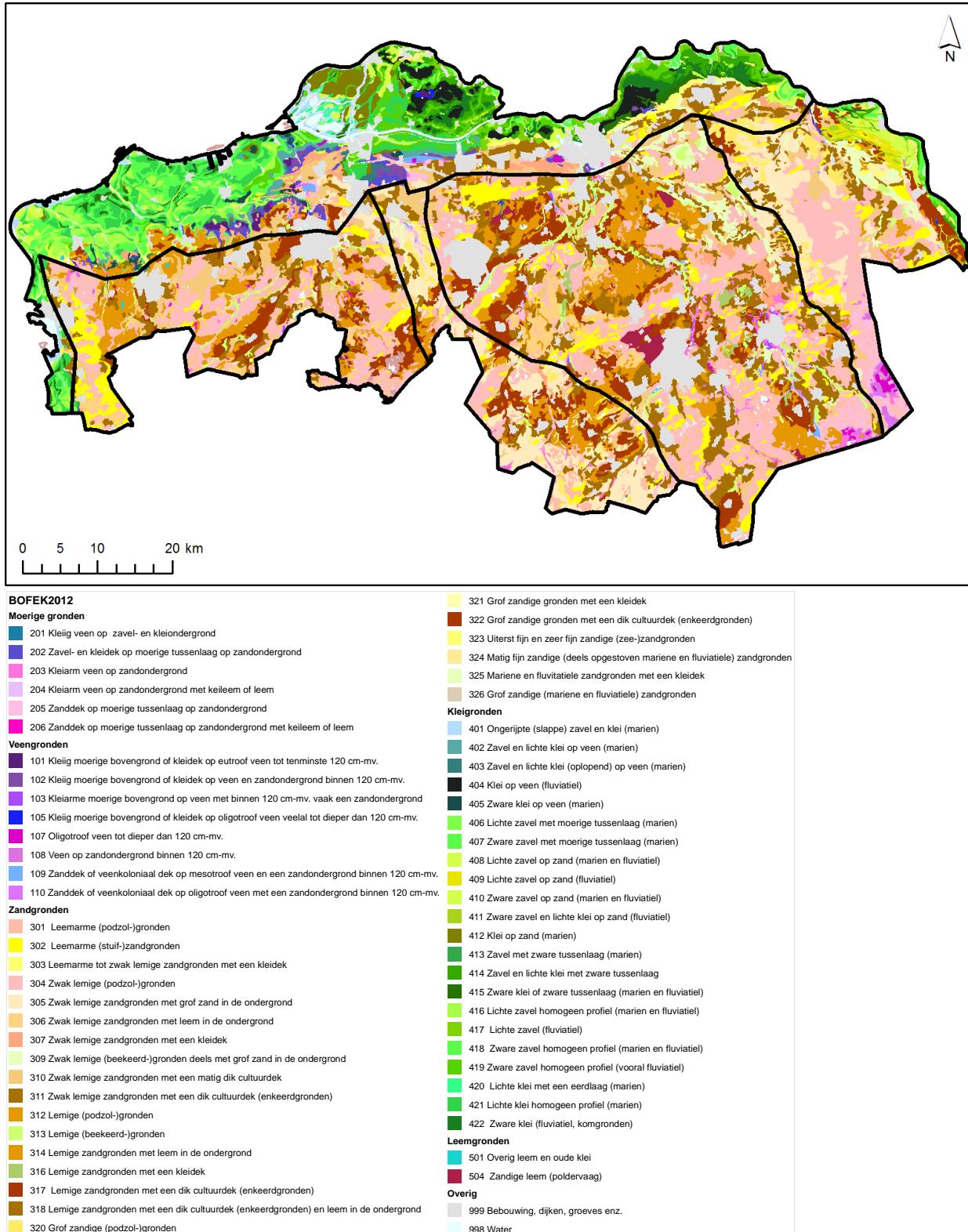
De bodemkaart

De berekende actuele verdamping en dus de grondwaternaavulling is afhankelijk van het bodemtype. Er is gebruik gemaakt van de BOFEK2012 bodemkaart (Tabel 4-7). Deze bodemkaart bevat 72 bodemfysische eenheden en is ontstaan uit een clustering van 315 bodemeenheden op basis van overeenkomstig hydrologisch gedrag en profielopbouw (Wösten et al., 2013).



De Staringreeks

De Staringreeks legt de koppeling tussen de Van Genuchten relaties en de bodemkaart en bevat gemiddelde parameterwaarden voor de 36 belangrijkste Nederlandse textuurklassen (Wösten et al., 2001). Deze textuurklassen bestaan uit 18 boven- en 18 ondergronden (Tabel 4-5), ook wel bodemfysische bouwstenen genoemd. De gemiddelde parameterwaarden uit de Staringreeks zijn gebaseerd op gemeten bodemfysische karakteristieken. De Staringreeks is in 1987 voor het eerst uitgebracht en daarna tweemaal geactualiseerd op basis van een groter aantal gemeten bodemkarakteristieken.



Figuur 4-7: BOFEK 2012 bodemkaart

Tabel 4-5: Bodemconstanten overgenomen uit Wösten et al. 2001

No.	Type	Teta(sat)	K(sat)	alfa	n	I
1	B1	0,43	23,41	0,0234	1,801	0
2	B2	0,42	12,52	0,0276	1,491	-1,06
3	B3	0,46	15,42	0,0144	1,534	-0,215
4	B4	0,46	29,22	0,0156	1,406	0
5	B5	0,36	52,91	0,0452	1,933	-0,359
6	B6	0,38	100,69	0,0222	1,238	-1,747
7	B7	0,4	14,07	0,0194	1,25	-0,802
8	B8	0,43	2,36	0,0099	1,288	-2,244
9	B9	0,43	1,54	0,0065	1,325	-2,161
10	B10	0,43	0,7	0,0064	1,21	-3,884
11	B11	0,59	4,53	0,0195	1,109	-5,901
12	B12	0,54	5,37	0,0239	1,094	-5,681
13	B13	0,42	12,98	0,0084	1,441	-1,497
14	B14	0,42	0,8	0,0051	1,305	0
15	B15	0,53	81,28	0,0242	1,28	-1,476
16	B16	0,8	6,79	0,0176	1,293	-2,259
17	B17	0,72	4,46	0,018	1,14	-0,35
18	B18	0,77	6,67	0,0197	1,154	-1,845
101	O1	0,36	15,22	0,0224	2,286	0
102	O2	0,38	12,68	0,0213	1,951	0,168
103	O3	0,34	10,87	0,017	1,717	0
104	O4	0,35	9,86	0,0155	1,525	0
105	O5	0,32	25	0,0521	2,374	0
106	O6	0,33	33,92	0,0162	1,311	-1,33
107	O7	0,51	39,1	0,0123	1,152	-2,023
108	O8	0,47	9,08	0,0136	1,342	-0,803
109	O9	0,46	2,23	0,0094	1,4	-1,382
110	O10	0,48	2,12	0,0097	1,257	-1,879
111	O11	0,42	13,79	0,0191	1,152	-1,384
112	O12	0,56	1,02	0,0095	1,158	-4,295
113	O13	0,57	4,37	0,0194	1,089	-5,955
114	O14	0,38	1,51	0,003	1,728	-0,292
115	O15	0,41	3,7	0,0071	1,298	0,912
116	O16	0,89	1,07	0,0103	1,376	-1,411
117	O17	0,86	2,93	0,0123	1,276	-1,592
118	O18	0,57	34,45	0,0138	1,323	-1,204

- Teta (sat): Verzadigd vochtgehalte [cm³/cm³]

- K (sat): verzadigde doorlatendheid [cm/d]

- alfa: vormparameter Van Genuchten vergelijking [1/cm³]

- n: vormparameter Van Genuchten vergelijking [-]

- I: vormparameter Van Genuchten vergelijking [-]



Koppeling BOFEK aan Staringgreeks

De 72 codes uit de BOFEK2012 bodemkaart zijn gekoppeld aan een combinatie van boven en ondergrond. Dit levert 37 unieke combinaties tussen boven en ondergrond Tabel 4-6.

Tabel 4-6: BOFEK2012 nummer gekoppeld aan de bovengrond (nr. 1 – 18 horizontaal) en ondergrond (nr. 1 -18 verticaal) met in totaal 37 unieke combinaties (ingevulde vakjes)

Bovengrond																		
Ondergrond	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	301 302 324 327	305 310																
2		106 205 206 304 309 311 323	315						325						110			
3			312 313 317 319															
4			314 306 318					316										
5				320 322 326														
6					502													
7																		
8									307 308									
9									408 409 416									
10								417	303 321 410 418	412								
11									202 411 419 501	401 421	415							
12									413	414 420	422					201		
13										503	404							
14												504 505 506						
15												507						
16									402 406	407	403	405			203 204		105	107
17													109	103 104 108	101	102		
18																		

4.9 Dikte onverzadigde zone

Diepte-intervallen

De onverzadigde zone is in de FLUZO-database ingedeeld in maximaal 26 diepte-intervallen (Tabel 4-7). Tot de bovenste 140 cm is er gerekend met intervallen van 10 cm omdat in de bovenste bodemlagen grote veranderingen in vochtgehaltes kunnen voorkomen. Op grotere diepte wordt de variatie minder en is een groter interval in bodemdiepte gehanteerd.

Tabel 4-7: Interval in diepte van de onverzadigde zone

Nr.	Diepte onverzadigde zone (cm)	Nr.	Diepte onverzadigde zone (cm)
1	10	14	140
2	20	15	160
3	30	16	180
4	40	17	200
5	50	18	220
6	60	19	240
7	70	20	260
8	80	21	280
9	90	22	300
10	100	23	340
11	110	24	400
12	120	25	600
13	130	26	2000

Bepaling diepte grondwaterstand

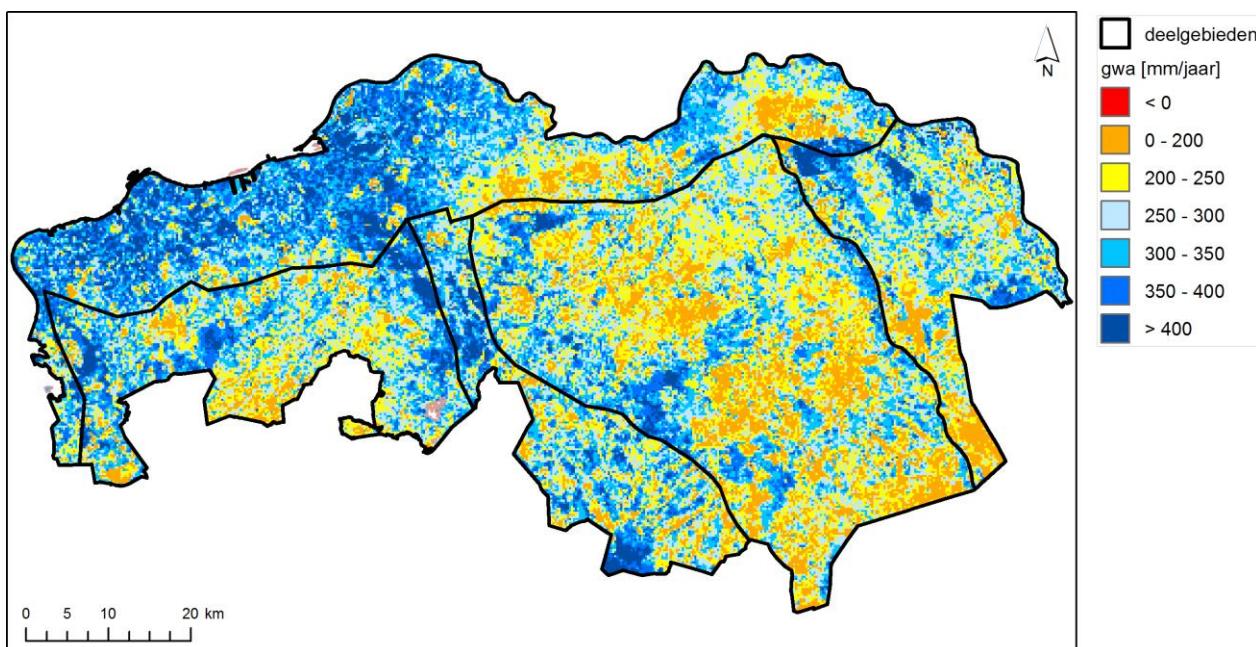
Bij het berekenen van de grondwaternaamvulling is in de tijdsafhankelijke berekening rekening gehouden met veranderingen in grondwaterstand. De dikte van de onverzadigde zone verandert in de tijd en bepaalt de mate van grondwaternaamvulling. De dikte van de onverzadigde zone is berekend als het verschil tussen maaiveldhoogte en berekende grondwaterstand. De hoogteligging van het maaiveld is opgeschaald naar het 250 meter grid als het rekenkundig gemiddelde van de 5 * 5 meter data. De grondwaternaamvulling is voor elke rekentijdstap uit de FLUZO-databank gehaald op basis van de dikte van de onverzadigde zone van de voorafgaande tijdstap. Dit betekent dat de grondwaternaamvulling per modelknooppunt uit een verschillende FLUZOreeks afkomstig kan zijn.

4.10 Berekende grondwaternaamvulling



Resultaat

Het resultaat van de berekende grondwaternaamvulling is gepresenteerd in Figuur 4-8. Deze kaart is verkregen door de berekende grondwaternaamvulling per tijdstap te sommeren per jaar en te middelen over de jaren, voor de periode 2009 t/m 2016.



Figuur 4-8: Berekende gemiddelde grondwaternaamvulling per jaar met aangepaste FLUZO model 2018

De berekende grondwaternaamvulling per landgebruik is in Tabel 4-8 gerangschikt van laag naar hoog. De drie meest voorkomende typen van landgebruik zijn bebouwd gebied, agrarisch gras en mais. Van deze drie types heeft bebouwd gebied relatief het minste grondwaternaamvulling (115 mm/jaar), daarna volgt agrarisch gras (272 mm/jaar) en vervolgens mais (307 mm/jaar).

Tabel 4-8: Berekende gemiddelde grondwaternaamvulling per type landgebruik in Noord-Brabant voor de periode 2009 – 2016

FLUZO code	Landgebruik	Oppervlak		Grondwaternaamvulling (mm/jaar)
		Totaal (100 ha)	Fractie (%)	
17	Bebouwing	673	13.4	115 ³
10	Boomgaard, fruit	95	1.9	223
18	Natuur - moeras	37	0.7	265
4	Agrarisch gras	1593	31.7	272
14	Natuur - gras	189	3.8	276
12	Loofbos	436	8.7	281
2	Overig akkerbouw	264	5.3	282
13	Naaldbos	359	7.1	287
3	Bollen	5	0.1	302
5	Maïs	727	14.4	307
16	Open water	134	2.7	307
7	Bieten	89	1.8	338
8	Aardappelen	179	3.6	354
11	Granen	240	4.8	360
15	Kale grond	9	0.2	445

Beschikbare grondwaternaamvulling op de modelserver

 De berekende grondwaternaamvulling en actuele verdamping zijn bepaald en opgeslagen in de databank in tijdstappen van 5 dagen. Bij het uitlezen van waarden uit de databank zijn wel dagwaarden berekend door de 5-dagwaarden voor de grondwaternaamvulling door een herverdeling op basis van de dagneerslag en verdamping. Deze dagwaarden worden normaal niet gebruikt in het Brabantmodel. Maar indien een berekening op dagbasis nodig is, zijn deze waarden wel beschikbaar. De hoeveelheid neerslag is per uur geregistreerd, maar deze frequentie is niet relevant voor het grondwatersysteem en is daarom niet gebruikt in de berekeningen.

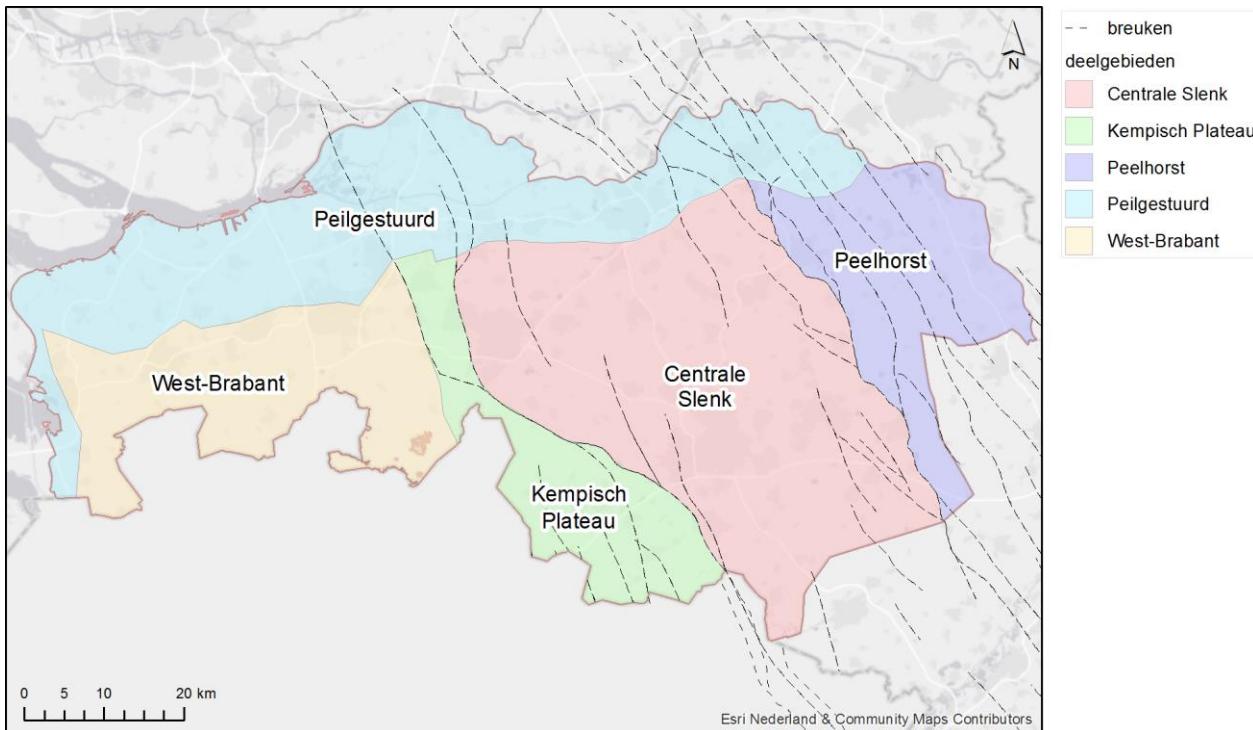
³ Dit is de grondwaternaamvulling voor puur stedelijk gebied. Vaak is stedelijk gebied een mix van groen en stedelijk gebied. De gemiddelde grondwaternaamvulling in stedelijk gebied is 247 mm/jr

5 Ondergrond

5.1 Indeling in vijf deelgebieden



De geologie van Noord-Brabant kan worden beschreven in vijf deelgebieden, die kenmerkend zijn qua geologie en ontwatering (Figuur 5-1).



Figuur 5-1: Indeling in 5 deelgebieden

De vijf geohydrologische deelgebieden kunnen als volgt worden gekenschetst:

- West-Brabant:** aan het oppervlak ligt een dun watervoerend pakket (formaties van Boxtel, Sterksel en Kreftenheyde) met daaronder een slecht doorlatende laag van de kleien van Stramproy/Waalre. Hieronder bevinden zich 2 dikke mariene watervoerende pakketten (Maassluis en Oosterhout), die af en toe door dunne kleiige lagen worden gescheiden. Uit deze twee watervoerende pakketten wordt water gewonnen voor de drinkwatervoorziening;
- Kempisch Plateau:** strekt zich uit van België tot in het zuidelijke deel van Noord-Brabant. Het Kempisch Plateau in het Nederlands deel bestaat uit een 2-lagen systeem. Het bovenste watervoerende pakket wordt gevormd door de Formatie van Sterksel; het onderste door de Kiezeloöliet en Maassluis Formatie.
- Centrale Slenk:** bestaat vooral uit fluviatiele afzettingen van het Rijn-Maas systeem met een diepe hydrologische basis van meer dan 250 meter onder maaiveld. De watervoerende pakketten en scheidende lagen zijn ruimtelijk grotendeels aaneengesloten in de Centrale Slenk. De watervoerende pakketten en slecht doorlatende lagen hebben grote diktes en daardoor hoge transmissiviteit en weerstand. Naar het zuidoosten toe wordt de Kiezeloöliet Formatie geleidelijk minder doorlatend en geeft dus meer weerstand. De meeste weerstand zit in de kleilagen van Waalre/Stramproy. De watervoerende pakketten onder deze laag zijn goed beschermd. Dit wordt daarom in KRW termen "Slenk Diep" genoemd. Aan het oppervlak ligt de Formatie van Boxtel, een heterogene fijnzandige afzetting van ongeveer 20 meter dikte met leem en veenlaagjes.

4. **Peelhorst:** De hooggelegen Peelhorst wordt begrensd door de Peelrandbreuk in het westen en de Grave-breuk in het oosten. Het gebied ten oosten van de Grave-breuk is de Venloslenk en het gebied ten westen van de Peelrandbreuk de Centrale slenk. Het watervoerende pakket is dun en bevat zanden afgezet door rivieren (de formaties van Beegden en Kreftenheye).
5. **Peilgestuurd gebied:** Met afdekkende holocene kleilaag aan het oppervlak. Geologisch gezien loopt de diepe ondergrond van west naar oost en bevat daarom de diepe kenmerken van West-Brabant, Kempisch Plateau, Centrale Slenk en de Peelhorst.



5.2 Databronnen geologie

Voor de geologische opbouw is gebruik gemaakt van vijf databronnen REGISII v2.2, H3O De Kempen, H3O Roerdalslenk, HCOV en Geotop. In het grondwatermodel kunnen vanwege de rekentijd niet alle geologische lagen apart geschematiseerd worden. De geologie in Noord-Brabant is daarom geschematiseerd met 19 modellagen. In de laagopbouw zijn alle geologische lagen in Noord-Brabant opgenomen die beschikbaar zijn. De geohydrologische basis wordt gevormd door de kleien van Breda, Rupel en Boom.

- REGISII v2.2, opgesteld door TNO, is beschikbaar sinds 2017. REGISII v2.2 is gebaseerd op het Digitaal Geologisch Model (DGM). REGISII v2.2 gebruikt set aan booronderzoeken en heeft hetzelfde dekkingsgebied en dieptebereik (tot circa 500 meter) als DGM. In REGIS is voor de gehele ondergrond per geologische laag de ruimtelijke ligging beschikbaar inclusief op welke diepte de laag begint en eindigt. Bovendien zijn geohydrologische parameters afgeleid uit de eigenschappen van de laag en ook in gridbestanden beschikbaar (doorlatendheden en weerstanden). Niet alle ondiepe boringen zijn opgenomen.
- Het model GeoTOP van TNO geeft een gedetailleerd driedimensionaal beeld van de ondergrond van Nederland tot een diepte van maximaal 50 meter onder NAP. In GeoTOP wordt de ondergrond onderverdeeld in miljoenen voxels (cellen) van 100 bij 100 meter in de horizontale richtingen en 50 centimeter verticaal. Aan elke voxel zijn eigenschappen gekoppeld, zoals lithostratigrafische eenheid en grondsoort (lithoklasse), die kenmerkend zijn voor diverse fysische en chemische parameters. Er is gebruik gemaakt van de boorbeschrijvingen in de DINO database, boormonsterprofielen van de Universiteit Utrecht, sonderingen en digitaal kaartmateriaal, zoals geologische kaarten. GeoTOP is alleen beschikbaar voor het Rivierengebied (Figuur 5-1). Voor dit gebied vervangt GeoTOP het holocene in REGIS. De uitbreiding van GeoTOP naar de rest van Noord-Brabant is voorzien voor 2019.
- 'H3O' staat voor het project Hydrogeologische 3D-modellering Ondergrond. In de grensstreek met België wordt gewerkt aan een grensoverschrijdend drie dimensionaal geologisch en hydrogeologisch model. Daarbij zijn verschillen tussen de bestaande (hydro)geologische interpretaties opgespoord, uitgezocht en op elkaar afgestemd. Het model H3O Roerdalslenk is in 2014 (Deckers et al.) gereedgekomen; H3O De Kempen in 2018 (Vernes et al.).
- Voor de laagopbouw in België, buiten de gebieden die door het H3O project worden gedekt, is gebruik gemaakt van data beschikbaar vanuit DOV (<https://dov.vlaanderen.be/dovweb/html/index.html>). Een uitgebreide beschrijving van de geologie van Vlaanderen en de opbouw van de Hydrogeologische Codering van de Ondergrond van Vlaanderen (HCOV) is gerapporteerd bij het maken van het Brabant-Vlaanderen model (Royal Haskoning, 2010). Er is een indeling gemaakt zodanig dat deze het meest recht doet aan de watervoerende en weerstandsbedeende lagen en deze goed aansluiten op de Nederlandse laagopbouw. Met de komst van REGISII v2.2 en H3O is de aansluiting op de Vlaamse lagen beter geregeld in vergelijking met de voorgaande versies. Toch sluit de Vlaamse laagindeling niet overal op



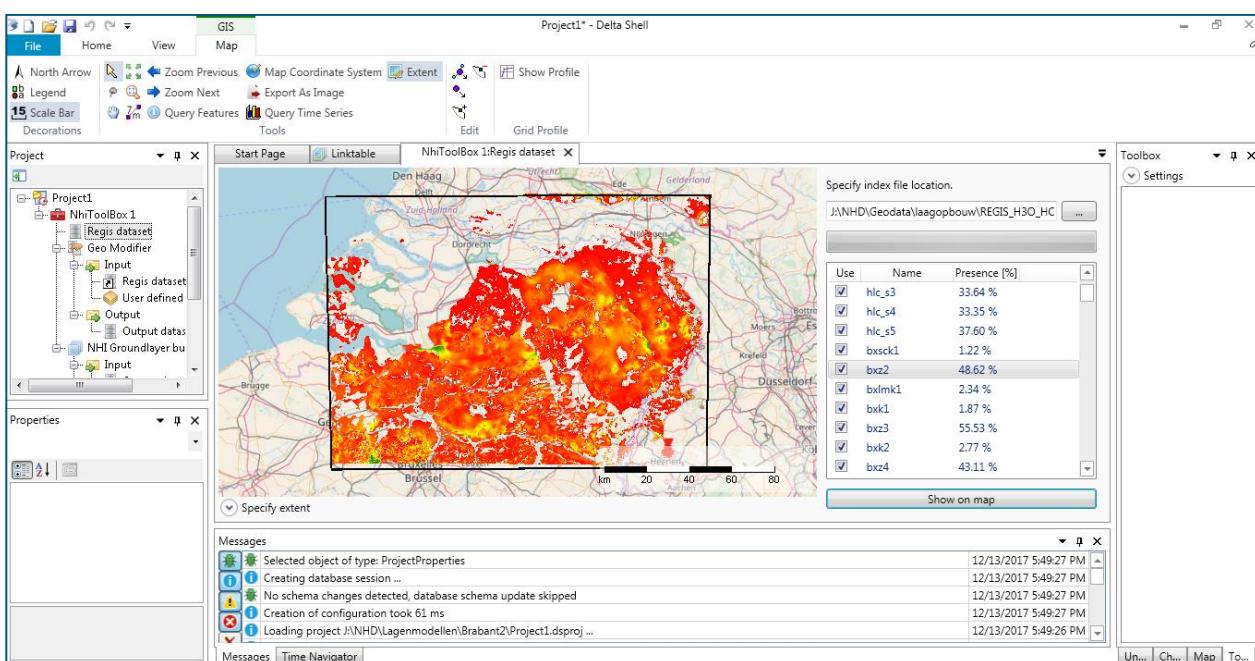
Figuur 5-2: Dekkingsgebied GeoTOP

dezelfde REGIS-lagen aan. Een voorbeeld is de Brabantse Wal. Om dit te verbeteren is een aantal HCOV lagen gesplitst (zie voor een gedetailleerde beschrijving paragraaf 5.4.2).



5.3 NHI Lagentool

Met de NHI-lagentool kan op overzichtelijke en eenvoudige wijze 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. Deze tool werkt generiek en kan ook voor andere geohydrologische modellen in Nederland gebruikt worden. Er is een aparte tutorial en handleiding beschikbaar (RHDHV, 2017a).



Figuur 5-3: Schermvoordebeeld van de NHI lagentool binnen de Deltashell

De NHI-lagentool bestaat uit 3 tabbladen die elk een stap omvatten voor het opstellen van een lagenmodel. De uitvoer van de eerste stap is invoer voor de volgende stap. De links tussen de stappen zijn opgegeven in de NHI-lagentool en kunnen door de gebruiker gewijzigd worden. Het gaat om de volgende drie stappen:

1. Het selecteren van de REGIS basisdata (rasterbestanden van top, basis, kD en C per eenheid) en definiëren van de grenzen waarbinnen het lagenmodel gemaakt gaat worden.
2. De Geomodifier past REGIS aan. Hier kunnen “user defined layers” worden opgegeven die ingebrand worden in REGIS. Deze stap is niet gebruikt in het Brabant 2018 model.
3. Met de NHI Groundlayer builder is vanuit REGIS, c.q. een aangepaste REGIS, een grondwatermodel lagenmodel gemaakt.

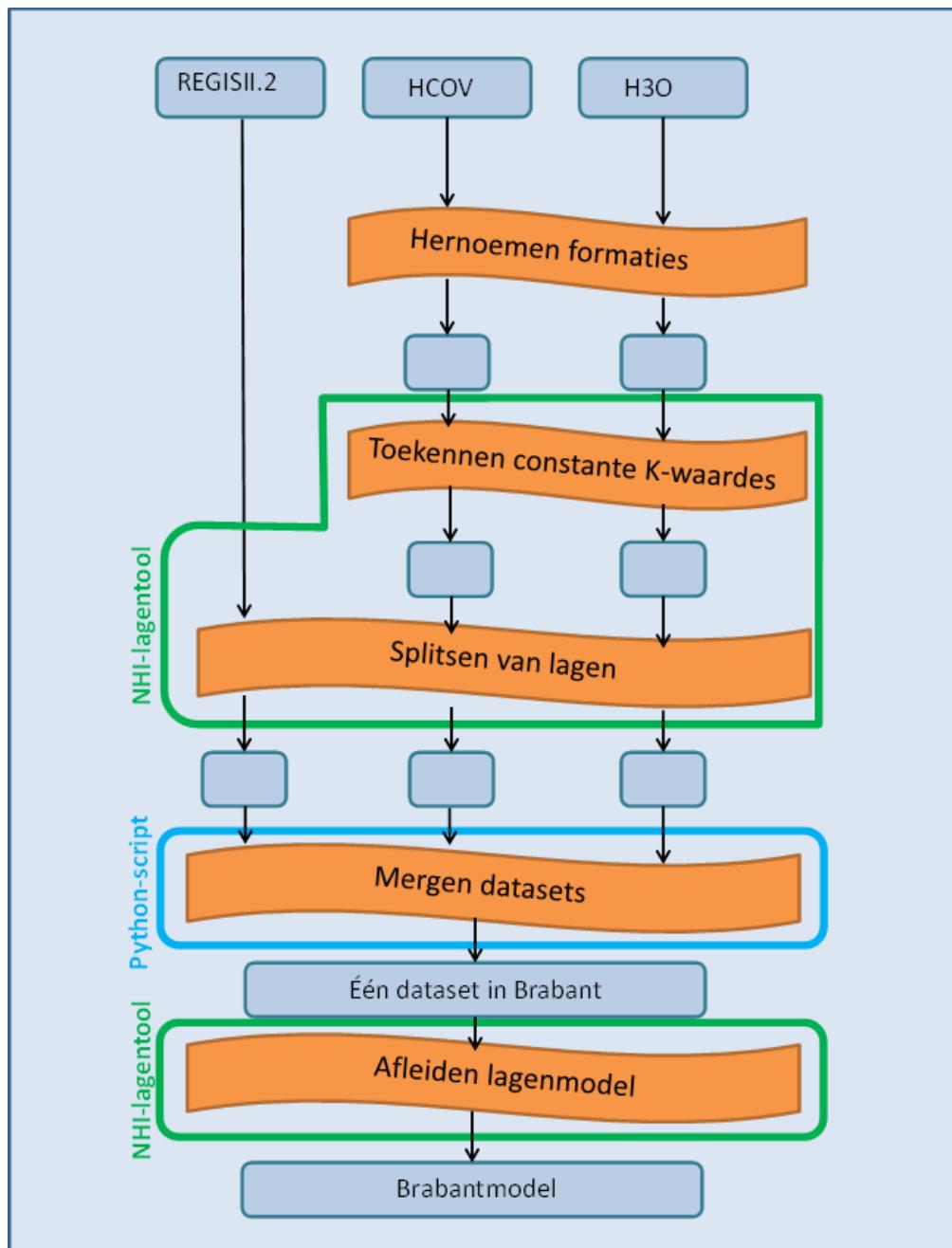
De aangemaakte modellagen kunnen in iMOD bekijken worden in dwarsdoorsnede of bovenaanzicht.



5.4 Lagenopbouw met NHI-tool

Het lagenmodel is in drie stappen opgebouwd (Figuur 5-4).

1. Stap 1 splitsen van formaties en toekennen k-waarden (met NHI lagentool).
2. Stap 2 samenvoegen van de geologische modellen tot geologische basisdatasets.
3. Stap 3 afleiden lagenmodel uit geologische basisdataset (met NHI lagentool).



Figuur 5-4: Technische werkwijze voor samenstellen van het lagenmodel

5.4.1 Hernoemen formaties

De NHI lagentool stelt een aantal eisen aan de naamgeving (zie Bijlage 5). De REGIS lagen voldoen aan deze naamgeving, maar HCOV en H3O niet.

HCOV codering

De HCOV-codering is opgebouwd uit hydrogeologische hoofd-, sub- en basiseenheden (VMM, 2006). HCOV maakt gebruik van nummers per geologische formatie. De hoofdeenheid (eerste twee cijfers) groepeert een opeenvolging van geologische lagen (aquifers en aquitards) die globaal dezelfde hydrologische eigenschappen hebben. Het tweede niveau, de subeenheden, (derde cijfer) geeft het fijnste onderscheid weer tussen watervoerende en afsluitende lagen. Tenslotte staan de hydrogeologische basiseenheden (vierde cijfer) voor een verdere opdeling van de subeenheden in lagen met een herkenbaar verschil in hydrologische eigenschappen, zoals korrelgrootte of hydraulische geleidbaarheid.

Voor de HCOV lagen is het nummer omgezet in een naam die voldoet aan de eisen van de NHI lagentool. In de H3O projecten wordt meestal de REGIS aanduiding gebruikt, maar soms het HCOV nummer. Dit zijn meestal formaties die in REGIS ontbreken.

Voorbeeld

Formatie 221 is een weerstands biedende laag (in REGIS de Waalre klei). Deze formatie is HVk221 genoemd. HV staat voor HCOV, de k geeft aan dat het een kleilaag is en 221 is het HCOV formatie nummer. Formatie 222 is een watervoerende laag (in REGIS de PeizeWaalre zanden) en is hernoemd naar HVz222. Alle formaties die met een nummer worden aangeduid zijn op deze wijze hernoemd.

5.4.2 Stap 1: NHI lagentool

De datasets van REGISII v2.2, HCOV, H3O Roerdalslenk en H3O De Kempen zijn ingelezen in de NHI lagentool. Ontbrekende k-waarden zijn toegevoegd met de NHI-lagentool. In sommige gevallen zijn formaties gesplitst. Dit wordt in deze paragraaf verder toegelicht.

Het tussenresultaat van deze tussenstap zijn vier aparte ondergrondmodellen, gebaseerd op (1) REGISII v2.2, (2) HCOV en (3) H3O Roerdalslenk en (4) H3O De Kempen. Er is dan nog geen lagenmodel gebouwd.

Toekennen ontbrekende k-waarden

In REGIS zijn k-waarden beschikbaar per formatie in gridformaat. Voor HCOV en H3O zijn geen k-waarde grids beschikbaar. Binnen de NHI-lagentool bestaat de mogelijkheid een constante k-waarde op te geven voor een formatie. Dit is voor HCOV en H3O gedaan. De opgegeven constante k-waarden zijn in Bijlage 6 opgenomen. Voor H3O zijn de afgeronde gemiddelde k-waarden toegekend vanuit het REGIS deel van het modelgebied. De gemiddelde REGIS k-waarden binnen het Brabantmodel zijn in Bijlage 7 opgenomen. Dit zijn dus de k-waarden die afgerond aan de in H3O onderscheiden pakketten zijn toegekend (vergelijk Bijlage 7 met Bijlage 6). Indien formaties wel binnen H3O voorkomen maar niet binnen REGIS onderscheiden worden, is de toegekende k-waarde van HCOV gebruikt. De k-waarden uit HCOV zijn gebaseerd op de k-waarden uit het oude Brabantmodel uit 2014.

De lagentool creëert per formatie een grid met k-waarden op de locaties waar deze formatie voorkomt. In Vlaanderen zijn dit dus constante waarden, in Nederland de k-waarde grids uit REGISII v2.2. De k-waarden zijn in het lagenmodel (paragraaf 5.4.4 stap 3) vertaald in kD-waarden voor de watervoerende lagen en in c-waarden voor de scheidende modelllagen.

De constante k-waarden zijn binnen de NHI-lagentool toegekend door in de "linktable" onder k-factor -999 in te vullen en onder het veld "average" de k-waarde die als constante k-waarde is meegegeven op te geven. Indien een formatie een k-waarde grid heeft, is dit automatisch herkend door de NHI-lagentool. Onder factor staat dan 1 en onder "average k" de gemiddelde k-waarde in het grid.

Splitsen van de lagen

Binnen de NHI lagentool kunnen lagen gesplitst worden. In de NHI lagentool is het percentage in dikte opgegeven. Welke lagen gesplitst zijn en welk percentage die lagen hebben gekregen is weergegeven in Bijlage 4: Koppeltabel gebruikte ondergrondmodellen.

Voorbeeld

Het Holoceen (HLC) afkomstig uit REGIS is opgesplitst in 5 lagen. Dit was nodig om het holoceen te koppelen aan de 5 holocene formaties die binnen HCOV onderscheiden worden. Elk van deze gesplitste delen bestaat uit 20% van de dikte (zie Bijlage 4 Koppeltabel gebruikte ondergrondmodellen).

Compleksen zijn gesplitst om watervoerende- en weerstand biedende eigenschappen allebei te kunnen beschrijven.

REGIS lagen die gesplitst zijn:

1. Holoceen (HLC) is gesplitst in 5 lagen omdat in HCOV 5 lagen holoceen worden onderscheiden.
2. Breda (Brz1) is gesplitst in 10 lagen om aan te sluiten op de 9 onderscheiden verschillende lagen in H3O Roerdalslenk en de 4 onderscheiden lagen in H3O De Kempen en de 4 onderscheiden lagen in HCOV.

De volgende HCOV lagen zijn gesplitst:

1. Laag 150 en 160 zijn gekoppeld aan Boxtel zanden: Laag 150 is in tweeën gesplitst en voor 50% aangesloten op BXz2 en voor 50% op BXz3. NB: laag 160 is niet gesplitst en aangesloten op BXz4.
2. Laag 171, 172 en 173 zijn aan de Beegden en Sterksel zanden gekoppeld. Laag 171 is in drieën gesplitst en voor 33% aangesloten op BEz3, voor 33% STz1 en voor 33% op STz2, NB: 173 is aangesloten op BEz1 en 172 is aangesloten op BEz2.
3. Laag 232 en 233 zijn aan de Peize-Waarde zanden en aan de Maassluiszanden gekoppeld. Laag 232 is in tweeën gesplitst en voor 50 % gekoppeld aan PZWAZ4 en voor 50% aan MSz1. Laag 233 is in vieren gesplitst en voor ieder 25 % gekoppeld aan MSz2, MSz3, MSc (het watervoerende deel) en MSz4.
4. Lagen 211 t/m 215 zijn aan de Kiezelooliet zanden en kleien gekoppeld waarbij 215 in tweeën is gesplitst en voor ieder 50% gekoppeld aan Kiz4 en Kiz5. Laag 211 is aan Kiz2, 212 aan kik2 en 213 a kiz3 en 214 aan kik3 gekoppeld.
5. Laag 253 en 254 zijn verder nog gesplitst om te kunnen koppelen met de negen lagen binnen de Formatie van Breda binnen H3O Roerdalslenk.

Binnen de “linktable” in de NHI lagentool is een formatie geselecteerd. Via rechtermuisknop “split” kan de laag opgesplitst worden en kan aan de gesplitste delen een percentage meegegeven worden.

5.4.3 Stap 2: samenvoegen geologische modellen

De vier geologische modellen overlappen elkaar. Voor het samenvoegen (“mergen”) van de IDF’s is gebruik gemaakt van een door RHDVH ontwikkeld Python script inclusief een uitgebreide uitleg (“readme file”). Bij het samenstellen van het samengevoegde bestand is de volgorde aangehouden:

- 1) REGIS.
- 2) H3O Roerdalslenk.
- 3) H3O De Kempen.
- 4) HCOV.

Voorbeeld

Binnen Nederland bestaat het hele geologische model bijna altijd uit REGIS. Buiten Nederland krijgt H3O Roerdalslenk de eerste voorkeur. Uitzondering vormen de diepe lagen behorende tot de Breda formatie in Nederland. Omdat H3O Roerdalslenk hier meer informatie bevat dan REGIS, krijgt H3O Roerdalslenk prioriteit boven REGIS.

Voor het samenvoegen van de lagen is een “mergetabel” opgesteld. In deze tabel is opgenomen welke lagen met elkaar samengevoegd worden. Dit kunnen eventueel gesplitste lagen zijn (Bijlage 4: Koppeltabel gebruikte ondergrondmodellen). Voor de samen te voegen bestanden wordt verwezen naar de output van stap 1. De samengevoegde lagen hebben de namen gekregen van de REGIS dataset (zie Bijlage 4).

5.4.4 Stap 3: afleiden lagenmodel uit geologische basisdataset

De geologische basisset voor het gehele Brabant modelgebied is de invoer voor een nieuw NHI lagenmodel project. In dat NHI-lagenproject is het lagenmodel voor het Brabantmodel gemaakt. Met deze geologische basisdataset kan voor elke locatie binnen het modelgebied een nieuw lagenmodel worden afgeleid.

Met de NHI-lagentool is aangegeven welke ondergrondlagen in welke watervoerende- of scheidende laag ondergebracht worden. De koppeling van grondlagen naar watervoerende- en scheidende lagen is door middel van een linktabel opgegeven in de tool. In Figuur 5-5 is een voorbeeld van de linktabel weergegeven.

In de kolom “Schema 1” worden alle grondlagen apart aan een eigen watervoerende- of scheidende laag toegekend. Watervoerende lagen hebben een positief nummer en scheidende lagen een negatief nummer. Dit geeft 71 modellagen met hiertussen de scheidende lagen. Scheidende laag -2 betekent dat deze laag zich bevindt zich tussen modellaag 2 en 3. In de kolom “Schema2” wordt een keus gemaakt om bepaalde grondlagen samen te voegen in één modellaag. In Figuur 5-5 is als voorbeeld te zien dat de watervoerendheid van het holocene is samengevoegd in modellaag 1 en de weerstand van het holocene in scheidende laag 1 (-1). Het percentage geeft weer op hoeveel oppervlak de betreffende laag binnen de extent voorkomt. Bijvoorbeeld Hlc_s1 komt in 33% van het gebied binnen de opgegeven extent voor.

“Schema 2” is het schema dat het grondwaterlagenmodel oplevert waar uiteindelijk mee gerekend wordt. Hierin bevinden zich 19 modellagen.

The screenshot shows a software interface for managing groundwater models. On the left, a tree view displays project components: Project3Merge, NHIToolBox1, NHI Groundlayer builder, Regis dataset, Linktable, Output, SplitLayerDatasetAquifers, DesignDataset, and ModelLayerDataset. The 'Linktable' node is selected. The main area contains two tables. The top table, titled 'Start Page' and 'Linktable X', lists various layers with their properties: Number, Name, Type, Percentage, Schema 1, Schema 2, Part [-], k factor [-], Average K [m/d], vertical anisotropy factor Kh/Kv [-], horizontal anisotropy factor Kx/Ky [-], and horizontal anisotropy angle [deg]. The bottom table, titled 'Properties', provides a detailed view of the 'Linktable' data, showing the same columns but with more specific values for each layer.

Number	Name	Type	Percentage	Schema 1	Schema 2	Part [-]	k factor [-]	Average K [m/d]
1	hlc_s1	Aquifer	33 %	1	1	1	1.0	5.0153
2	hlc_s2	Aquifer	33 %	2	1	1	1.0	5.0191
3	hlc_s3	Aquifer	34 %	-2	-1	1	1.0	0.0099
4	hlc_s4	Aquifer	33 %	3	1	1	1.0	5.0195
5	hlc_s5	Aquifer	38 %	-4	-1	1	1.0	0.0097
6	bxsck1	Aquitard	1 %	-5	-1	1	1.0	0.0161
7	bxz2	Aquifer	49 %	6	2	1	1.0	6.4473
8	bxmlmk1	Aquitard	2 %	-6	-2	1	1.0	0.0044
9	bxk1	Aquitard	2 %	-7	-2	1	1.0	0.0074
10	bxz3	Aquifer	56 %	8	3	1	1.0	6.2304
11	bxk2	Aquitard	3 %	-8	-3	1	1.0	0.0081
12	bxz4	Aquifer	43 %	9	4	1	1.0	6.2257
13	krwyk1	Aquitard	2 %	-9	-3	1	1.0	0.0183
14	krz2	Aquifer	21 %	10	4	1	1.0	48.8366
15	krk1	Aquitard	0 %	-10	-3	1	1.0	0.0290
16	krz3	Aquifer	22 %	11	4	1	1.0	50.2661
17	bez1	Aquifer	13 %	12	4	1	1.0	86.7669
18	berok1	Aquitard	0 %	-12	-3	1	1.0	0.0173
19	bek1	Aquitard	2 %	-13	-4	1	1.0	0.0237
20	bez2	Aquifer	13 %	14	4	1	1.0	91.5832
21	bek2	Aquitard	1 %	-14	-4	1	1.0	0.0203
22	bez3	Aquifer	19 %	15	4	1	1.0	84.4581
23	wbv1	Aquitard	0 %	-15	-4	1	1.0	0.0043
24	eez1	Aquifer	1 %	16	4	1	1.0	11.9394
25	eez1	Aquitard	0 %	-16	-4	1	1.0	0.0191
26	eez2	Aquifer	1 %	17	4	1	1.0	11.8837
27	eez2	Aquitard	0 %	-17	-4	1	1.0	0.0358
28	eez3	Aquifer	1 %	18	4	1	1.0	12.0586
29	krzuk1	Aquitard	0 %	-18	-4	1	1.0	0.0409
30	krz4	Aquifer	4 %	19	4	1	1.0	55.4555
31	krtwk1	Aquitard	1 %	-19	-4	1	1.0	0.0006
32	krz5	Aquifer	4 %	20	4	1	1.0	48.1477
33	drz1	Aquifer	1 %	21	4	1	1.0	31.2053
34	druik1	Aquitard	0 %	-21	-4	1	1.0	0.0010

Figuur 5-5: Voorbeeld van samengevoegd lagenmodel uit HCOV, H3O en REGIS met in onderste figuur een uitsnede

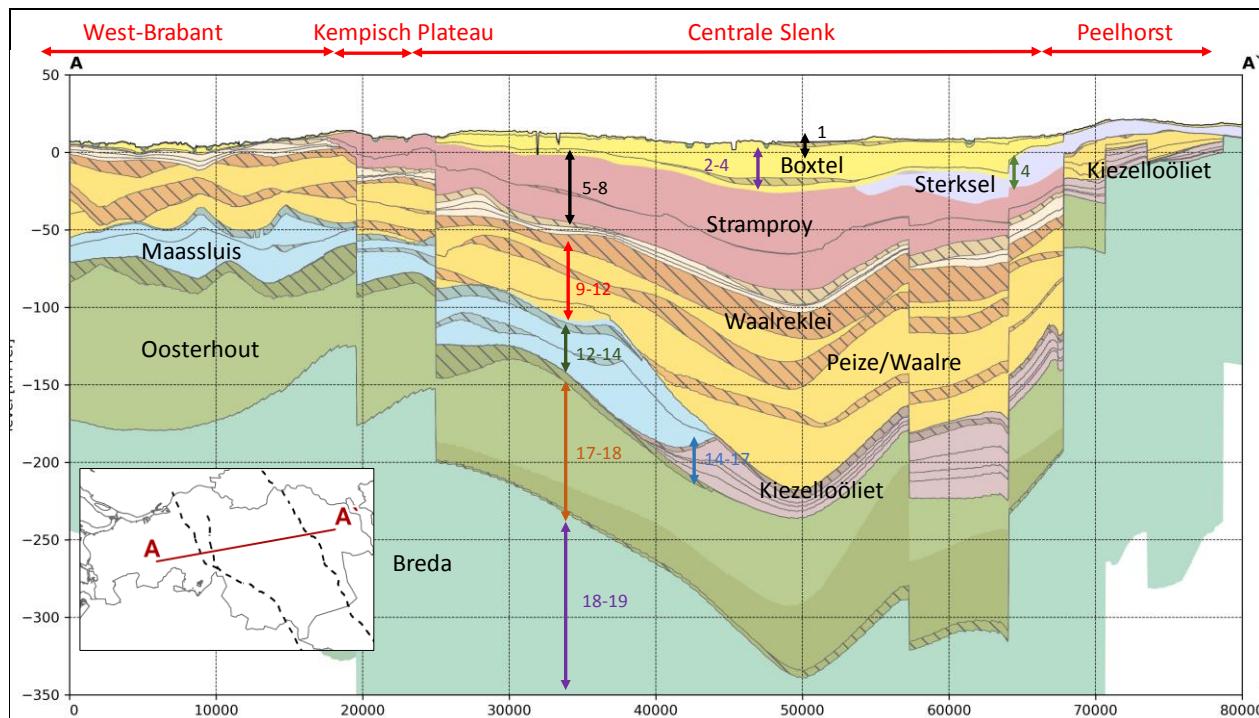
Wanneer de linktabel binnen de NHI-lagentool ingevuld is, kan met deze tool automatisch vanuit het gemaakte lagenmodel in stap 2 de modellagen gecreëerd worden. De lagentool bepaalt ook direct op basis van de opgegeven k-waarden van de grondlagen, de transmissiviteit en weerstand voor de watervoerende en scheidende modellagen. Voor de wijze van toekenning van de k-waarden van de grondlagen wordt verwezen naar paragraaf 5.4.2.



5.5 Resultaat 19-lagenmodel

Het 19-lagenmodel is afgeleid uit de beschikbare geo(hydro)logische ondergrondmodellen: REGISII v2.2, H3O Roerdalslenk, H3O de Kempen en HCOV (zie paragraaf 5.2). Bij het splitsen en samenvoegen van de modellagen is de NHI-lagentool gebruikt (zie paragraaf 5.3 en 5.4). Het nieuwe samengevoegde ondergrondmodel is binnen het gehele modelgebied van het Brabantmodel beschikbaar en vormt de basis voor de modellagen. De naamgeving van REGIS is hierin als leidend genomen (laatste kolom in Bijlage 4). De 102 lagen zijn verdeeld over 19 modellagen (Figuur 5-6). Hiervoor is een koppeltabel beschikbaar die als Bijlage 4 van dit rapport is opgenomen. De koppeling met REGISII v2.2 voor Nederland is opgenomen in Tabel 5-1.

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.



Figuur 5-6: Geologisch lagenmodel van west naar oost. Voor de Centrale Slenk is weergegeven hoe de REGIS lagen in 19 modellagen verdeeld zijn

Tabel 5-1: Koppeltabel 19-lagenmodel en REGISII v2.2

model	Enheden REGISII v2.2	
laagnummer	watervoerend	slecht doorlatend
1	hlc	hlc, bxsck1
2	bxz2	bxlmk1, bxp1
	bxz3	bxk2, krwyk1, krk1
4	bxz4, krz2, krz3, bez1, bez2, bez3, eez1, eez2, eez3, krz4, krz5, drz1, drz2, drz3, dtc, dnz1, urz1, urz2, urz3, urz4, urz5, stz1	
		berok1, bek1, bek2, wbv1, eek1, eek2, krzuk1, krtwk1, druk1, drgik1, urk1, stk1
5	stz2, syz1	syk1
6	syz2	syk2
7	syz3	syk3
8	syz4, pzwaz1	wak1
9	pzwaz2	wak2
10	pzwaz3	wak3
11	pzwaz4, msz1	msk1
12	msz2	msk2
13	msz3, msc, msz4, kiz1	kik1
14	kiz2	kik2
15	kiz3	kik3
16	kiz4	kik4
17	kiz5, ooz1	ook1
18	ooz2, ooc	ooc, iek1, iek2, brz1*
19	iez2, iez3, brz1*	

*) bevat meerdere eenheden uit H3O Roerdalslenk

5.6 Aansluiting op België en Duitsland



REGIS en H3O

In REGISII v2.2 is de Formatie van Breda veel beter geschematiseerd mede dankzij de H3O-studies. Door H3O Roerdalslenk en de Kempen naast REGISII v2.2 te gebruiken is de koppeling met Vlaanderen veel beter geworden. Dit geldt voor het oostelijk gedeelte van het model, waar de Formatie van Breda ook in de Centrale Slenk in het model is opgenomen (vergelijk Figuur 5-7 en Figuur 5-8). In het westelijk deel van de provincie is nog geen H3O studie beschikbaar en is de landsgrens nog steeds als een harde overgang zichtbaar.



Formatie van Breda in Vlaanderen en Nederland

De Formatie van Breda was in REGIS II.1 niet opgenomen in de Slenk en West-Brabant. Daarom was deze laag nog niet opgenomen in het 2014 model. Bovendien was er vaak een scherpe overgang van Breda-zand naar Breda-klei geschematiseerd, terwijl die er in werkelijkheid niet is. De Formatie van Breda bevat een opeenvolging van slecht doorlatende klei-afzettingen en doorlatende zandige afzettingen. In Vlaanderen komt de laag minder diep voor en is het een belangrijke laag waar ook drinkwaterwinningen in voorkomen. De manier waarop de formatie in Nederland was geschematiseerd maakte de koppeling met Vlaanderen lastig. Bij het Brabant 2014 model is gebleken dat bij de Brabantse Wal door de manier van interpoleren in REGISII.1 (extrapolatie naar de landsgrens toe) de lagen niet goed aangesloten op de lagen van HCOV.



Gemaakte verbeteringen in aansluiting Formatie van Breda

De laagopbouw van REGISII v2.2 en H3O zijn grotendeels gelijk. In de H3O is de Formatie van Breda in meer lagen opgesplitst. Bij het samenvoegen van de verschillende bronnen heeft REGISII v2.2 voorrang gekregen. Dit geldt niet voor de Formatie van Breda. Hier is H3O leidend en geldt een andere voorkeursregel.



Aansluiting Poederlee/Kasterlee op Kiezeloöliet Formatie

De Belgische Formatie van Poederlee/Kasterlee (HCOV 0234) is in 4 delen gesplitst en aangesloten op de zanden van de Kiezeloöliet Formatie (modellaag 14, 15, 16, 17) en de Formatie van Inden (modellaag 17 in de Roerdalslenk). Dit geeft een goede aansluiting van HCOV op H3O Roerdalslenk (bij de Feldbiss) en H3O de Kempen. Op de landsgrens, op het Kempisch plateau, is er nog een scherpe overgang te zien bij de overgang H3O de Kempen / REGIS.



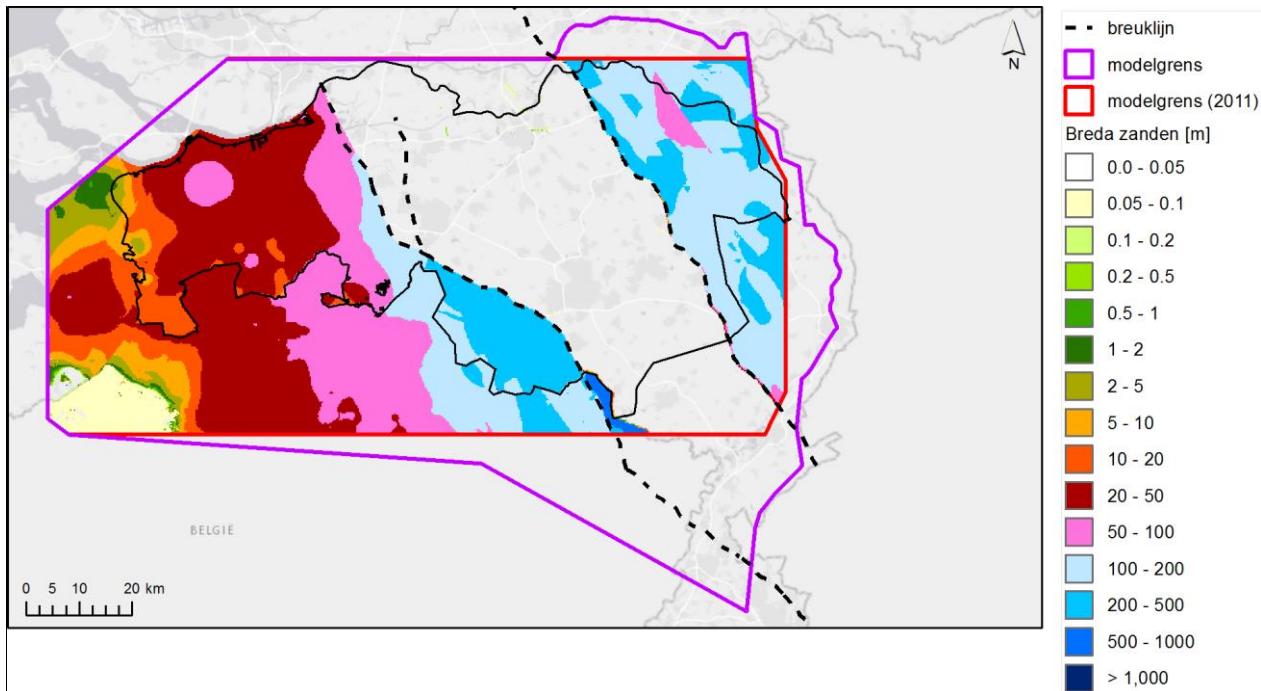
Aansluiting Kattendijk op Oosterhout Formatie

De Belgische Formatie van Kattendijk (HCOV 251) is aangesloten op de zanden van de Formatie van Oosterhout (modellaag 18). Dit geeft een goede aansluiting in West-Brabant. Dit geeft wel een sprong in kD omdat de transmissiviteit aan de Belgische kant lager uitvalt.

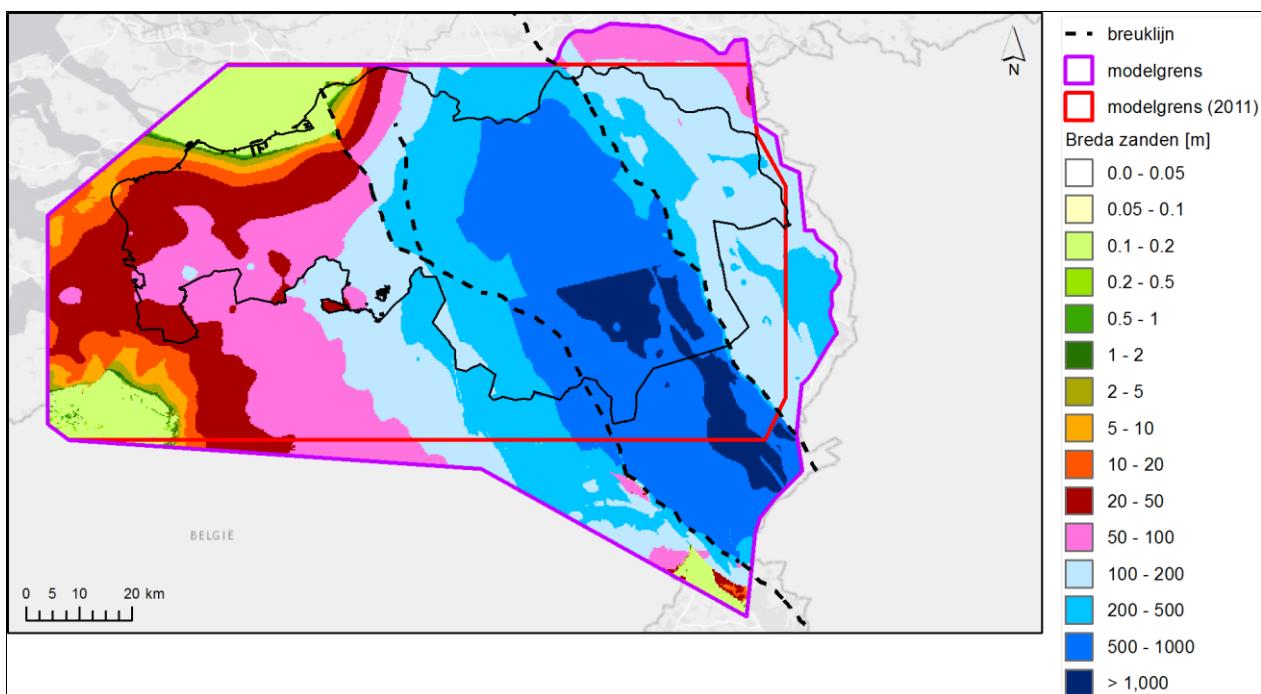


Roerdalslenk in Duitsland

Ten oosten van Sittard ligt de Roerdalslenk gedeeltelijk in Duitsland. Voor dit gebied zijn REGIS en H3O Roerdalslenk niet beschikbaar. Het enige ondergrondmodel dat hier dekking heeft is het Vlaamse HCOV. In de diepere ondergrond (vanaf modellaag 6) wijkt de kD volgens HCOV sterk af van de omliggende waarden uit H3O Roerdalslenk. Omdat de berekende stijghoogten in de slenk afhankelijk zijn van de flux vanaf de zuidrand, is ervoor gekozen om HCOV vanaf laag 6 te vervangen door constante kD waarden die goed aansluiten bij de omliggende waarden uit REGIS II v2.2 en H3O Roerdalslenk. De gekozen waarden zijn gegeven in Bijlage 9.



Figuur 5-7: Dikte van Breda zanden in Brabantmodel 2014



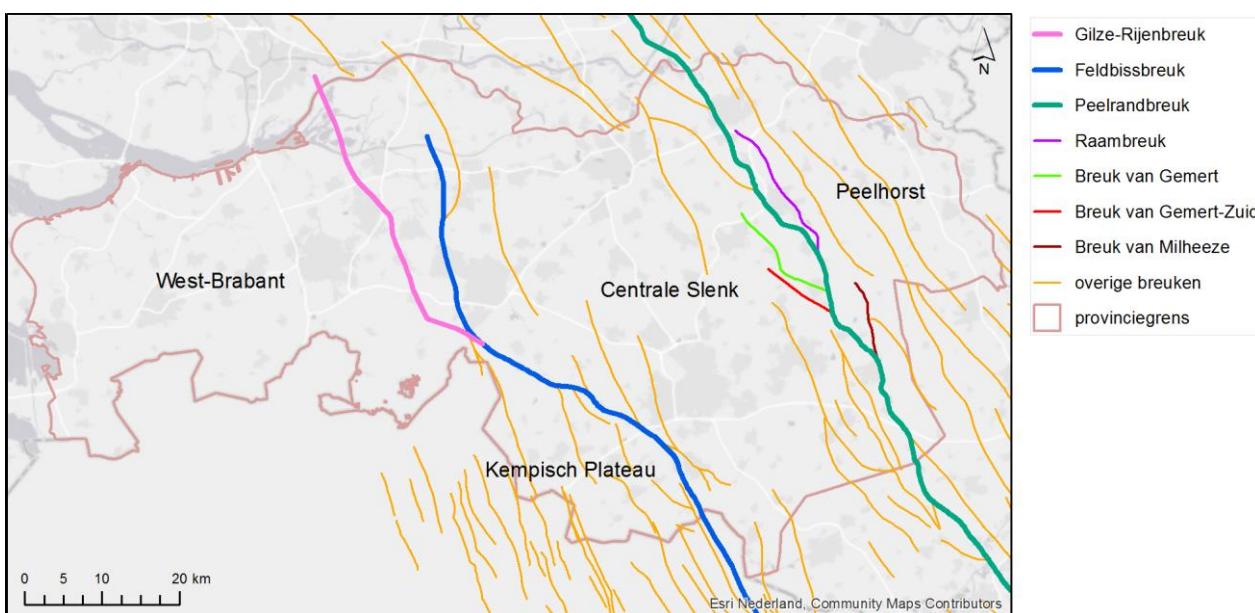
Figuur 5-8: Dikte Breda zanden in Brabantmodel 2018

5.7 Breuken



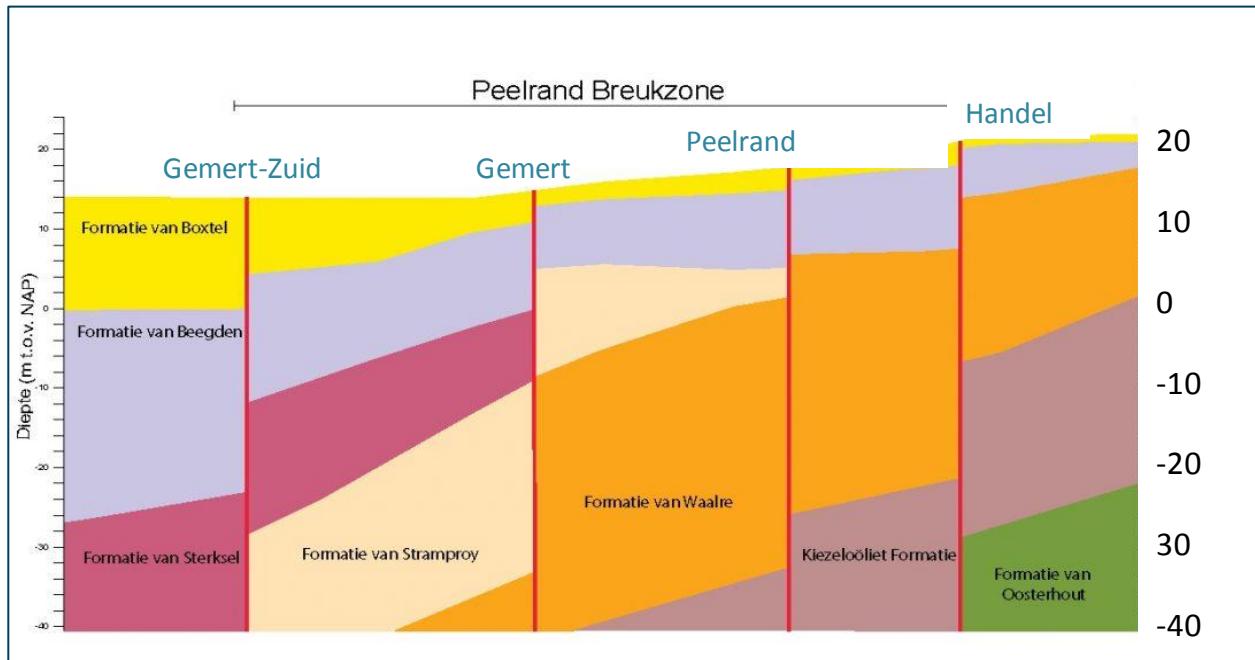
Invloed van breuken op de grondwaterstroming

In Noord-Brabant ligt een aantal geologische breuken. Ze zijn onderdeel van een breukensysteem dat zich uitstrek van het Rijndal tot ver in de Noordzee. De belangrijkste breuken zijn de Gilze-Rijen-, de Feldbiss- en de Peelrandbreuk (zie Figuur 5-9). De Feldbiss sluit in het noordwesten aan op de Gilze-Rijenbreuk. De Peelrandbreuk heeft diverse zijbreuken zoals de Breuk van Gemert, de Breuk van Gemert-zuid en de Breuk van Milheeze. Het gaat dus eigenlijk om een brede zone met meerdere breuken. Langs de breuken vinden verticale verschuivingen van de aardkorst plaats van soms wel honderden meters, waardoor ook aan het aardoppervlak een hoogteverschil is ontstaan. Het lage deel wordt een slenk (Centrale Slenk) genoemd, het hogere deel een horst (Peelhorst en Kempisch Plateau). Ooit waren de hoogteverschillen aan maaiveld groter dan nu, maar door erosie en sedimentatie zijn de verschillen verkleind. Onder de grond sluiten de lagen in de ondergrond soms niet of niet meer volledig op elkaar aan. Een verspringing van een kleilaag kan zorgen voor extra weerstand tegen stroming tussen twee zandlagen die zonder breukwerking niet had bestaan (versmering). Maar het is ook mogelijk dat verschillende watervoerende lagen met elkaar in contact komen. Dit principe is toegelicht met als voorbeeld de breukzones in de omgeving van Gemert-Bakel (Figuur 5-10). Beide hebben invloed op de grondwaterstroming. Behalve de hoofdbreuken is er een groot aantal kleinere breuken gekarteerd (Figuur 5-9). Deze hebben weinig of geen invloed op de regionale grondwaterstroming.

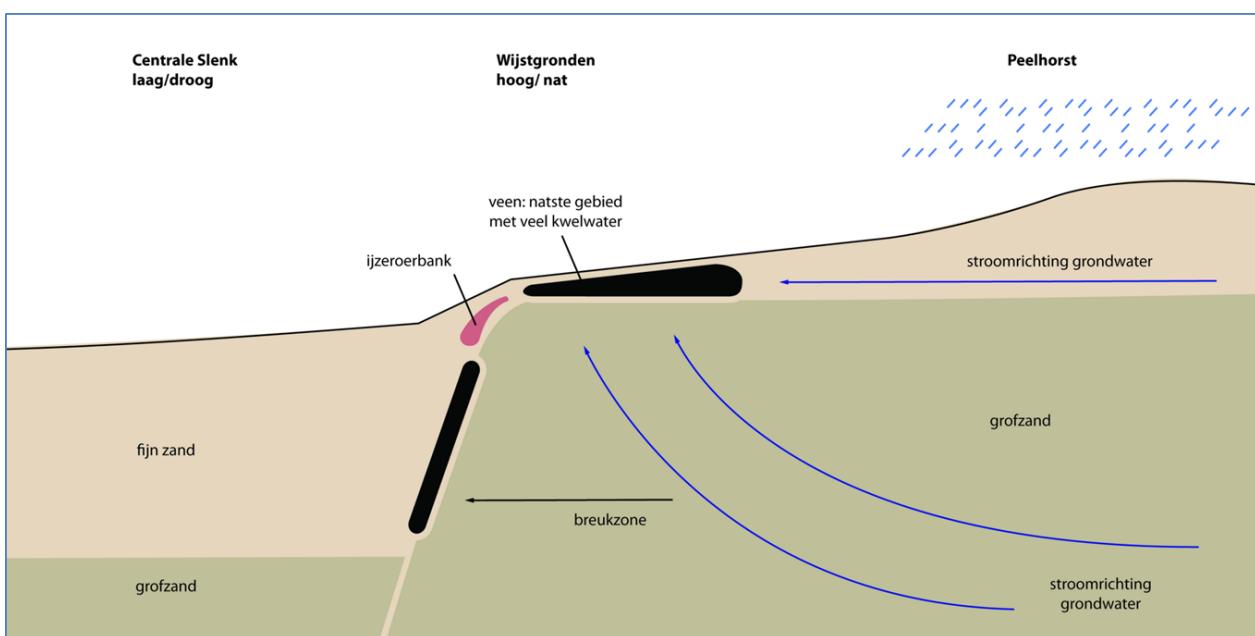


Figuur 5-9: Ligging breuken

Ten oosten van de Peelrandbreuk liggen de wijstgronden op de overgang naar de lager gelegen Centrale Slenk (Figuur 5-11). Het regenwater dat in de hooggelegen rug van de Peelhorst infiltrert stroomt als grondwater in westelijke richting. Op het breukvlak wordt de doorstroming bemoeilijkt door ondoorlatende lagen waardoor het als kwel aan de oppervlakte verschijnt. Anders dan je zou verwachten zijn de hoge gronden dus nat en blijven de lagergelegen gronden droog. Deze bijzondere vorm van kwel heet wijst. De Raambreuk ligt op de Peelhorst en vormt zo een lokale horst binnen de regionale Peelhorst.



Figuur 5-10 Dwarsdoorsnede door de ondergrond van Gemert (West) naar Bakel (Oost) met de namen van de breuken. Bron: TNO-Geologische Dienst Nederland, juli 2014



Figuur 5-11: Grondwaterstroming over de Peelrandbreuk ter plekke van de Wijstgronden



Breuken in REGIS en H3O

Oorspronkelijk waren In REGIS geologische breuken opgenomen als lijnen gebaseerd op seismisch onderzoek. Door nieuw seismisch onderzoek kon de ligging van breuken beter bepaald worden. In het H3O project zijn breuksegmenten geïnterpreteerd op 2D-seismische lijnen en geprojecteerd in een 3D-model. In het H3O project is het breukenbestand verbeterd aan de hand van de meest actuele breukenkaarten, inclusief Vlaanderen, seismische data en 3D modellering.

De ligging van de breuken op de Horst (ten oosten van de Peelrandbreuk) is veranderd ten opzichte van REGIS II.1 en opgenomen in REGISII v2.2. De recente aanpassingen aan de Peelrandbreuk rond Gemert / Bakel en in de Slenk uit H3O zijn nog niet verwerkt in het Digitaal Geologisch Model van REGISII v2.2. Alleen de aanpassingen opgenomen in REGISII v2.2 zijn verwerkt in het nieuwe Brabant model. Andere verbeteringen kunnen doorgevoerd worden in een nieuwe versie van het model na 2018.

In het Brabantmodel 2018 is voor Nederland van de REGISII v2.2 en voor Vlaanderen van H3O informatie uitgegaan. Bij de laagopbouw is ook gebruik gemaakt van deze lijnen. De ligging van de breuken weergegeven in Figuur 5-9 is gebaseerd op lijnbestanden (shapefiles) afkomstig uit REGISII v2.2 (Nederland) en H3O (Vlaanderen en Duitsland).



Breuken in het model

De werking van de breuk is ingevoerd met een weerstandswaarde. Hiermee sluiten we aan bij de methodiek in de iMOD-modellen. De weerstand is voor het Modflow grondwatermodel omgerekend naar een reductie van het doorlaatvermogen ter plaatse van de breuk. Hiervoor is de tool (allocator) binnen Triwaco aangepast. In het Brabant model is de breuk verwerkt in een cel van 250 meter breed. De werking van de breuk is daarom uitgesmeerd over een zone van 250 meter. De horizontale onzekerheid voor de positie van een breuksegment is in werkelijkheid circa 10 tot 250m, maar kan oplopen tot een kilometer in geval de seismische data beperkt informatie geeft (Deckers et. al. 2014).

De weerstand per modellaag (i) is omgezet naar een kD -waarde voor de breuk met de volgende formule:

$$kD \text{ breuk}(i) = \frac{\text{cellgrootte} * (\text{top}(i) - \text{bot}(i))}{\text{breukweerstand}(i)}$$

Een beperking van het gehanteerde breukenconcept is dat er geen contact gemaakt kan worden tussen verschillende watervoerende lagen die via de breuk op elkaar aansluiten. Bij de Peelrandbreuk is dit geen probleem, want die zit geheel dicht. Langs de Feldbiss is de verschuiving relatief gering en speelt dit ook niet of beperkt. In Vlaanderen is de verschuiving langs de Feldbiss groter, maar daar zit de breuk dicht.



Bepaling van breukweerstand

De weerstandsgebiedende werking van de breuken kan worden afgeleid uit stijghoogteverschillen in de ijkdataset. Deze laten het volgende zien:

- Peelrandbreuk. In de Waalre zanden bedraagt het gemeten stijghoogteverschil over de breuk 5 tot 10 m (Figuur 5-12, links). Ondieper, in de Sterksel zanden, bedraagt het stijghoogteverschil circa 5 m. De Peelrandbreuk heeft een weerstandsgebiedende werking tot aan maaveld (Figuur 5-11).
- Feldbissbreuk. In de Oosterhout en Breda zanden is in het zuiden een stijghoogteverschil van circa 5 m zichtbaar. Ter hoogte van Tilburg neemt het stijghoogteverschil af. Ondiep is enkel in het zuiden een stijghoogteverschil van een paar meter zichtbaar.
- Over de Gilze-Rijen breuk is geen stijghoogteverschil zichtbaar.

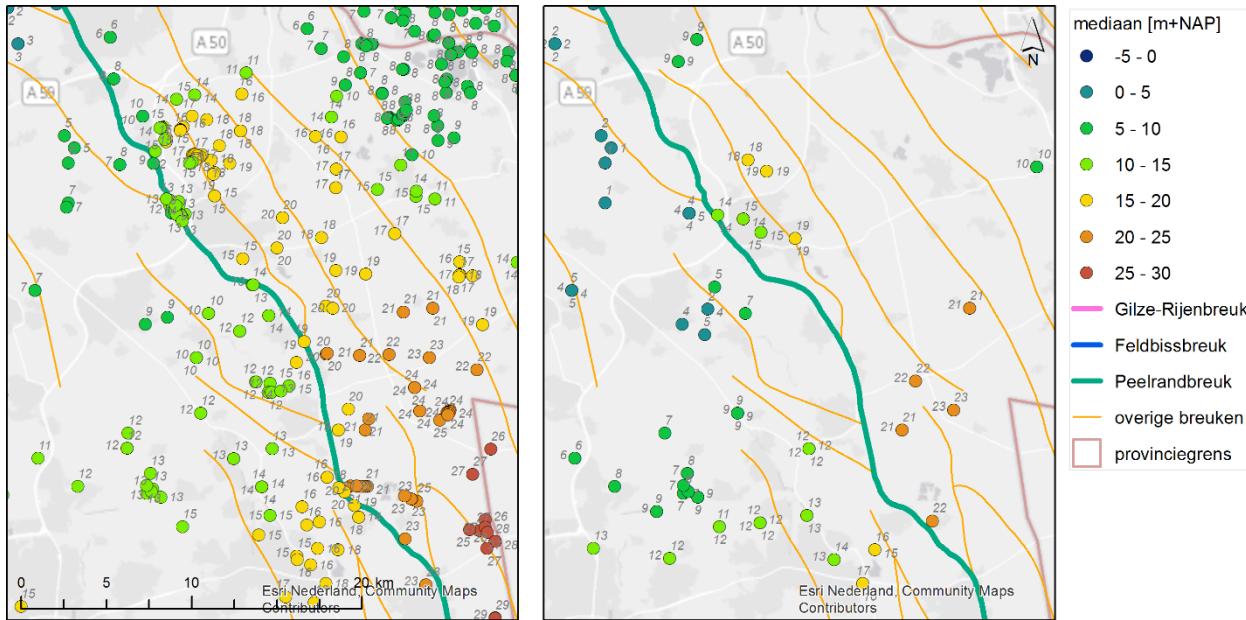
Bij de start van de kalibratie is gebruik gemaakt van de eerder naar weerstanden omgerekende factoren in het Brabant model (versie 2014). De Peelrandbreuk zat dan vrijwel dicht. De Feldbissbreuk kreeg ten zuiden van

het Kempisch Plateau in de diepere lagen (vanaf Oosterhout) een hoge weerstand. De Gilze-Rijenbreuk kreeg geen weerstand.

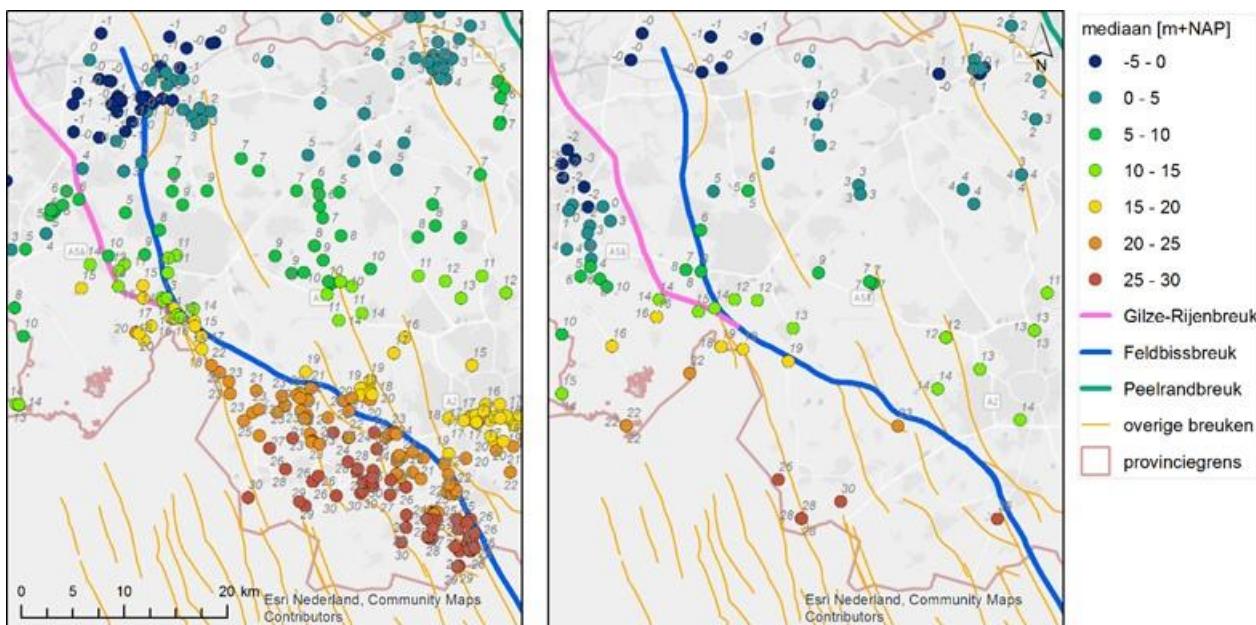


Controle en aanpassing breukweerstanden

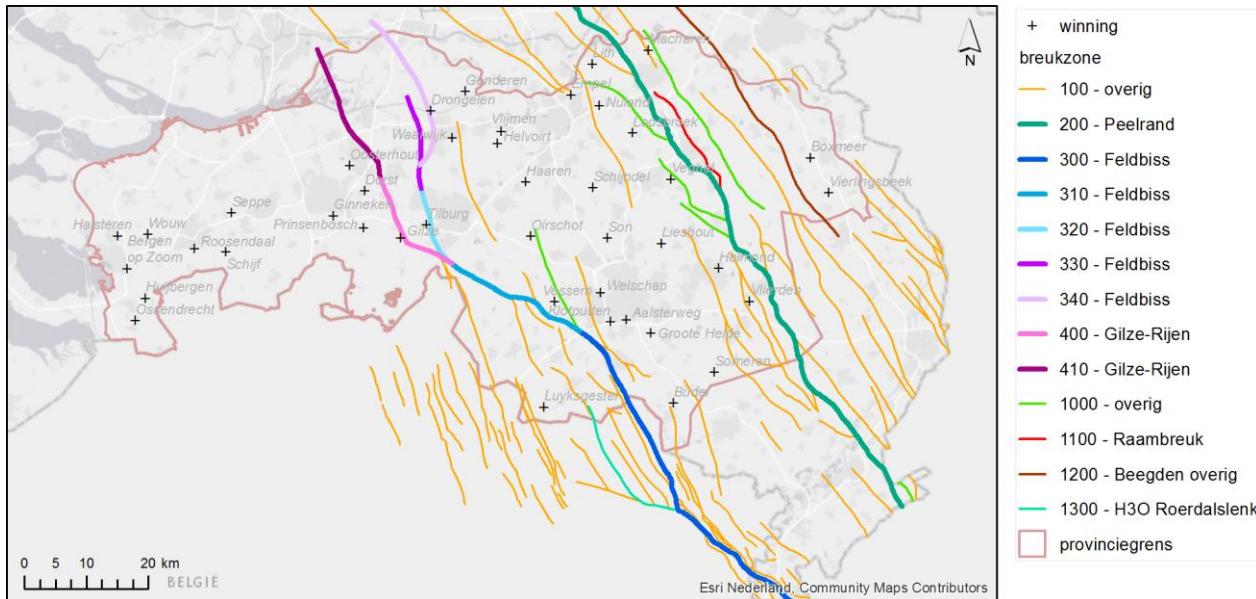
De toegekende weerstanden van de hoofdbreuken en de kleinere breuken zijn waar nodig aangepast in de kalibratie. Ten behoeve van de parametrisatie zijn de breuken opgedeeld in zones, zie Figuur 5-14. De Peelrandbreuk is in één zone opgenomen. De Feldbiss en Gilze-Rijen breuk zijn opgedeeld in segmenten, omdat de weerstand van de breuk regionaal verschilt. Van de overige breuken zijn de breuken die tot in de Boxtel en de Beegden formaties aanwezig zijn, in een aparte zone gezet. De weerstandswaarden voor de breuken (Tabel 5-2) zijn bepaald op basis van kennis die is toegepast in eerdere modellen en aanpassing na kalibratie.



Figuur 5-12: Gemiddeld gemeten stijghoede over periode 2009 t/m 2016 rond de Peelrandbreuk in de Formatie van Sterksel (links) en Waalre zanden (rechts)



Figuur 5-13: Gemiddeld gemeten stijghoede over periode 2009 t/m 2016 rond de Feldbiss in de Formatie van Sterksel (links) en Waalre zanden (rechts)



Figuur 5-14: breukzones in het Brabantmodel2018

De **Peelrandbreuk** is mogelijk niet geheel dicht tot aan het maaiveld. Voor deze breuk is een weerstand van 10.000 dagen aangenomen tot in de bovenste modellaag (zone 200). Wanneer de Peelrandbreuk in de bovenste twee modellagen wordt opengelaten geeft dit een lekstroom over de breuk. Dit heeft een heel klein effect op het modelresultaat. Het maakt dus weinig uit hoe de Peelrandbreuk in het bovenste gedeelte gemodelleerd wordt.

Op basis van kennis uit eerdere modelleringen is bekend dat de **Feldbissbreuk** bij Tilburg nog vrij doorlatend is, maar ter hoogte van Eindhoven de diepere pakketten goed afsluit. De breuklijn ertussen is in een aantal zones verdeeld. Vanaf de zuidrand van het model tot Eindhoven (zone 300) krijgt de Feldbissbreuk een weerstand van 5.000 dagen vanaf Waalre klei 1 tot Oosterhout zanden (laag 9 t/m 16) en een weerstand van 10.000 dagen van Oosterhout tot de hydrologische basis (laag 17 t/m 19). Tot Tilburg (zone 310) is een weerstand van 500 dagen aangehouden vanaf Waalre klei 1 tot aan de hydrologische basis (laag 17 t/m 19). Verder naar het noorden is geen breukweerstand ingevoerd (zone 320, 330, 340).

Bij de **Gilze-Rijen** breuk (zone 400 en 410 in Figuur 5-14) was wel een stijghoogteverschil zichtbaar, maar gaf het toevoegen van meer weerstand een slechter modelresultaat. De breukweerstand is daarom niet aangepast.

Voor de Raambreuk en een breuk meer naar het oosten op de Peelhorst is een weerstand van 500 dagen in de diepere lagen (vanaf modellaag 5) toegekend. Voor de overige **kleine breuken** was er geen aanwijzing voor meer weerstand. Met detailstudies kan hier wellicht wel meer over worden gezegd.

Tabel 5-2: Breukweerstand per breukzone

Breukzone	Lagen	Breukweerstand [Dagen]
100 - overig	1 - 19	1*
200 - Peelrand	1 - 19	10.000
	1 - 8	1000
300 - Feldbiss	9 - 16	5.000
	17 - 19	10.000
310 - Feldbiss	1 - 8	1
	9 - 19	500
320 - Feldbiss	1 - 19	1
330 - Feldbiss	1 - 19	1
340 - Feldbiss	1 - 19	1
400 - Gilze-Rijen	1 - 19	1
410 - Gilze-Rijen	1 - 19	1
1000 – Boxtel overig	1 - 19	1
1100 – Raambrek	1 - 4	1
	5 - 19	500
1200 – Beegden overig	1 - 4	1
	5 - 19	500
1300 – H3O Roerdalslenk	1 - 8	1
	9 - 19	500

*) bij een breukweerstand van 1 dag geldt de oorspronkelijke watervoerendheid van het pakket.

5.8 Eigenschappen ondergrond



Modelconcept

Aan de lagen in het geohydrologisch model zijn waarden toegekend aan de doorlatendheid en weerstand. Er is uitgegaan van de k-waarden beschikbaar in REGISII v2.2. De weerstanden en transmissiviteit van de geologische lagen zijn per modellaag gesommeerd om tot een weerstand of transmissiviteit van de modellaag te komen (Bijlage 7). Voor H3O Roerdalslenk, H3O de Kempen en HCOV zijn constante k-waarden aangenomen per modellaag4 (Bijlage 6). Deze waarden worden aangepast na kalibratie, wanneer nodig.

Naamgeving: Boxtelklei versus Brabanteleem

De Formatie van Boxtel is een heterogene formatie met fijnzandige afzettingen die dagzomen in de Centrale Slenk. Binnen de Formatie van Boxtel komt zowel het Laagpakket van Liempde (eolische en verspoelde eolische afzettingen, löss) als het Laagpakket van Best voor (overstromingsleem, afgewisseld met zandige eolische en beekafzettingen). De twee laagpakketten zijn duidelijk verschillende eenheden. De term Boxtelleem kan verwarringen werken, omdat niet alle lagen uit leem bestaan. Daarom wordt de naam Boxtelklei gebruikt.



Boxtelklei in REGIS en het model

In REGISII v2.2 zijn meer ondiepe boringen opgenomen ten opzichte van REGIS II.1. De weerstand is bepaald door het voorkomen van de slecht doorlatende leemlaagjes behorende bij de Boxtel formatie. Deze leemlaagjes kennen een grote ruimtelijke variabiliteit. Daarom is de weerstand van laag 2 en 3 binnen de Provincie Noord-Brabant gebaseerd op een interpretatie van alle beschikbare boringen uit Dinoloket. Voor het afleiden van de doorlatendheid is met de boringentool (Pythontool) de mediaanklasse van de korrelgrootte uitgelezen. Wanneer deze niet beschikbaar is, is de mediaanklasse bepaald uit de zandmediaan (als die er wel is). De betrouwbaarheid van de boring is niet meegewogen.



Bepaalde weerstand Boxtelklei

In het model is de weerstand van deze leemlagen verwerkt in de modellagen SDL2 en SDL3. De Boxtelklei is niet volledig in REGISII v2.2 verwerkt, omdat TNO alleen een selectie aan boringen gebruikt heeft. Om een zo goed mogelijk beeld te krijgen zijn alle boringen uit Dinoloket opgevraagd en verwerkt in het model. Per meter klei of leem is een weerstand aangenomen. Hierbij is de volgende methode gehanteerd, weergegeven in Figuur 5-15:

- Per boring is de dikte van weerstandsgebiedende lagen gesommeerd binnen aaneengesloten diepte-intervallen. Voor de slecht doorlatende lagen van het model loopt het dieptetraject van het midden van de boven liggende watervoerende laag tot het midden van de watervoerende laag eronder. In het voorbeeld van Figuur 5-15 geeft de dikte i2 het diepteniveau weer waarover de weerstand van SDL2 wordt bepaald. En op eenzelfde manier geldt de dikte i3 voor de weerstand van SDL3 tot een bepaalde diepte binnen WVP 4.
- Per grondsoort is de dikte ruimtelijk geïnterpolateerd (met inverse distance methode).
- Het resultaat is een tabel met verticale doorlatendheden per grondsoort (Tabel 5-3) omgerekend naar een weerstand per grondsoort. Deze doorlatendheden zijn overgenomen uit de vorige versie van het Brabantmodel (2014). Ook de doorlatendheid van uiterst fijn en zeer fijn zand is meegenomen bij het bepalen van de weerstand, omdat deze lagen ook weerstand geven.

4

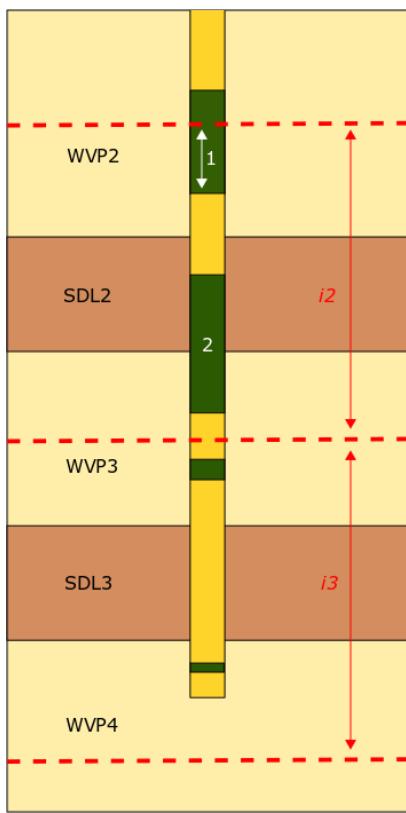
https://www.dinoloket.nl/sites/default/files/file/dinoloket_toelichtingmodellen_20131210_01_rapport_nitg_05_038_b0115_netversie.pdf#overlay-context=meer-weten-over-regis-ii

- De weerstanden per grondsoort worden gesommeerd, waarna de som wordt begrensd met een minimumwaarde van 1 dag.

In het voorbeeld in Figuur 5-15 wordt geïllustreerd hoe de weerstand van SDL2 is berekend. De weerstand wordt gevormd door 1 meter kleilaag binnen WVP 2 en 2 meter klei aan de onderkant van het pakket. Deze dikte is ruimtelijk geïnterpoleerde en omgerekend naar een weerstand met behulp van Tabel 5-3. Voor SDL3 is dezelfde methode toegepast.

Tabel 5-3: Verticale doorlatendheden per grondsoort

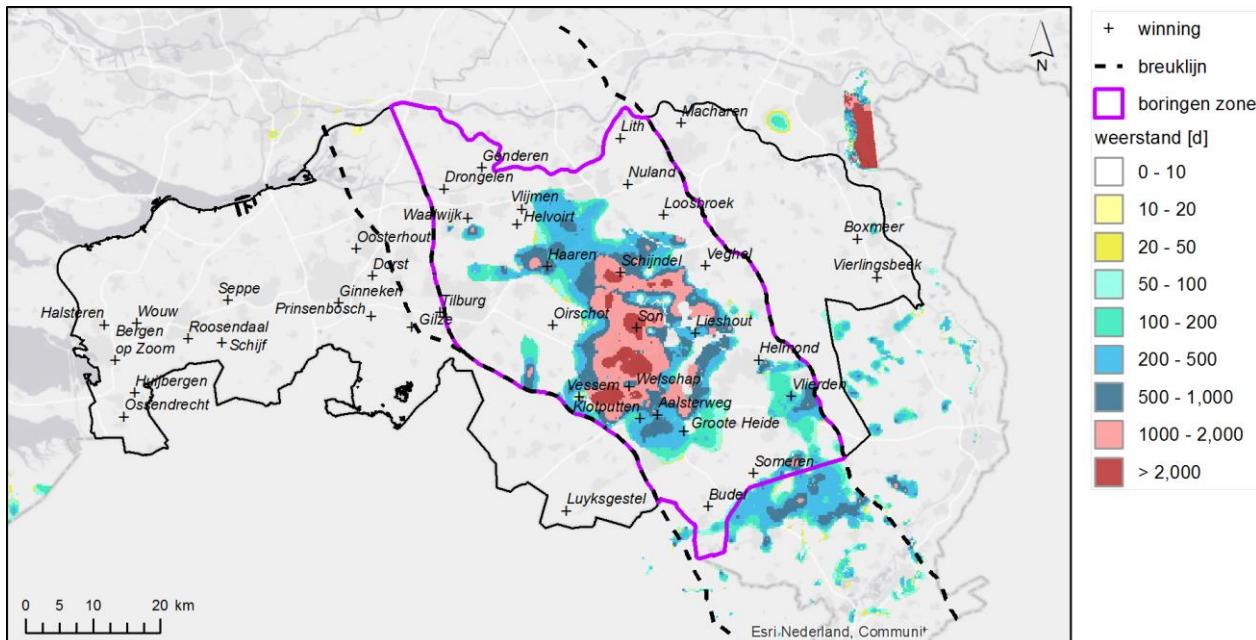
Grondsoort / zandmediaanklasse	Verticale doorlatendheid [m/dag]	Weerstand [d/m]
Klei	0,01	100
Leem	0,04	25
Veen	0,04	25
Gyttja	0,005	200
Zand – uiterst fijn	0,2	5
Zand – zeer fijn	0,4	2,5



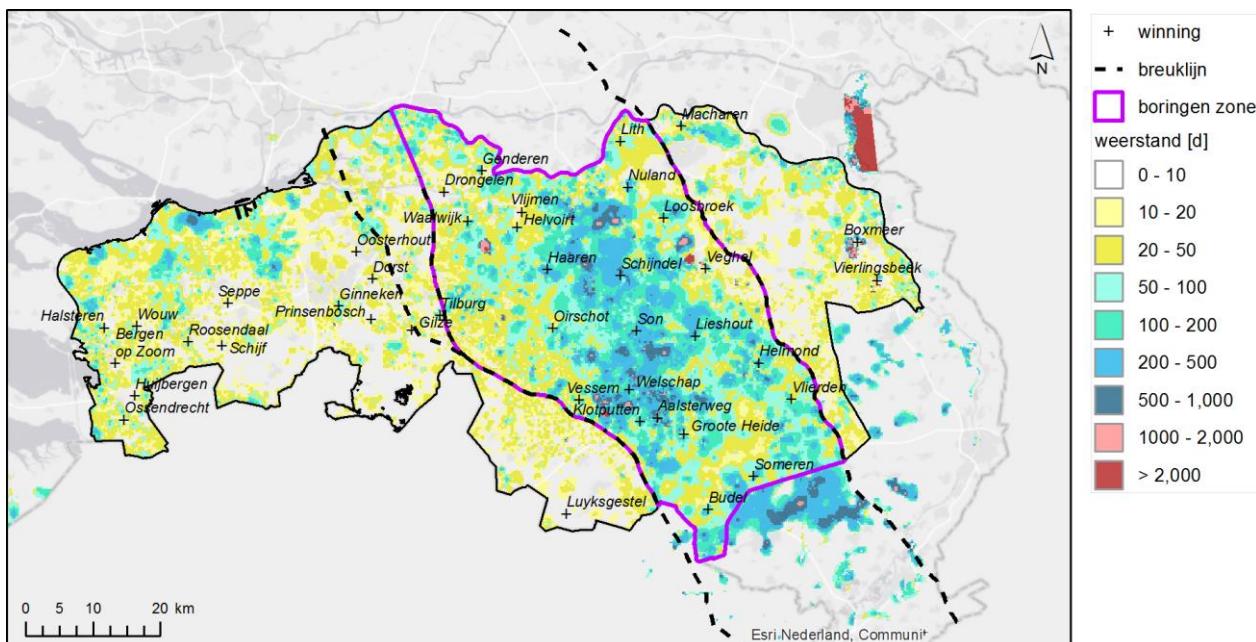
Figuur 5-15: Methodiek interpretatie boringen (met in geel: zand in boring. In groen: klei in boring)

De weerstand van de Boxtelklei is bepaald uit boringen binnen de Provincie Noord-Brabant. Een alternatief is het gebruik van de weerstanden uit REGISII v2.2. Beide methoden leveren een duidelijk verschil op: Figuur 5-16 en Figuur 5-17. Volgens REGISII v2.2 ligt de weerstand geconcentreerd in een gebied tussen Schijndel en Eindhoven (maximaal circa 2.000 dagen). Op basis van boringen is een lagere weerstand berekend (tot

circa 500 dagen), verspreid over een groter oppervlak in de Slenk. Bij Tilburg, Loosbroek, Helmond en de Mariapeel is volgens de boringen weerstand aanwezig, waar deze in REGISII v2.2 ontbreekt.



Figuur 5-16: Weerstand laag 2 en 3 volgens REGISII v2.2

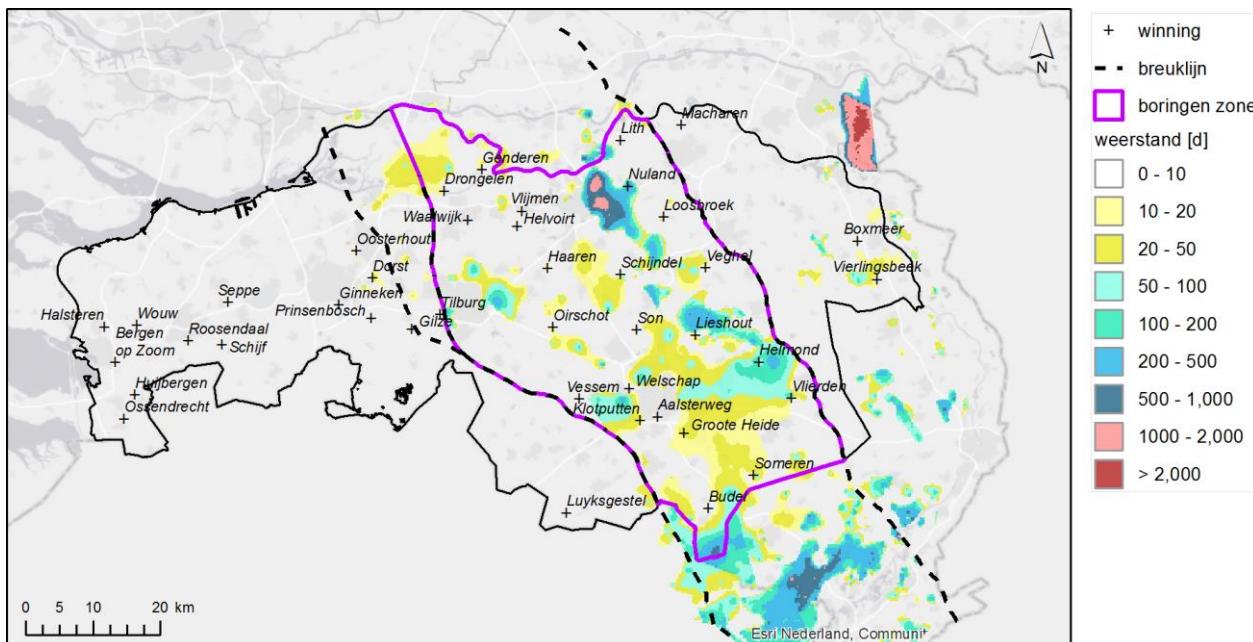


Figuur 5-17: Weerstand van laag 2 en 3 bepaald uit boringen in Dino-loket

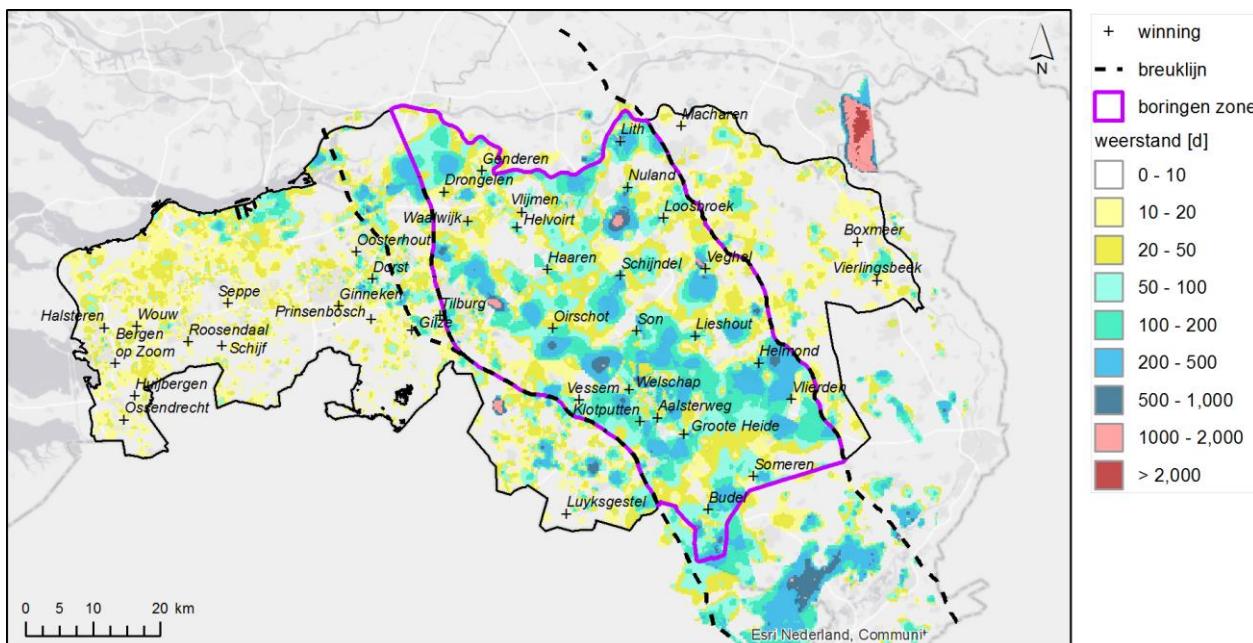


Weerstand laag 4

In de ijking is gebleken dat het modelresultaat verbetert als ook de weerstand van laag 4 binnen de Provincie Noord-Brabant wordt bepaald door een interpolatie van boringen. Slecht doorlatende laag 4 bestaat voornamelijk uit Sterksel Klei. De verbreiding volgens REGISII v2.2 is gegeven in Figuur 5-18. De interpolatie van boringen laat een grotere verbreding zien, zie Figuur 5-19. Daarom is ervoor gekozen om ook laag 4 binnen de Provincie Noord-Brabant te baseren op de interpolatie.



Figuur 5-18: Weerstand laag 4 volgens REGISII v2.2



Figuur 5-19: Weerstand van laag 4 bepaald uit boringen in Dino-loket



Brabantse Wal

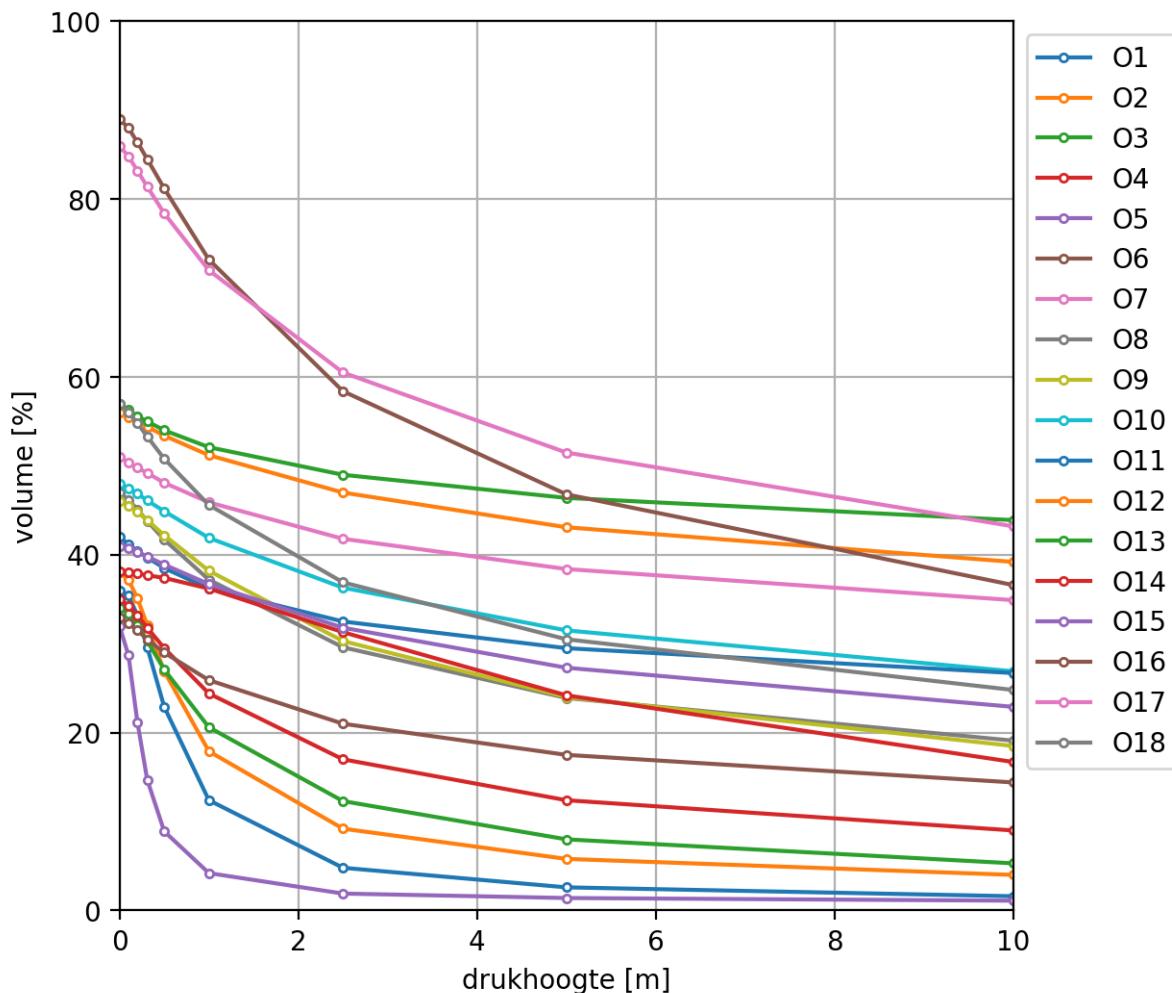
Het grondwatersysteem van de Brabantse Wal is een complex hydrologisch systeem. Leemlagen in de ondiepe ondergrond vertragen dewegzijging en zorgen voor natte plekken en schijngondwaterspiegels. In relatief lage delen waar de freatische grondwaterstand boven maaiveld komt, zijn vennen ontstaan. De schijngondwaterspiegel functioneert onafhankelijk van het diepe grondwatersysteem. Met een regionaal model is dit systeem niet goed te modelleren. Voor dit gebied zal daarom altijd een gedetailleerd model gebruikt moeten worden. Een dergelijk model is door Royal Haskoning ontwikkeld in de periode 2002 – 2009 voor het gebied van de Kalmthoutse Heide en de Groote Meer (Royal Haskoning, 2006 en 2009). Gegevens van Evides uit boringen, metingen en een infiltratieproef zijn in dit model verwerkt. In het model is het schijngondwaterspiegelsysteem gemodelleerd door de bodemweerstand te variëren. Het model houdt bij wanneer er schijngondwaterspiegels optreden. In dat geval zal de grondwaterstand heel traag reageren op veranderingen van boven of onderaf. Deze aanpak maakt geen deel uit van het Brabantmodel2018.

5.9 Bergingscoëfficiënt



Modelconcept

Grondwater kan geborgen worden in een freatische aquifer doordat de grondwaterspiegel stijgt. De freatische berging is relatief groot en is bepaald door het poriënvolume van de grond en de hoeveelheid onverzadigd water in de bodem. De freatische bergingscoëfficient is berekend op basis van het bodemtype (volgens Staringreeks 2001) en de dikte van de onverzadigde zone. De bergingscoëfficient is bepaald uit de volumeverandering bodemvocht bij het verschuiven van het evenwichtsvochtprofiel boven de grondwaterstand (Figuur 5-20). Vooral bij kleiige en lemige bodems neemt de bergingscoëfficient sterk af bij ondiepe grondwaterstanden. De bergingscoëfficient is na elke rekentijdstap opnieuw berekend op basis van de dikte van de onverzadigde zone van de vorige tijdstap.

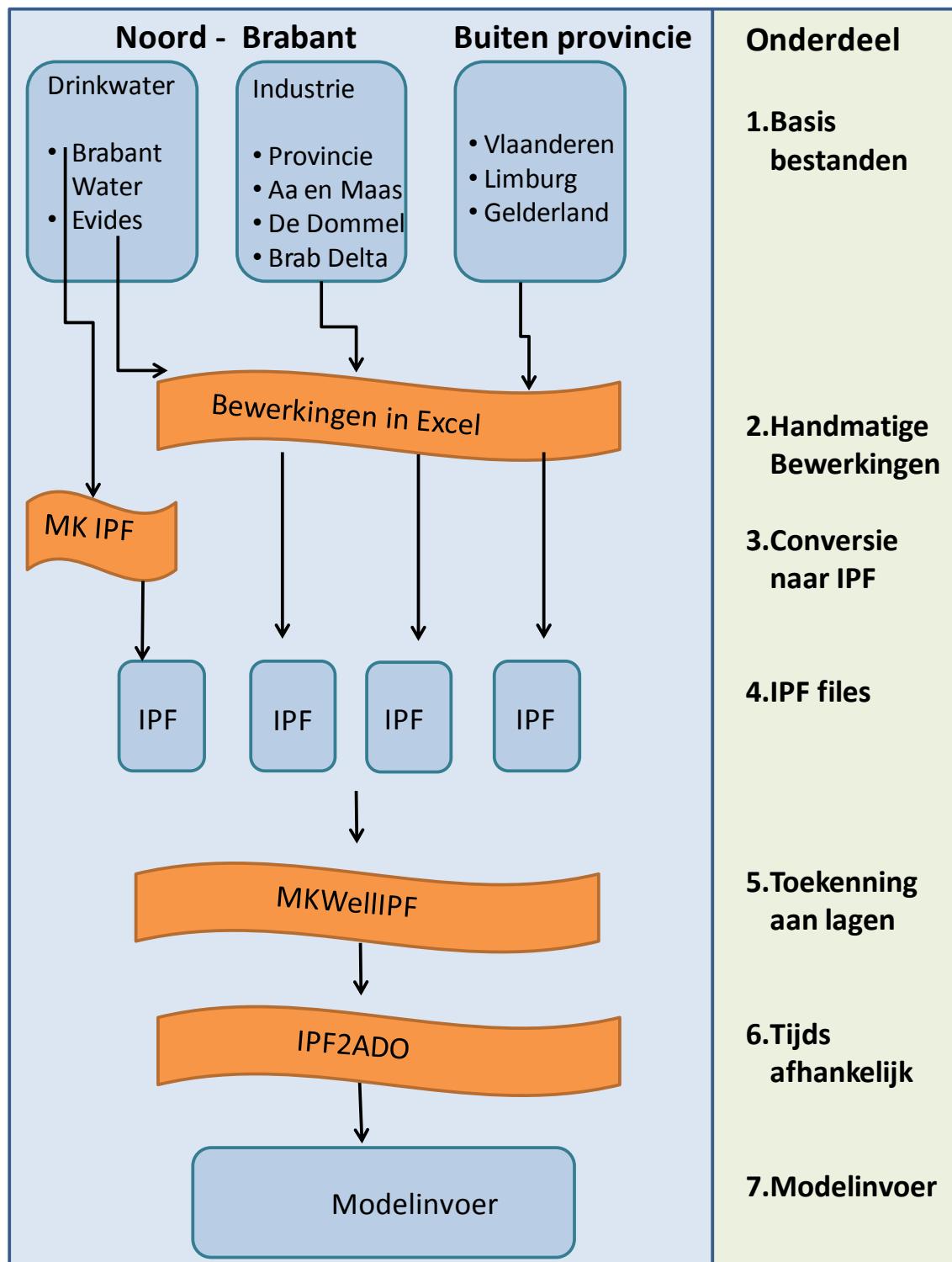


Figuur 5-20: Functie van freatische bergingscoëfficiënt afhankelijk van volumeverandering bodemvocht en drukhoogte (op basis van getallen uit Wösten et al., 2001) voor 18 typen ondergrond (O1-O18)

In afgesloten of semi-afgesloten pakketten kan ook grondwater geborgen worden. Dit gebeurt voornamelijk doordat de poriënruimte iets groter wordt als de waterdruk toeneemt (en ook een beetje doordat het water iets samengedrukt wordt). De extra berghing ten gevolge van een stijghoogtename van Δh meter is $\Delta h S_s D$, waarbij S_s [L^{-1}] de specifieke berghing is en D de dikte van het pakket. Voor de diepere lagen is een elastische bergingscoëfficiënt aangehouden van 0,0001. De bergingscoëfficiënt is gelijkgesteld voor alle lagen en onafhankelijk van de diepte gemaakt. In literatuur (Bot, 2011) worden verschillende waarden hiervoor aangehouden. Maar er is gekozen om dit niet te variëren omdat de uitkomst op het modelresultaat beperkt is.

5.10 Onttrekkingen

In Figuur 5-21 wordt samengevat hoe van negen basisbestanden met onttrekkingenmodelinvoer is gemaakt.



Figuur 5-21: Werkwijze van basisdata naar modeldata voor de onttrekkingen

5.10.1 Basisbestanden onttrekkingen



De basisbestanden komen uit negen verschillende bronnen (Tabel 5-4). Het formaat waarin de gegevens zijn opgeslagen verschilt per databron. Dit kan een spreadsheet zijn of een tekstfile volgens het IPF-formaat dat wordt gehanteerd in iMOD modellen. De gegevens voor Noord-Brabant zijn voor de drinkwaterwinning aangeleverd door de waterbedrijven; voor de industriële onttrekkingen door de vergunningverlenende instantie, namelijk de provincie of het betreffende waterschap. Voor de omliggende Nederlandse provincies is gebruik gemaakt van data over drinkwaterwinningen uit andere regionale geohydrologische modellen, namelijk MORIA en IBRAHYM. Voor Vlaanderen zijn de gegevens aangeleverd door de Vlaamse Milieumaatschappij. Dit zijn zowel gegevens van industriële onttrekkingen als gegevens van drinkwateronttrekkingen door de PIDPA, de Watergroep, het Gemeentelijk Waterleidingbedrijf Heusden-Zolder en de Intercommunale Watermaatschappij (IWM).

Tabel 5-4: Beschikbare data over grondwateronttrekkingen

Databron	Type winning	Soort bestand en bijzonderheden	Beschikbaarheid data
Brabant Water	Drinkwaterwinningen	NHI format (spreadsheet)	Geregistreerd debiet per maand van 1900 tot en met okt 2017 per afzonderlijke winput (880 stuks)
Evides	Drinkwaterwinningen	Spreadsheet per locatie en spreadsheet met debieten	Geregistreerd debiet per maand van 1913 tot en met sep 2017 per locatie (3)
Provincie Noord-Brabant en bewerkt door Aa en Maas	Industriële winningen (> 150.000 m ³ /jaar) en KWO	Spreadsheet met locaties en spreadsheet met debieten. Ook aangeleverd in IPF.	Geregistreerd debiet per kwartaal van 1994 tot en met 2016 per locatie of winput (934)
Aa en Maas	Industriële winningen (< 150.000 m ³ /jaar)	Spreadsheet met locaties en debieten.	Geregistreerd debiet per jaar van 1976 tot en met 2016 per locatie (18)
De Dommel	Industriële winningen (< 150.000 m ³ /jaar)	Spreadsheet met locaties en debieten.	Vergund debiet (17). Geregistreerde debieten ontbreken. Alleen postcode gegevens beschikbaar. Diepte ontbreekt.
Brabantse Delta	Industriële winningen (< 150.000 m ³ /jaar)	Spreadsheet met locaties en debieten.	Geregistreerd debiet per jaar van 2010 tot en met 2015 per locatie (19). Alleen postcode gegevens beschikbaar.
MORIA model (aangeleverd door RHDHV)	Drinkwater en industriële winningen in Gelderland, Utrecht, Zuid-Holland en Limburg	IPF file (modelinvoer MORIA)	Gemiddeld debiet in de periode 2009 -2016 per winput
IBRAHYM v2 model (aangeleverd door RHDHV)	Drinkwaterwinningen	IPF file (modelinvoer)	Debit per winput (364) voor 28 winlocaties per jaar in de periode 1971 - 2009
Vlaamse Milieumaatschappij (VMM)	Drinkwaterwinning en industriële winning	Spreadsheet met vergunde debiet per jaar en een spreadsheet met geregistreerde debieten per jaar	Vergunde debieten van groter dan 30.000 m ³ /jr. De werkelijk geregistreerde debieten zijn deels beschikbaar voor de 43 drinkwaterwinningen en niet voor de 25 industriële winningen

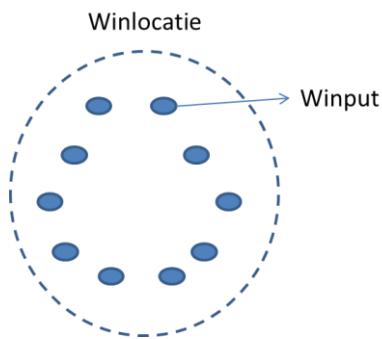
De basisbestanden hebben allen hun eigen formaat. Dit maakt het lastig om de dataverwerking te automatiseren. De gegevens zijn soms apart opgeslagen in een apart bestand met de metadata (coördinaten, filterdiepte, eigenaar) en een apart bestand met de debieten. De registratie van de debieten verschilt; dit kan tijdsafhankelijk zijn of een gemiddelde voor een bepaalde periode (kwartaal, jaar, meerdere jaren). De IPF bestanden zijn losse tekst bestanden per afzonderlijke winning. Door Brabant Water zijn de gegevens

aangeleverd in één tekstbestand (CSV) volgens het Hydromonitor formaat ontwikkeld door KWR (2017). Dit formaat heeft de volgende kenmerken:

- Interne definitie van het formaat (naam, versie, type, inhoud).
- Interne definitie van variaties in het formaat (datatype, data-inhoud, objecttype, locatie-ID label of sleutel).
- Interne definitie van kolommen of velden (datatype, eenheid, referentie).
- Uitgebreid gedocumenteerd.
- Beschikbaar in Excel-, CSV – en HDF5/MATLAB-variant.

Dit formaat is afgesproken binnen NHI verband. Het heeft de voorkeur voor de langere termijn om alle Nederlandse onttrekkingsgegevens in dit formaat op te slaan. In dit formaat kunnen zowel gegevens worden opgeslagen over de kenmerken van de putten als de debieten per put in de tijd. De brongegevens zijn in een spreadsheet zo bewerkt dat deze allemaal in Hydromonitor formaat zijn omgezet.

Voor de drinkwaterwinningen en de grotere industriële winningen in Nederland is de winning aangeleverd per afzonderlijke winput (zie figuur 5.22), waarbij de diepte per winput kan variëren. Voor deze grotere winningen heeft de precieze locatie en diepte een effect op de stijghoogten rond deze winlocatie.



Figuur 5-22: Onderscheid tussen winlocatie en winput

5.10.2 Handmatige bewerkingen (in Excel)

Per basisbestand voor de negen databronnen is stapsgewijs het basisbestand verbeterd en uniform gemaakt. Dit is in de spreadsheet toegelicht met een “Readme” tabblad en afzonderlijke tabbladen per bewerkingsstap.

(Fout)correcties

De basisbestanden worden bewerkt om verder geschikt te maken om op te nemen in het model. Hieronder worden de verschillende bewerkingen puntsgewijs besproken:

1. Koppelen van metagegevens aan debietgegevens in geval deze in twee aparte files zijn opgeslagen.
2. De locatiegegevens (coördinaten) missen. In dat geval is aan de hand van de bekende postcode een locatie bepaald. Per postcodenummer (de 4 getallen) is een referentie coördinaat beschikbaar. Voor enkele locaties ontbrak ook de postcode. In dat geval is de locatie geschat aan de hand van de ligging op de kaart (dit geldt voor twee grote bronbemalingen van waterschap De Dommel langs de A2).
3. Werkelijk ontrokken debieten ontbreken. In dat geval is naar het vergunde debiet gekeken. Het vergunde debiet is gehalveerd. Dit is een ruwe schatting gebaseerd op ervaringsgegevens. Voor de drinkwaterwinningen in Vlaanderen is een factor van 0,67 gehanteerd. Dit is gelijk aan de verhouding werkelijk/vergund voor de Vlaamse drinkwaterwinningen waar wel een geregistreerd debiet beschikbaar is.
4. Werkelijk ontrokken debieten zijn niet betrouwbaar. Dit geldt voor de gemeten debieten van de grote industriële onttrekkingen in Noord-Brabant in het jaar 2011 en 2016. Dit is door ons gecorrigeerd door een vergelijking te maken met de andere jaren en een vergelijkbaar debiet als de andere jaren in te vullen.
5. Debieten in enkele meetjaren ontbreken in een lange meetreeks. Ontbrekende hoeveelheden zijn geschat op basis van omliggende meetjaren om zo een goed gemiddelde te kunnen bepalen.
6. Locaties zijn weergegeven in Belgische Lambert coördinaten. De gegevens zijn geconverteerd.
7. Er ontbreken meetdata voor de meeste jaren. De betreffende locaties worden verwijderd en dus niet meegenomen in de modellering.
8. Debieten zijn niet gespecificeerd per pompput maar als totaal voor de winningslocatie. In dat geval is het debiet verdeeld over de pompputtonen. Dit geldt voor de drie Evides locaties.
9. Onttrekkingen liggen buiten het model. Deze worden verwijderd. Dit geldt zowel voor de horizontale begrenzing als de verticale begrenzing, in geval de winningen onder de geohydrologische basis liggen.
10. Onttrekkingsfilters komen boven maaiveld of tussen modellaag 1 en 2 uit. Dit komt omdat MORIA en het Brabant model een verschillende laagopbouw hebben. De ligging is gecorrigeerd zodat de winningen in de goede laag terecht komen. Dit is door ons handmatig per punt gedaan.
11. Filterstelling is niet bekend. Er is een schatting gemaakt op basis van de eerst goed doorlatende laag, vergelijkbaar met de systematiek voor berekening.
12. Verwisseling van namen van onttrekkingen. Dit speelde bij Aa en Maas voor de drinkwaterwinning Macharen en de KWO Champignonkwekerij Claassen.

Met de samenvatting in Tabel 5-5 en de opgeleverde spreadsheets per waterbeheerder is te reconstrueren welke bewerkingen gedaan zijn. Het betreft veel maatwerk, omdat voor elke dataset specifieke zaken aangepast en verbeterd moeten worden.

Tabel 5-5: Uitgevoerde bewerkingen en correcties voor de grondwateronttrekkingen

Nr bewerking (zie alinea hierboven)	Drinkwater r Noord- Brabant		Industrie Noord- Brabant			Provincie buiten Noord- Brabant		Viaanderen
	Brabant Water	Evides	Meer dan 150.000 m³/jr	Aa en Maas	De Dommel	Brabantse Delta	MORIA	
1								X
2				X		X		
3						X		
4		X						
5					X			X
6								X
7		X	X					
8	X							
9							X	X
10						X		
11			X	X				
12			X					

Middeling in de tijd

Voor de stationaire berekeningen is gerekend met een gemiddeld debiet in de tijd. De beschikbare debieten zijn daarvoor gemiddeld voor de periode 2009-2016, omdat dit aansluit bij de kalibratieperiode van het model. Alleen voor de Vlaamse onttrekkingen is een andere periode gekozen, namelijk de periode 2007-2013. De reden is dat er in de jaren 2014 – 2016 veel gaten in de geregistreerde debieten zitten. Voor sommige drinkwaterwinningen is het debiet in de geselecteerde periode wel veranderd, omdat de winning gestopt is (Boxmeer, Vierlingsbeek) en verplaatst is naar andere winlocaties (Veghel, Loosbroek), of omdat de winningshoeveelheid in de diepte is aangepast (Budel) of omdat de winningshoeveelheid kordurend is aangepast (Eindhoven). In dat geval is de hoeveelheid onttrokken grondwater gemiddeld over deze periode. Dit maakt het niet mogelijk om het grondwatermodel goed stationair te ijken voor deze gebieden. In de kalibratie is hier rekening mee gehouden door de meetpunten rond deze gebieden een lichter gewicht toe te kennen. In de validatie is voor deze gebieden nader ingezoomd en is beoordeeld of de berekende veranderingen in stijghoogten overeenkomen met de gemeten veranderingen. Dit wordt later toegelicht in paragraaf 8.7.

Voor de niet stationaire berekeningen worden de gegevens gevarieerd van de Brabantse drinkwaterwinningen van Brabant Water (per maand) en de grote Brabantse industriële onttrekkingen (per kwartaal). De onttrekkingen van Evides zijn niet gevarieerd in de tijd.

5.10.3 Conversie naar IPF



De onttrekkingen zijn in het IPF formaat gezet om gebruik te kunnen maken van het programma MKWellIPF (zie paragraaf 5.10.4). Alle meta- en debietgegevens zijn omgezet naar IPF formaat. IPF is het formaat om puntinformatie in iMOD formaat op te slaan. Voor de gegevens van Brabant Water die in het NHI/ Hydromonitor formaat staan is dit geautomatiseerd gedaan met het programma MK_IPF. De andere gegevens zijn binnen de spreadsheet omgezet in IPF formaat.

De informatie in de IPF's is in tekstformaat opgeslagen en makkelijk in te lezen en weer te converteren naar andere invoer formaten.

5.10.4 Toekenning aan lagen (MKWellIPF)



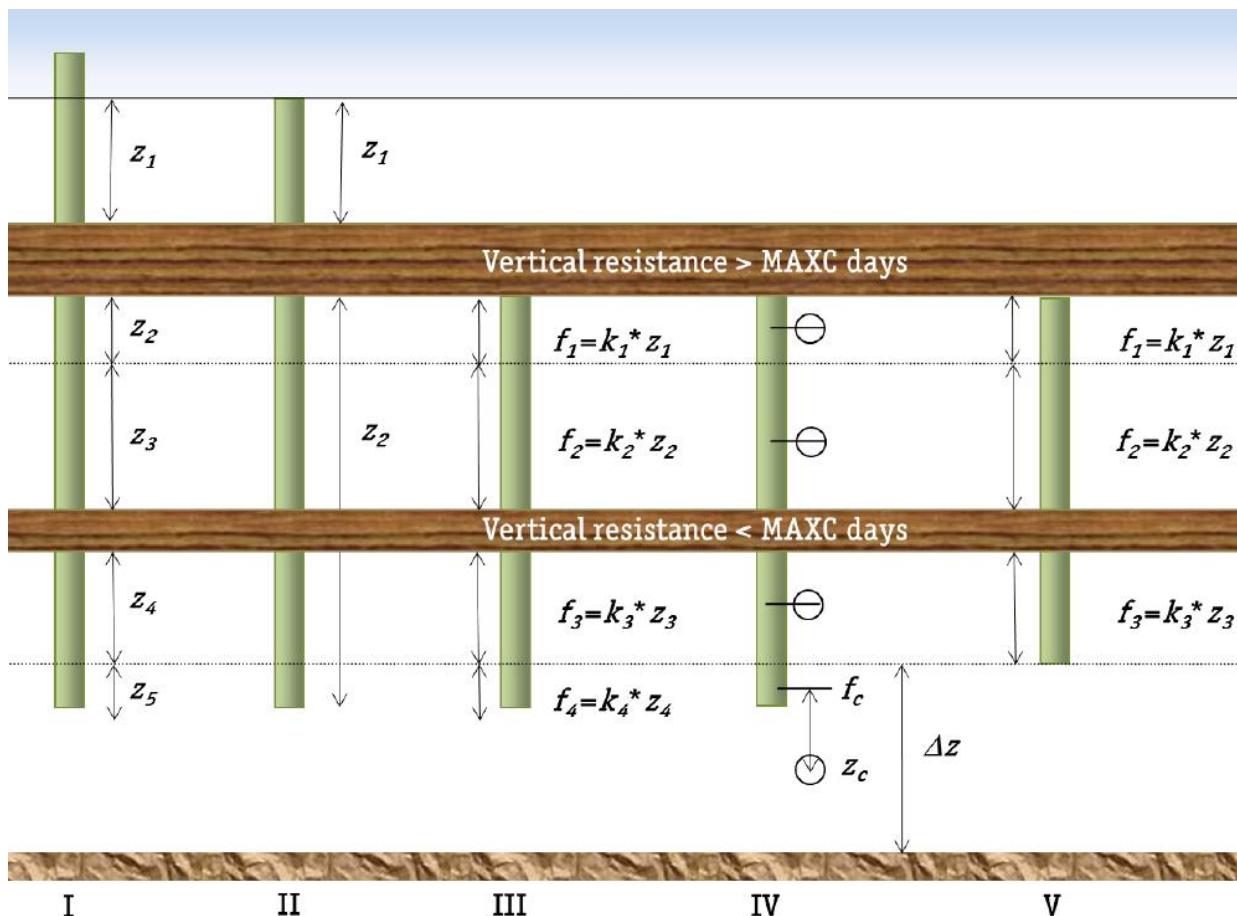
De toekenning van de onttrekkingsdebieten aan de modellagen is gedaan op basis van de filterlengte en filterdiepte van de onttrekkingssputten. Hierbij is gebruik gemaakt van de in IMOD beschikbare tool "MKWELLIPF-Function". De werkwijze van de tool staat beschreven in de IMOD handleiding (Deltares, 2017) en wordt hieronder toegelicht.

De methodiek van de toekenning van onttrekkingen aan lagen sluit aan bij wat gedaan wordt binnen regionale modellen zoals IBRAHYM en MORIA. De metadata van de winningen is opgeslagen in één IPF bestand. De onttrekkingshoeveelheden worden in aparte tekst (txt) bestanden per put opgeslagen. De uitvoer van MKWellIPF zijn IPF's per modellaag, dus één IPF per modellaag met in de IPF de onttrekkingshoeveelheden voor de putten in de betreffende modellaag. Triwaco heeft per modellaag de winhoeveelheden van de putten nodig.

De toekenning van onttrekkingsdebiet aan modellagen gebeurt in vijf stappen, deze stappen zijn weergegeven in Figuur 5-23. De figuur is overgenomen uit de iMOD handleiding. De stappen leiden tot de selectie van de modellagen waaraan een debiet wordt toegekend.

1. Indien de filterhoogte tot boven maaiveld, of tot onder de onderste modellaag reikt is de filterhoogte aangepast. Indien de top van het filter boven maaiveld ligt is de top gelijk aan het maaiveldniveau gesteld, als de bodem van het filter onder de onderkant van de onderste modellaag ligt is de onderkant van het filter gelijk aan de onderkant van het onderste modellaag gesteld.
 2. Vervolgens is gekeken of het filter door een scheidende laag heen gaat met een weerstand groter dan [MAXC] dagen. Voor het Brabantmodel is MAXC op 100.000 dagen gezet. Dit is de waarde die ook binnen IBRAHYM en MORIA gehanteerd wordt. Alleen de grote scheidende lagen hebben een weerstand groter dan 100.000 dagen en worden dus niet door filters doorsneden. Bij kleinere kleilagen kan dit wel het geval zijn. De waarde is vrij arbitrair gekozen. Indien het filter door een weerstandslaag met meer dan 100.000 dagen heen snijdt is het filter gesplitst ter plaatse van de kleilaag en alleen het langste deel van het filter blijft behouden.
 3. Voor alle modellagen die het filter doorsnijdt is een factor berekend op basis van de horizontale doorlatendheid (k-waarde) keer de lengte van het filter (z) in het betreffende pakket, gedeeld door de gesommeerde k-waarde * z-waarden voor het gehele filter. Gedurende de ijking verandert deze factor omdat de k-waarden ook worden aangepast. De toekenning van de debieten per modellaag is daarom een iteratief proces.
 4. De factor uit stap 3 is aangepast voor de lagen waarvoor geldt dat het filter niet volledig de modellaag doorsnijdt op basis van onderstaande formule:
- $$f = 1 - \frac{|z_c - f_c|}{0.5 * \Delta z}$$
- Waarbij: $|z_c - f_c|$ is afstand tussen midden van het pakket tot het midden van het filter in het pakket
En Δz is de dikte van het pakket zelf.
5. Filters die in een modellaag liggen met een factor kleiner dan 0,05 (5%) worden verwijderd.

Uit deze 5 stappen volgt aan welke modellagen het debiet van een onttrekkingsput is toegekend. Het debiet wordt gemiddeld over de opgegeven periode en verdeeld over deze modellagen. Voor de verdeling van het debiet over de geselecteerde modellagen is de factor gebruikt zoals beschreven in stap 3. Het debiet is naar ratio van de KD aan de modellagen toegekend. Waarbij de D niet de dikte van het pakket is maar de lengte van het filter in het pakket.



Figuur 5-23: Toekennen pompputten aan modellagen op basis van filterdiepte (Bron: IMOD handleiding, Deltares 2017)

Bij het toekennen van tijdsafhankelijke debieten met de MKWELLIPF tool is de volledigheid van de reeks van cruciaal belang. Wanneer een debietreeks stopt voor het einde van de ijkperiode, kan dit op twee manieren worden geïnterpreteerd:

- De onttrekking is stopgezet.
- De onttrekking loopt door maar de meetreeks is niet volledig.

In het eerste geval moet het tijdreeksbestand eindigen met een debiet met de waarde 0 in de tijdstap volgend op het laatst gemeten debiet. In het tweede geval eindigt de reeks met het laatst geregistreerde debiet, dat wordt aangehouden tot het einde van de rekenperiode. Een verkeerde verwerking van onvolledige reeksen heeft effect op de resulterende stationaire debieten.

5.10.5 Controle stationaire debieten



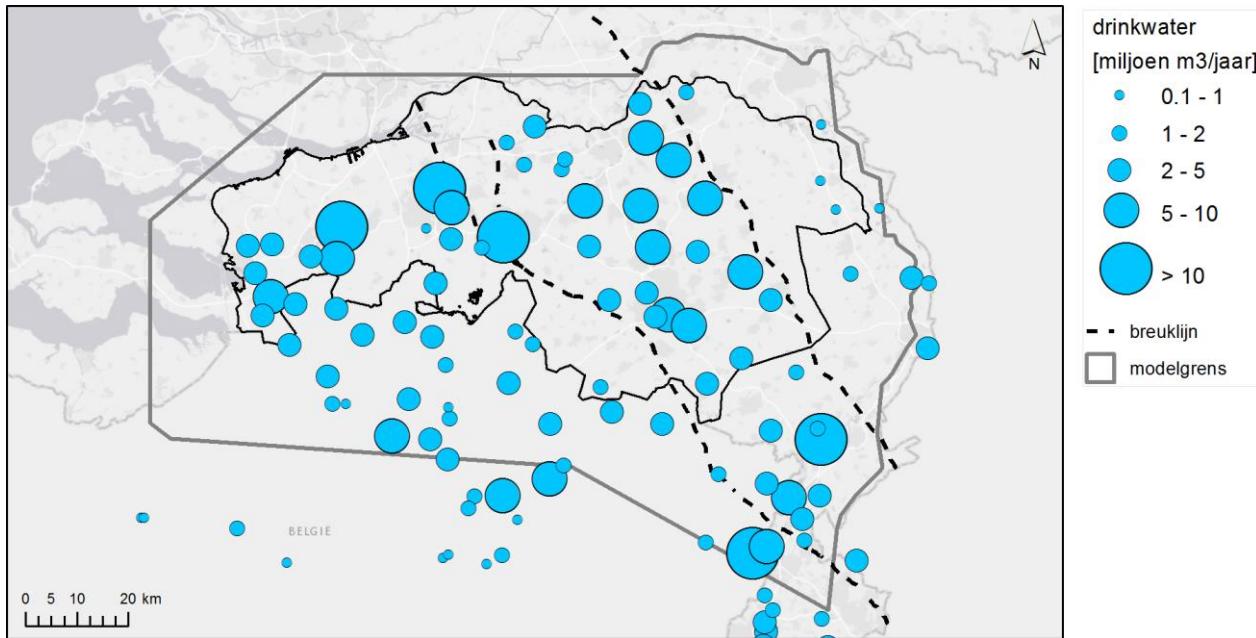
Tijdsafhankelijke data is beschikbaar van onttrekkingen voor drinkwater en grote industrie in Noord-Brabant en Limburg. Ten behoeve van de stationaire ijking zijn de reeksen gemiddeld over de ijkperiode 2009 t/m 2016. Van de overige onttrekkingen is alleen een gemiddeld of vergund debiet beschikbaar voor de stationaire ijking. De gemiddelde debieten zijn op kaart weergegeven in Figuur 5-24 en Figuur 5-25. De grootste onttrekkingen ten behoeve van drinkwater zijn pompstations Seppe, Oosterhout, Tilburg, Heel en Eijsden (> 10 miljoen m³/jaar). De grootste industriële onttrekkingen in Brabant zijn Fujifilm, Heineken, Bavaria, Campina en Budelco.

Per bron wordt de totale gemiddelde onttrekking vermeld in Tabel 5-6 met een vergelijking tussen de gehele dataset en de onttrekkingen binnen de modelgrens. Zoals te zien in Figuur 5-24 en Figuur 5-25 valt een deel van de onttrekkingen buiten het modelgebied. Dit verklaart het kleine verschil tussen de invoer en de totale onttrekking in het model Tabel 5-6.

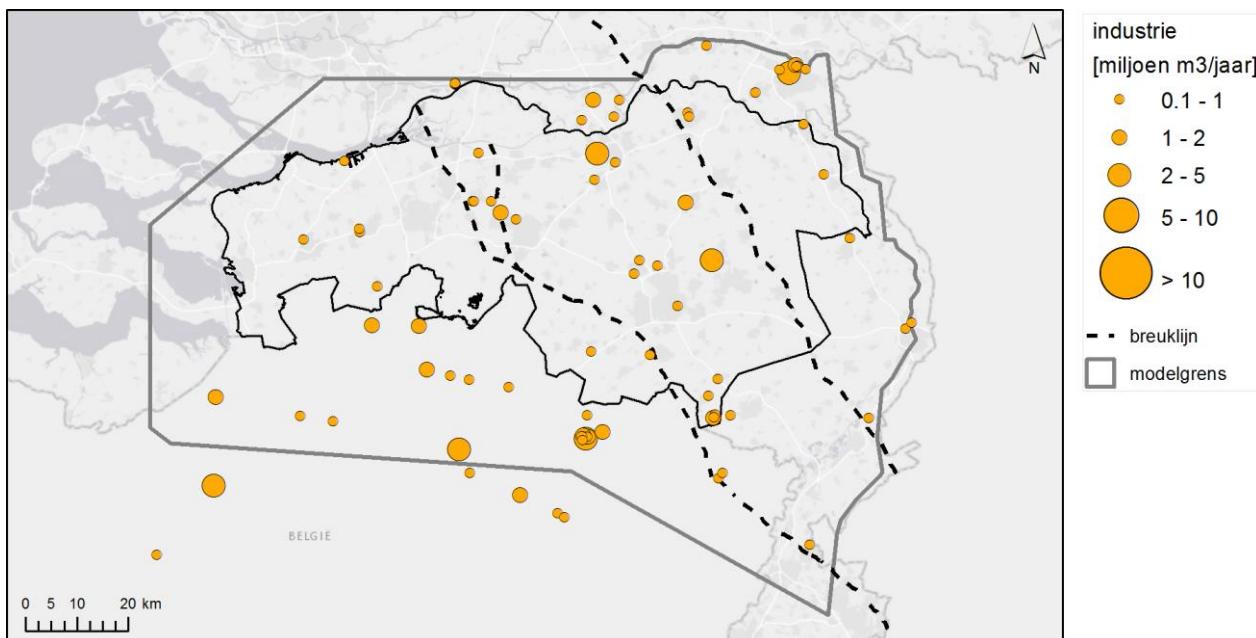
Het gemiddelde debiet per pompstation binnen Noord-Brabant is gegeven in Bijlage 8.

Tabel 5-6: Som gemiddelde onttrekking per organisatie/ bronhouder

Type	Organisatie/ Bronhouder	Totale onttrekking in aangeleverde dataset [miljoen m ³ /jaar]	Totale onttrekking in Brabant model [miljoen m ³ /jaar]
Drinkwater	Brabant Water	182,8	182,8
	Evides	13,8	13,8
	WML	62,8	57,3
	Drinkwater Vlaanderen	97,0	83,2
Industrie	Provincie Brabant	20,6	20,6
	Provincie Limburg	1,7	1,2
	Waterschap Brabantse Delta	0,3	0,3
	Waterschap De Dommel	2,0	2,0
	Waterschap Aa en Maas	0,3	0,3
	Zuid-Holland/Gelderland (MORIA)	15,9	15,9
	Industrie Vlaanderen	25,0	19,0
Totaal		422,1	396,5



Figuur 5-24: Onttrekkingen drinkwater, gemiddeld over 2009 t/m 2016. Onttrekkingen kleiner dan 100.000 m³/jaar zijn niet weergegeven



Figuur 5-25: Onttrekkingen industrie, gemiddeld over 2009 t/m 2016. Onttrekkingen kleiner dan 100.000 m³/jaar zijn niet weergegeven

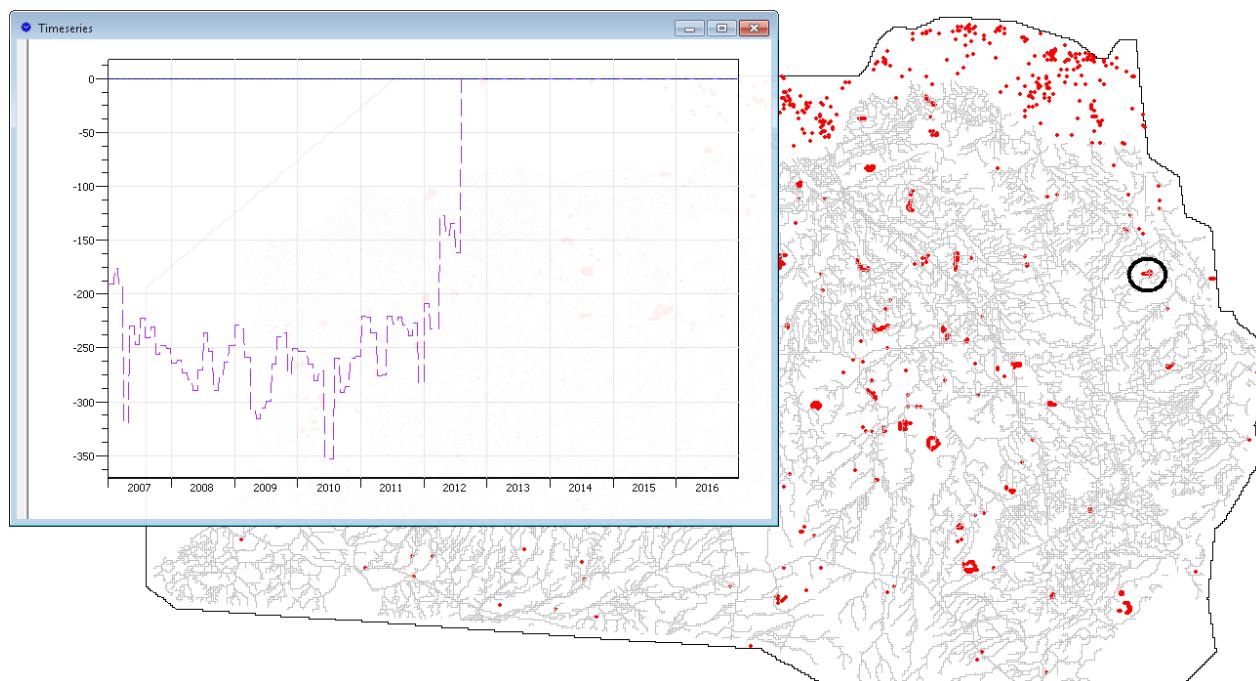
5.10.6 Tijdsafhankelijke invoer (IPF2ADO)

Van drinkwaterwinningen en een deel van de industriële winningen zijn meetreeksen met debieten variabel in de tijd beschikbaar. De drinkwaterwinningen worden tijdsafhankelijk doorgerekend. In de tijdsafhankelijke som varieert het debiet van de winputten aan de hand van de aangeleverde debietmeetreeksen. Hierto zijn de debietmeetreeksen omgeschreven naar tijdsafhankelijke invoer voor het grondwatermodel, met behulp van het nieuw gemaakte Python script IPF2ADO.

Hiermee zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Neerschalen van de debietmeetreeksen naar de tijdstappen van het model: van maandelijks naar tijdstappen van 5 dagen. Het debiet is binnen de maand constant gehouden.
2. Vermenigvuldigen van de reeksen met de fractie per modellaag, zodat per winput en per modellaag een tijdreeks beschikbaar komt.
3. Het combineren van de reeksen met de overige (constante) onttrekkingen.
4. Koppeling van de winningen met de Source ID's van het modelgrid en omzetten van de datum/tijd naar een modeltijd in dagen.
5. Wegschrijven van een tijdsafhankelijke ADO per modellaag. Deze ADO files worden in de tijdsafhankelijke berekening gebruikt om per tijdstap de juiste windebieten aan te leveren.

In Figuur 5-26 is een screenshot opgenomen van het resultaat. Het gaat om een winput van drinkwaterwinning Vierlingsbeek. Winning Vierlingsbeek is in 2012 stopgezet.



Figuur 5-26: Tijdsafhankelijke onttrekkingen in het model (winning Vierlingsbeek)

5.11 Beregening

Achtergrond



De hoeveelheid beregening in de zomerperiode is gemiddeld ongeveer 30 miljoen m³/jaar. Op jaarbasis is dit een beperkte hoeveelheid in de waterbalans, maar omdat de beregening geconcentreerd plaats vindt in de zomermaanden heeft dit wel een groot effect op de stijghoogten en grondwaterstanden in de zomerperiode. Daarom is in de tijdsafhankelijke berekeningen het effect van beregening meegenomen. In de stationaire berekening is de gemiddeld bepaalde beregening in de periode 2009 – 2016 meegenomen, zodat de beregening in de waterbalans is opgenomen.



Beregeningstool

De benodigde hoeveelheid beregening is bepaald met een in 2014 ontwikkelde tool ten behoeve van de aanpassing van het beregeningsbeleid (RHDHV, 2014). Dit is een los programma (Delphi) dat in de batch file is opgenomen voor het uitvoeren van de tijdsafhankelijke grondwatermodel berekeningen. Het instrument maakt gebruik van de uitkomsten van de onverzadigde zone module FLUZO (zie hoofdstuk 4). Het berekende verschil tussen de potentiele en actuele gewasverdamping in de tijd is gebruikt om de beregeningsbehoefte te bepalen. Als de actuele verdamping achterblijft bij de potentiele verdamping is er een vochttekort en dus een beregeningsbehoefte.

De beregeningstool bepaalt de volgende variabelen:

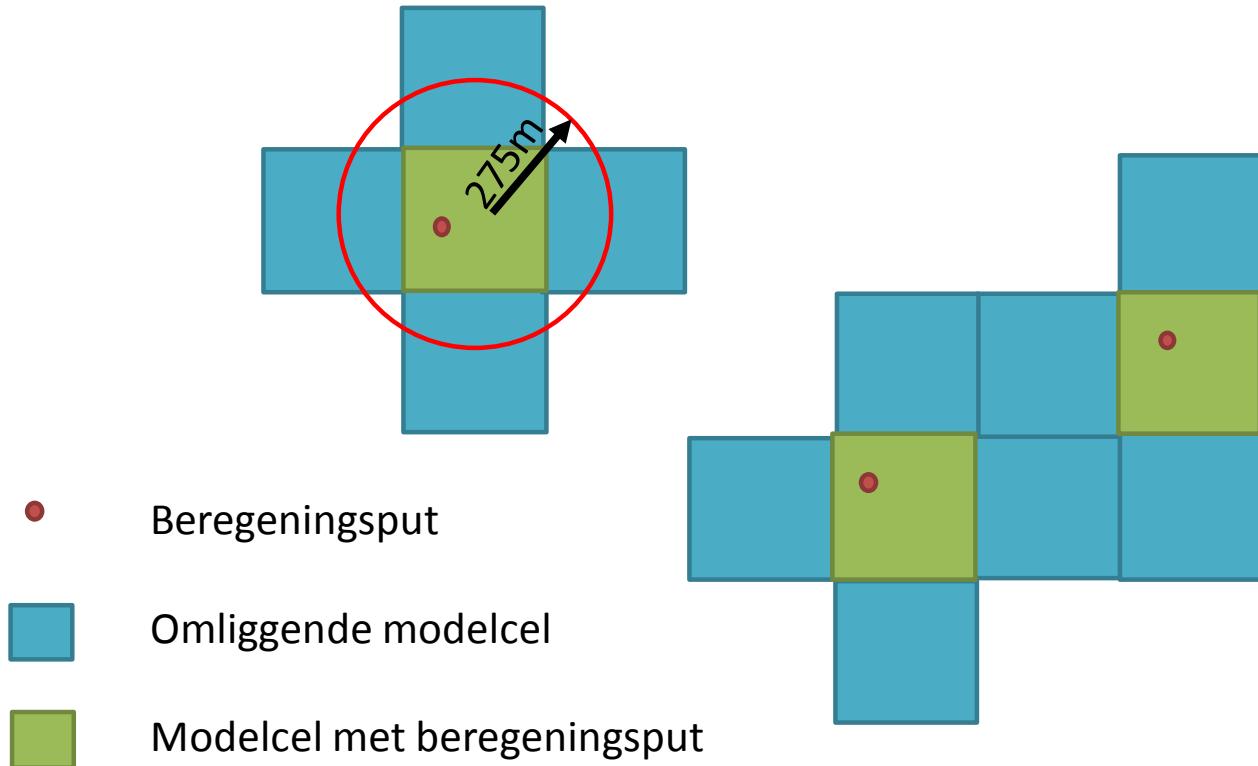
1. De locaties waar beregend wordt.
2. Het tijdstip waarop beregend wordt.
3. De diepte waaruit onttrekking plaats vindt.
4. De hoeveelheid grondwater die wordt onttrokken en het rendement van de beregeling (hoeveelheid water die ten goede komt aan de gewasgroei).



Bepaling locatie van beregening

De locaties van beregeningsputten zijn aangeleverd door de provincie Noord-Brabant en gebaseerd op de vergunningsaanvragen. In deze aanvraag kan ook de locatie van het bedrijf zijn opgegeven en niet de locatie van de put. De precieze werkelijke locatie van de beregeningsputten is onbekend en kan ook variëren wanneer gebruik wordt gemaakt van mobiele installaties. Beregeling is alleen mogelijk voor gebied met omliggend agrarisch gras, mais en de overige landbouwgewassen. In natuurgebied of stedelijk gebied kan niet beregend worden.

Het Brabant model is opgebouwd uit cellen van 250 bij 250 meter. Beregeling vindt plaats in modelcellen waarbinnen een beregeningsput valt en omliggende modelcellen. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 5-27. De grootte van de omliggende zone is door kalibratie bepaald. Met de grootte van de zone verandert ook de hoeveelheid onttrokken grondwater voor beregeling. Uit de ijking blijkt dat beregeling plaats vindt in een cirkel met een straal van 275 meter om de kern van de modelcel waarin de beregeningsput ligt. Bij deze straal komen de gemiddeld gemeten en berekende hoeveelheid beregeling het beste met elkaar overeen. Een straal van 275 meter is gelijk aan een oppervlak van ongeveer 20 ha. De grootte van 5 modelcellen is groter: ruim 31 hectare. De totale beregeling in de 5 modelcellen is dan vermenigvuldigd met een factor 20/31. De zoekcirkel dient alleen om de cellen aan te wijzen die meedoen bij de beregeling. Bij overlap, zoals rechts onder in Figuur 5-27, is er niet dubbel geteld. De beregeling per modelcel is vervolgens verdeeld afhankelijk van het landgebruik binnen de modelcel.



Figuur 5-27: Principe van de berekening van de straal waarbinnen beregend wordt



Bepaling tijdstip waarop beregend wordt

Beregening vindt plaats wanneer er een vochttekort optreedt. Hier is geen minimumwaarde voor gesteld.

In de vergunningen van de waterschappen is opgenomen dat grasland niet mag worden beregend vóór 1 juni. Deze beperking is in ongeveer de helft van Noord-Brabant opgeheven als onderdeel van het vernieuwde flexibele beregeningsbeleid. In de beregeningstool zijn geen beperkingen ten aanzien van graslandberegening opgenomen. In tijden van droogte is het mogelijk om deze regel te versoepelen (5% regeling). Deze regel is (nog) niet in de tool opgenomen.

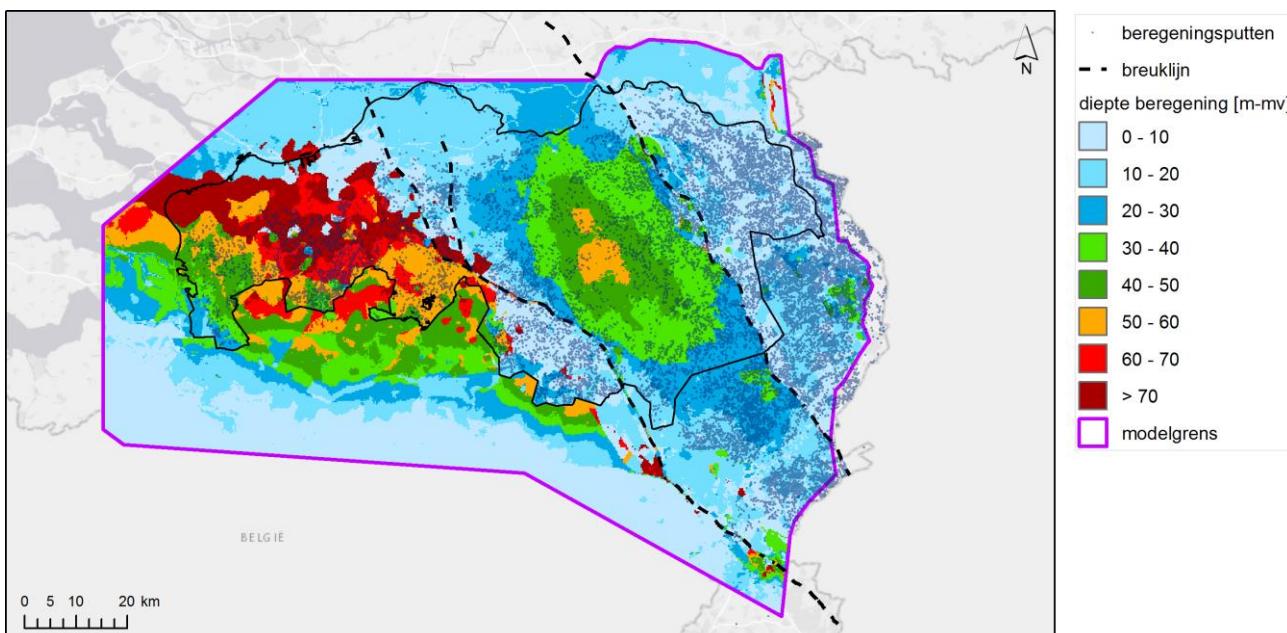
In tijden van droogte is het mogelijk dat de waterschappen een onttrekkingsoverheid instellen voor beregening uit grondwater. Voor het instellen van het onttrekkingsoverheid worden door de waterschappen de voorjaarsgrondwaterstanden (GVG) als ijkpunt genomen. Daarmee is duidelijk te maken of er sprake is van een doorgaande daling van de grondwaterstanden, of dat er in de winter voldoende is aangevuld. In geval van onvoldoende aanvulling wordt op 1 april een onttrekkingsoverheid ingesteld. Deze situatie heeft zich nog niet voorgedaan en is niet in het Brabant model opgenomen.



Bepaling diepte van onttrekken

De diepte van onttrekken wordt niet opgegeven in de vergunningsaanvraag en is dus onbekend.

De agrariër zoekt zelf naar de optimale diepte waar een put kan worden geïnstalleerd die goed water levert. Daarom is in het Brabantmodel de meest waarschijnlijke diepte van onttrekken bepaald uit het doorlaatvermogen van modellagen. De eerste modellaag met een doorlaatvermogen van groter dan $300 \text{ m}^2/\text{d}$ wordt geschikt geacht voor onttrekking, mits deze laag niet dieper zit dan 80 meter onder maaiveld. Dit is een ervaringsregel waarbij grondwater goed gewonnen kan worden. In de praktijk kan altijd een laag gevonden worden die aan deze voorwaarden voldoet. In de Centrale Slenk en de Peelhorst is dit in het bovenste watervoerende pakket; in West-Brabant vindt de onttrekking dieper plaats (Figuur 5-28).



Figuur 5-28: Diepte van onttrekking ten behoeve van beregeling en locaties van beregeningsputten



Bepaling hoeveelheid onttrokken grondwater

Startpunt voor de berekening van de hoeveelheid onttrokken grondwater voor beregeling is het vochttekort. Aanname is dat het vochttekort in het te beregenen perceel teruggebracht moet worden tot 0. De hoeveelheid beregeling is verfijnd door rekening te houden met vier variabelen:

1. Straal van beregeling (Figuur 5-27).
2. Een factor tussen het vochttekort en de hoeveelheid beregeling.
3. Een rendementsfactor die verschilt voor droge en natte jaren.
4. Een standaardverliester van 10% door extra verdamping.

Ad 1: De straal is eerder hierboven beschreven.

Ad 2: De factor is bepaald op een waarde van 0,8. Er wordt dus gemiddeld beregend met een hoeveelheid van 0,8 maal het vochttekort. Deze waarde komt niet uit de literatuur, maar is bepaald op basis van ervaringskennis.

Ad 3: Het rendement van beregeling wil zeggen hoeveel beregeningswater ten goede komt aan het verminderen van het vochttekort en dus ten goede komt aan de plant. In droge jaren is het rendement hoger dan in minder droge jaren. Dit blijkt uit de gevonden en gekalibreerde relatie tussen vochttekort en geregistreerde beregeling (RHDHV, 2014).

In droge jaren is het rendement 1, in natte jaren kan dit afnemen tot 0.4. Het rendement (R tussen 0 en 1) is berekend met een empirische formule, afhankelijk van de actuele verdamping (E_a) en potentiële verdamping (E_p):

$$R = 0.22 + 0.78 * (1 - (30 - E_p + E_a) / 30) \text{ met } R \leq 1$$

De formule is in 2014 voor het eerst opgesteld. Het is een empirische formule waarbij de waarden voor de constantes zo bepaald zijn dat de berekende en gemeten berekening zo veel mogelijk overeenkomen. Voor het aangepaste model van 2018 en de nieuwe gegevens over berekening werkt de formule nog steeds goed en was geen aanpassing van de formule nodig (zie paragraaf 7.6).

Ad 4: Naast het verlies naar het grondwater wordt uitgegaan van een algemeen beregeningsverlies van 10%. Dit percentage water dat verdampft is elk jaar hetzelfde.

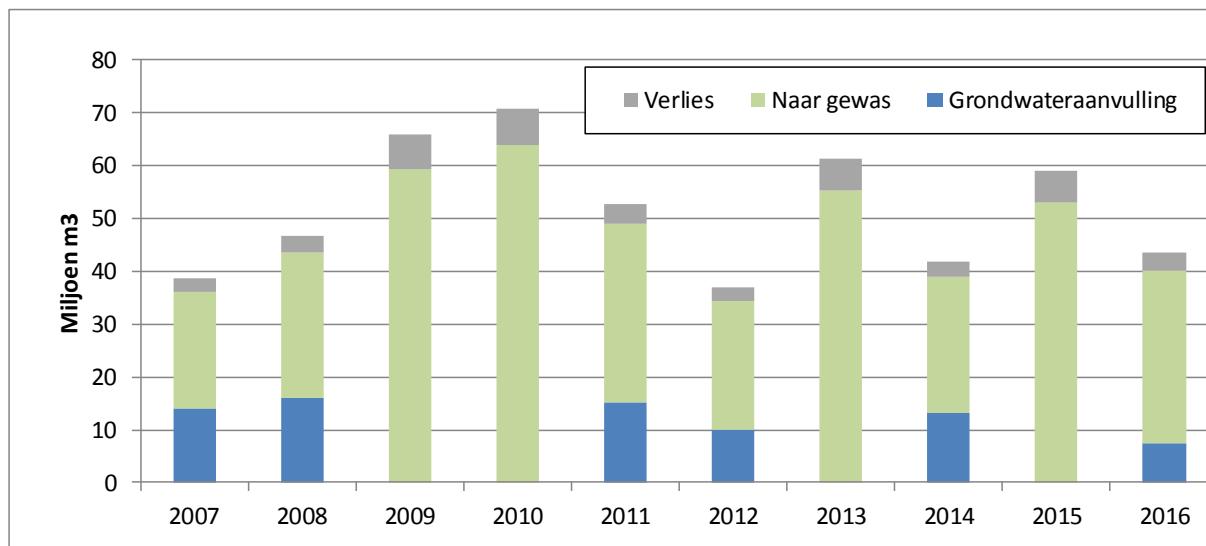


Berekende hoeveelheid beregening

De berekende hoeveelheid ontrokken grondwater voor beregening is gepresenteerd in (Figuur 5-29) met een onderverdeling in:

- Het deel van het water dat direct verdampft (gemiddeld verlies van 10%).
- Gebruik door het gewas voor plantengroei en vooral gewasverdamping. Dit is het grootste gedeelte. Binnen deze post gebruikt gras het meeste beregeningswater (59%). Het overige deel wordt gebruikt door mais (17%) en overig bouwland (24%).
- Het gedeelte van het water dat niet door de plant gebruikt wordt en ten goede komt aan het ondiepe grondwater.

In droge jaren (2009, 2010 en 2015) wordt al het water door het gewas gebruikt; er is geen aanvoer naar het grondwater. In nattere jaren gebeurt dit wel.



Figuur 5-29: Berekende beregeningsgift per jaar onderverdeeld in verlies (naar de lucht), opname door het gewas (verdamping) en aanvulling naar het grondwater

6 Interactie grond-oppervlaktewater

6.1 Inleiding en modelconcept

De interactie tussen grondwater en oppervlaktewater vindt plaats via:



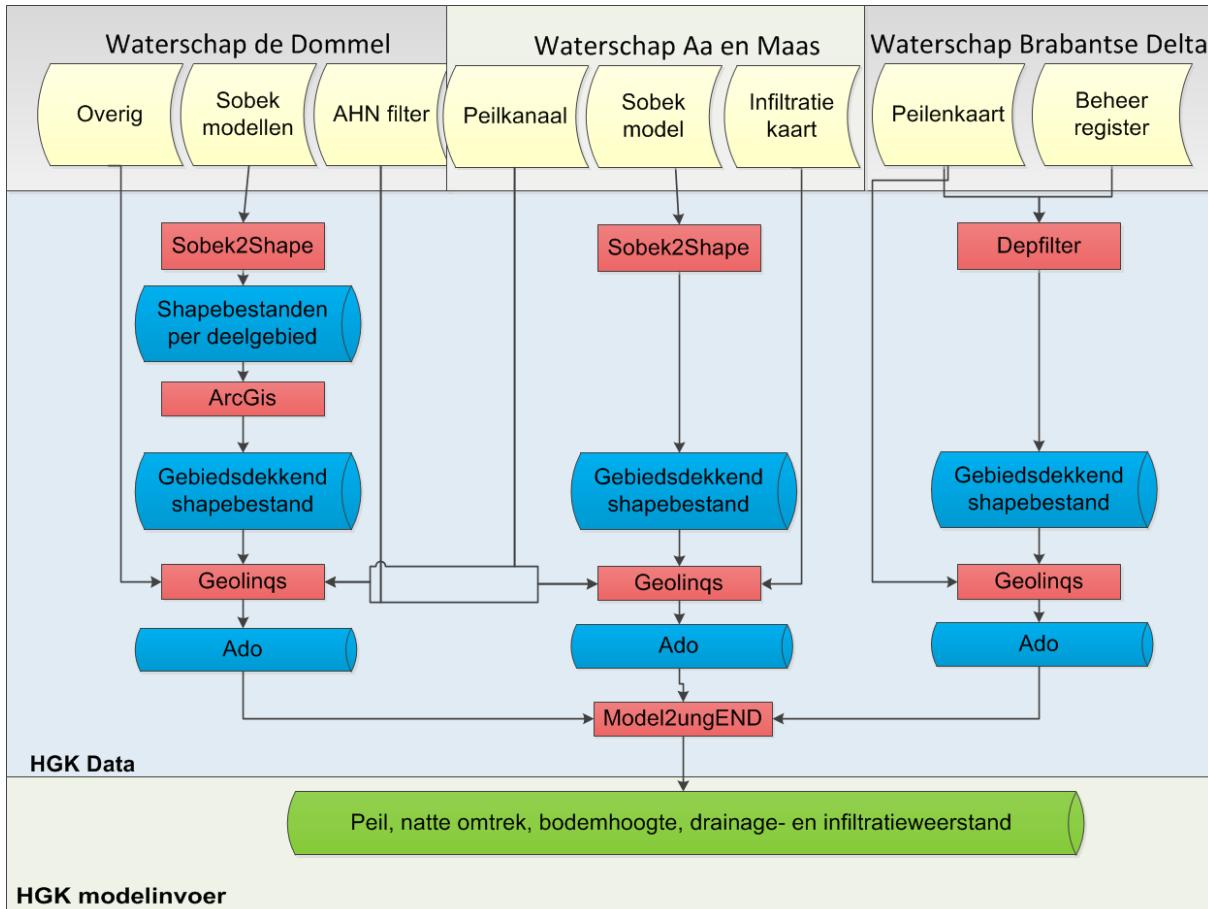
- Waterlopen.
- Buisdrainage.
- Drainage over maaiveld.

De waterlopen verschillen in grootte en beheerder:

- Grote rivieren, de Maas en de Waal, beheerd door Rijkswaterstaat.
- Primaire waterlopen en kanalen, doorgaans legger.
- Secundaire en tertiaire waterlopen.

Voor de definitie van oppervlaktewaterparameters (oppervlaktewaterpeil en de natte omtrek) is gebruik gemaakt van beschikbare informatie uit oppervlaktewatermodellen, waar mogelijk. Waterschap De Dommel heeft een tool ontwikkeld (Sobek2Shape) die de uitwisseling tussen gegevens van het oppervlaktewatermodel naar het grondwatermodel voor een groot deel automatiseert. Er is gebruik gemaakt van gegevens van de rivieren (Maas en Waal) uit omliggende geohydrologische modellen (MORIA en IBRAHYM), van gegevens van regionale oppervlaktewatermodellen (Aa en Maas en De Dommel) en de locaties van de watergangen, legger profielen, stuwdijken en peilenkaart voor de peilbeheerde poldergebieden van waterschap Brabantse Delta.

Voor elk type waterloop of beheerder is verschillende soort informatie beschikbaar. Daarom wordt in dit hoofdstuk beschreven welke type informatie per beheerder beschikbaar is en hoe deze informatie per type/beheerder is verwerkt (paragraaf 6.2). De generiek ingezette tools hiervoor worden apart beschreven in paragraaf 6.3. De drainageweerstanden (paragraaf 6.5) zijn bepaald aan de hand van de mate vaninsnijding (paragraaf 6.3.4) van de grotere waterlopen. Het hoofdstuk wordt afgesloten met paragraaf 6.6 waarin wordt uitgelegd op welke wijze de maaiveldligging verwerkt wordt in modelinvoer.



Figuur 6-1: Schematische weergave opbouw modelbestanden waterlopen voor de drie waterschappen

6.2 Gebruikte gegevens en werkwijze per databron



In deze paragraaf wordt per niveau ingegaan op hoe dit gemodelleerd is en welke databron gebruikt is. Het type informatie en detail van de informatie verschilt per waterschap. In Tabel 6-2 is per deelstroomgebied vermeld welke bron is gebruikt.

Tabel 6-1: Gebruikte gegevens voor het oppervlaktewatersysteem

Paragraaf	Gebied	Gebruikte data	Bron	Uitgevoerde actie op basisdata
6.2.1	De Dommel	Sobek model ⁵	Geen rapport beschikbaar	Omgezet met tool (Sobek2Shape)
6.2.2	Aa en Maas	Sobek model ⁶	Geen rapport beschikbaar Streefpeilenkaart 2007	Omgezet met tool (Sobek2Shape)
6.2.3	Brabantse Delta	Peilenkaart en beheerregister	Streefpeilenkaart november 2010 en eerder	Maaiveldfiltering met Dep filter model (Haskoning, 2010)
6.2.5	Rivierengebied	MORIA rasters	Deltares, 2016	Zie hieronder
6.2.5	Overig Maas en Waal	MORIA rasters (ISG) en IBRAHYM (ISG)	Deltares, 2016 Deltares, 2017	Waterpeilen zijn omgezet naar IDF (ISSGRID) en ADO
6.2.5	Uiterwaarden	NHI 3.0	Deltares, 2013	
6.2.5	Limburg	NHI 3.0 en Simgro modellen (2011)	Deltares, 2013	
6.2.6	Peilbeheerste gebied	Praktijkpeilenkaart	Versie 2018	
6.2.7	Secundaire en tertiaire waterlopen	Top-10 kaart en AHN2		AHN filter
6.2.8	Buisdrainage	Buisdrainagekaart	Massop en Schuiling 2016 en 2017	Drainage in stedelijk gebied en hoofdwegen zijn niet gebruikt
6.2.9	Vlaanderen	Bestaande modelinvoer	Royal Haskoning, 2010	Overgenomen uit Brabant – Vlaanderen model
6.2.2	Infiltratiekaart	Waterschap Aa en Maas		
6.2.1–6.2.3	Kanaalpeilen	Waterschapsdata en RWS data		Handmatige correcties na visuele controle

Voor de waterschappen Aa en Maas en de Dommel zijn gebiedsdekkende bestanden vervaardigd uit informatie afkomstig uit representatieve Sobek modelleringen (G. Karimlou, 2017). Voor het gebied van Brabantse Delta is geen oppervlaktewatermodel beschikbaar. De primaire en secundaire waterlopen zijn voor Brabantse Delta geschematiseerd met behulp van informatie uit het beheerregister.

⁵ Er is vanuit verschillende detailmodellen van het waterschap een gebiedsdekkend bestand opgezet wat toegepast is in deze studie. Er is per seizoen een peil beschikbaar en dit is ook als zodanig opgenomen in de modellering.

⁶ Er wordt gebruik gemaakt van het gebiedsdekkende Sobek model van waterschap Aa en Maas (Oktober, 2016). Het gebiedsdekkende model is onder andere stationair doorgerekend voor een winter- en zomerafvoer.

6.2.1 Waterschap de Dommel



Sobek-modellen

Waterschap de Dommel heeft doorgerekende en gevalideerde Sobek modellen per deelgebied opgezet in het kader van het HMI-traject (2015-2016). De Sobek modellen bevatten informatie voor nagenoeg alle leggerwaterlopen, kanalen en een deel van de B-watergangen. De modelresultaten bevatten per seizoen representatieve waterstanden, natte omtrek en bodemhoogte. In het Brabant model worden deze gegevens op dit detailniveau (per seizoen, dus vier perioden per jaar) gebruikt.



Bepaling waterpeilen

De modelresultaten van de Sobek modellen zijn uitgevoerd met het programma Sobek2Shape tot GIS bestanden en samengevoegd in één bestand met behulp van ArcGis. Voor de kanalen is de modeluitvoer voor de peilen niet gebruikt, aangezien gedurende de controle is gebleken dat de peilen niet overeenkomen met de gehanteerde peilen door Rijkswaterstaat. Er is een apart bestand gebruikt waarin het streefpeil van de kanalen in het Dommelgebied is opgenomen ('Peilkanaal'7). Gedurende de controle van de peilen bleek dat op bepaalde locaties deze peilen niet overal kloppen. In dat geval zijn verbeteringen doorgevoerd (zie paragraaf 6.2.10).

Voor de overige watergangen waarvoor geen peil vanuit de Sobek modellen of het kanaalpeil bestand is, is gebruik gemaakt van de uitvoer van het AHN filter bestand. In het zuiden van het beheergebied van waterschap de Dommel blijven er dan een aantal waterlopen over waarvoor geen peil beschikbaar is. Dit zijn watergangen bij de landsgrens bij Budel. Hiervoor is handmatig een bestand gemaakt waarin het peil vanuit het AHN filter (Brolsma et al., 2017) voor aanliggende watergangen is overgenomen en toegekend aan de betreffende watergang. Dit is opgenomen in de parameter 'overig'. In Geolinqs zijn al deze acties uitgevoerd tot een dekkend bestand voor waterschap de Dommel en vervolgens ingevoerd in de tool Model2UngEND.



Bepaling bodemhoogte en natte omtrek

De bodemhoogte en natte omtrek zijn gedefinieerd aan de hand van de uitvoer van de Sobek modellen, met uitzondering van waterlopen waarvoor dit niet beschikbaar is. Daarvoor is de volgende aanname gedaan:

- Natte omtrek is gelijkgesteld aan 1 meter indien basisdata ontbreekt.
- Bodemhoogte is gelijkgesteld aan winterpeil minus 1 meter indien dit in de basisdata ontbreekt.

De infiltratieweerstand is voor de waterlopen die mogen infiltreren volgens de infiltratiekaart gedefinieerd met een formule afhankelijk van de drainageweerstand. De drainageweerstand is afhankelijk van de natte omtrek. De methodiek wordt nader uitgelegd in paragraaf 6.4 met kaarten van de afgeleide drainageweerstand (Figuur 6-20) en infiltratieweerstand (Figuur 6-22).



Controle kanaalpeilen

De kanaalpeilen zijn gecontroleerd en bleken niet overal te kloppen. In dat geval zijn correcties doorgevoerd (zie paragraaf 6.2.10). Voor het Wilhelminakanaal wijken de peilen sterk af van de gemeten peilen en de streefpeilen in het kanaal. Er is daarom gekozen om voor het kanaal een apart bestand met peilen te gebruiken om dit te corrigeren (DOkanalenSobek). Dit bestand is al eerder aangemaakt en komt goed overeen met de peilen zoals opgegeven door Rijkswaterstaat.

⁷ In de waterlopen module van Geolinqs heet deze parameter 'DOKanalensobek'

6.2.2 Waterschap Aa en Maas



Sobek-model

Waterschap Aa en Maas heeft een gebiedsdekkend en gevalideerd Sobek model (2016) wat voor zowel de winterafvoer als zomerafvoer is doorgerekend met resultaten voor de waterstand, bodemhoogte en natte omtrek. De uitvoer van het Sobek model is gevalideerd en afwijkingskaarten zijn beschikbaar. De ruwheid in het Sobek model is niet juist opgenomen waardoor er op sommige trajecten onbedoelde afwijkingen kunnen optreden. Op de kanalen rondom Helmond is de uitvoer niet bruikbaar. Dit is later verbeterd en wordt in de volgende alinea nader toegelicht. Er is een infiltratiekaart vanuit het grondwatermodel van Aa en Maas beschikbaar welke definieert welke waterlopen kunnen infiltreren.



Bepaling waterpeilen

De modelresultaten van de Sobek modellen zijn uitgevoerd met het programma Sobek2Shape tot GIS bestanden en samengevoegd in één bestand met behulp van ArcGis. De kanaalpeilen van het Sobek model rondom Helmond zijn gecorrigeerd met behulp van de parameter 'Peilkanaal'⁸. Voor de waterlopen waarvoor geen peil beschikbaar is in het Sobekmodel⁹, is het AHNfilter bestand gebruikt om tot een dekkend (peilen)bestand te komen. Dit bestand is in de tool Model2UngEND ingevoerd. De infiltratiekaart definieert in Geolinqs welke waterlopen kunnen infiltreren.



Bepaling bodemhoogte, natte omtrek en weerstanden

De bodemhoogte en natte omtrek zijn gedefinieerd aan de hand van de uitvoer van de Sobek modellen, met uitzondering van waterlopen waarvoor dit niet beschikbaar is. Hier is een aanname voor gedaan. De infiltratieweerstand is voor de waterlopen die mogen infiltreren volgens de infiltratiekaart gedefinieerd met een formule afhankelijk van de drainageweerstand. De drainageweerstand is afhankelijk van de natte omtrek. De methodiek wordt nader uitgelegd in paragraaf 6.4 met kaarten van de afgeleide drainageweerstand (Figuur 6-20) en infiltratieweerstand (Figuur 6-21).



Controle kanaalpeilen

De kanalen zijn opgenomen in het Sobek-model van waterschap Aa en Maas. Op deze locaties is het peil van de kanalen overgenomen uit deze modellen. Gedurende de controle van de peilen bleek dat op bepaalde locaties deze peilen niet overal kloppen. In dat geval zijn correcties doorgevoerd (zie paragraaf 6.2.10).

⁸ In de waterlopen module van Geolinqs heten deze parameters 'peilkanaal_w' en 'peilkanaal_z'

⁹ Dit treedt vaak op daar waar duikers liggen. Ook het niet aanvinken van de dwarsprofielen als rekenpunt in Sobek kan hier debeit aan zijn.

6.2.3 Waterschap Brabantse Delta



Beschikbare gegevens

Waterschap Brabantse Delta heeft voor de hydrologische modelstudie van West-Brabant de locatie van de watergangen, legger profielen, stuwstanden en een peilenkaart voor de peilbeheerde poldergebieden aangeleverd (Royal Haskoning, 2012). De stuwstanden en peilenkaart bevatten waarden representatief voor respectievelijk het winter- als zomerhalfjaar.

De peilenkaart is gebruikt voor het schematiseren van de peilen in de peilbeheerde gebieden. De hoogte van het maaiveld is gebruikt voor het afleiden van het drainageniveau van de kleinere waterlopen. De kaart van het maaiveld is vooraf gefilterd zodat er geen lokale depressies ontstaan. Het drainageniveau van de waterlopen in de vrij afwaterende gebieden is bepaald uit de ligging van de stuwen met Depfilter voor lijnen (zie paragraaf 6.3.2). Voor de kanalen in het beheersgebied van waterschap Brabantse Delta zijn de peilen uit het voorgaande grondwatermodel overgenomen.



Bepaling drainageniveau

De uitvoer van Depfilter (zie paragraaf 6.3.2) is in Geolinqs opgenomen. Dit dekkende bestand is vervolgens in de tool Model2UngEND ingevoerd, welke samen met de input van de andere waterschappen tot een Brabant model dekkend bestand leidt.

6.2.4 Waterschap Limburg



Oppervlaktewatermodellen in Limburg

Waterschap Limburg heeft een Sobek model, maar het bleek niet mogelijk om hier snel en betrouwbaar gegevens uit te krijgen. Daarom is teruggevallen op een eerder Simgro model uit 2011 en de NHI schematisatie.

6.2.5 Maas en Waal

Modelconcept



De grote rivieren Maas en de Waal kenmerken zich door een relatief grote natte omtrek en insnijding. De waterstanden op de grote rivieren kunnen fors variëren als gevolg van grote verschillen in afvoer. De grote rivieren zijn in het model opgenomen als vlakparameter wat goed aansluit bij de dimensies van de rivieren. In de modellering worden de waterstanden op de grote rivieren tijdsafhankelijk opgenomen door gebruik te maken van rasterbestanden uit MORIA of IBRAHYM (ISG bestanden). De waterstanden worden aan de representatieve vlakken toegekend en variëren per tijdstap.

Beschikbare gegevens uit regionale modellen (MORIA en IBRAHYM)



Voor het grootste deel van het modelgebied worden de rivierstanden geschematiseerd aan de hand van het MORIA ISG bestand. Achtergronden over de totstandkoming van dit bestand zijn gerapporteerd door Deltares (2016). Dit bestand is gebruikt vanwege de gedetailleerde 3D schematisatie van het rivierengebied (3D) en waterpeilen op basis van RWS metingen. Voor het bovenstroomse deel van de Maas is gebruik gemaakt van de ISG-file uit het IBRAHYM model (Deltares en Alterra, 2015). Het ISG-bestand van MORIA heeft tijdsafhankelijke informatie beschikbaar tot en met maart 2017.



Bepaling stationair waterpeil in het model

Alleen het waterpeil is overgenomen uit de ISG's. Of het waterpeil hoger is dan het maaiveldniveau in de uiterwaarden wordt tijdens het rekenproces bepaald. Er is voor gekozen om westelijk van het MORIA-modelgebied geen peilvakken aan de ISG's toe te voegen aangezien hier beperkt verschil in peil is. Hier wordt gerekend met een in de tijd constant peil. Voor het Markiezaat varieert het peil tussen NAP 0,0 en NAP +0,5 waarvoor een vast peil is aangehouden van NAP +0,25.



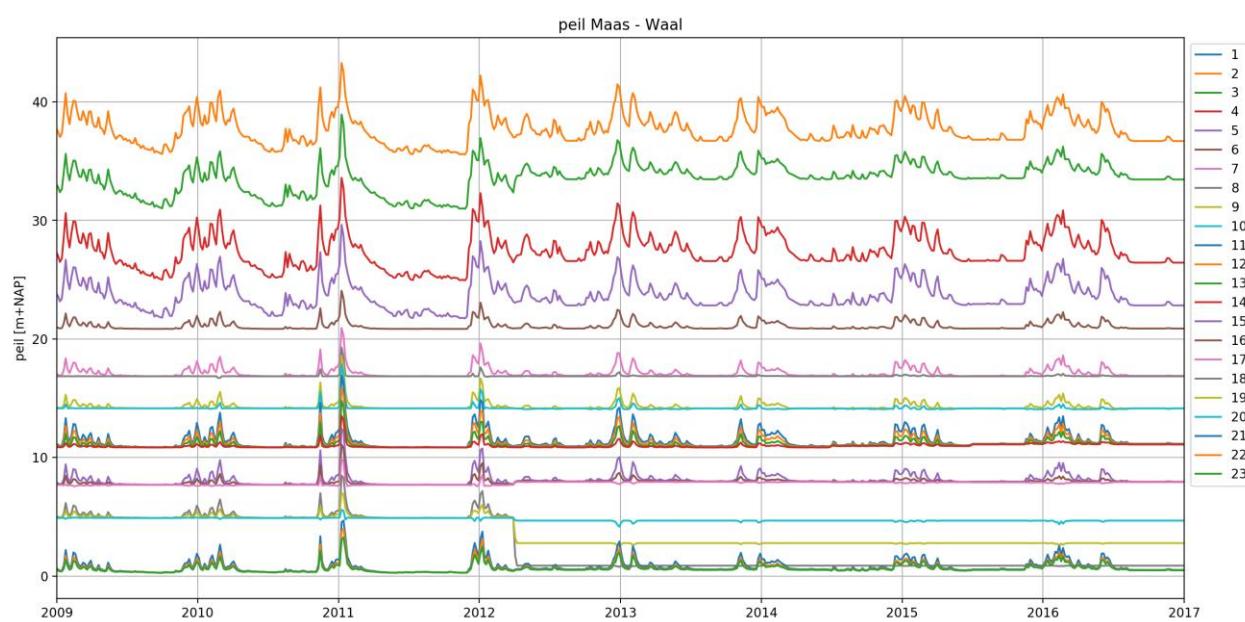
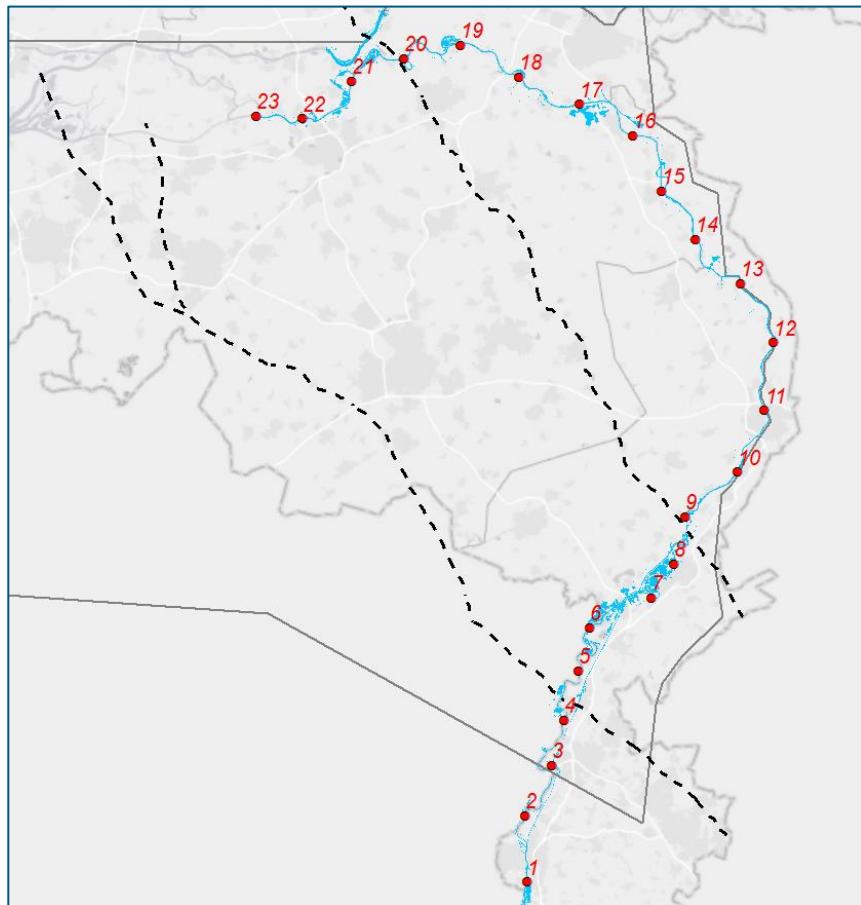
Bepaling tijdsafhankelijk waterpeil in het model

De waterstanden van de Maas en Waal zijn als volgt opgenomen in de tijdsafhankelijke berekening:

1. De iMOD batch-functie ISGGGRID is gebruikt om de waterpeilen in de ISG's om te zetten naar IDF bestanden met dezelfde modelgrenzen, resolutie en tijdstappen als het grondwatermodel. Deze tool voert alleen een waterpeil uit wanneer dit hoger is dan het rivierbed zoals vastgelegd in de ISG (anders NODATA). Er wordt daarbij rekening gehouden met de ligging van zomerdijken en kades
2. De IDF's zijn omgezet naar tijdsafhankelijke ADO files.
3. In de tijdsafhankelijke berekening zijn per tijdstap de juiste rivierpeilen uitgelezen en gecombineerd met de overige waterpeilen in het topsysteem (parameter RP3). Wanneer het rivierpeil gelijk is aan NODATA (in de uiterwaarden bij laag water), is de maaivelddrainage actief en heeft het rivierpeil geen effect.

De ingevoerde Maaspeilen zijn in één grafiek weergegeven in Figuur 6-2.

Voor het Limburgse deel van het modelgebied is gebruik gemaakt van informatie uit Simgro modellen (gegevens van 2011). Voor de schematisatie van het oppervlaktewatersysteem van Limburg en het uiterwaardengebied rond de grote rivieren is voor de peilen en drainageparameters gebruik gemaakt van het NHI (3.0). Dit is gemodelleerd in het topsysteem met behulp van vlakdekkende parameters. Er is gebruik gemaakt van een zomer – en winterpeil.



Figuur 6-2: Ingevoerde gemeten waterpeilen van de Maas. De meetpunten 1 en 2 liggen buiten het modelgebied

6.2.6 Peilbeheerst gebied

De streefpeilenkaart in combinatie met de bodemhoogtes van de legger zijn gebruikt voor het schematiseren van de peilen van de sloten en watergangen in de peilbeheerde gebieden. Dit zijn de gebieden waar de blauwe lijnen ontbreken in Figuur 6-7. De hoogte van het maaiveld en AHN filter zijn gebruikt voor het afleiden van het drainageniveau.

6.2.7 Secundaire en tertiaire waterlopen

De secundaire en tertiaire waterlopen worden beheerd door particulieren of terreinbeherende organisaties. De secundaire waterlopen zijn opgenomen in de schouw en kennen een onderhoudsplicht. De tertiaire waterlopen hebben dit niet. Voor de secundaire en tertiaire waterlopen is minder gecontroleerde informatie beschikbaar. Er is gebruik gemaakt van inmetingen waar mogelijk. Deze informatie ontbreekt meestal en dan is het drainageniveau afgeleid uit de Top-10 kaart en het AHN filter.

6.2.8 Buisdrainage



Gebruik van drainagekaart

De buisdrainagekaart is een aanpassing ten opzichte van het 2014 model. In deze versie werd een constante weerstand (70 dagen) en een constante draindiepte (0,9 m onder maaiveld) aangehouden. In het grondwatermodel 2018 is gebruik gemaakt van een nieuwe kaart waarop perceelniveau de aanwezigheid van buisdrainage is weergegeven.



Beschikbare gegevens

Ligging van de drainage is ontleend aan de buisdrainagekaart 2015 (Massop en Schuling, 2016) en de aanpassing hiervan in 2017. Deze kaart bevat de buisdrainage in Nederland, gebaseerd op informatie uit de meitellingen¹⁰ en aangevuld met informatie uit andere bronnen. In geval de percelen van het bedrijf niet of geheel is gedraineerd, zijn geen verdere bewerkingen nodig. Indien een gedeelte van het bedrijf gedraineerd is, is gebruik gemaakt van karteerbare kenmerken, zoals gewas, bodem en grondwaterstand om te voorspellen waar de drainage zal liggen. De afgeleide locaties met buisdrainage kunnen dan afwijken van de werkelijkheid.

Alterra heeft de drainagediepte en drainageweerstand als volgt bepaald:

- De drainagediepte is afhankelijk van het grondgebruik en de bodemsoort.
- De drainageweerstand varieert van 20 tot 230 dagen afhankelijk van het drainagecriterium en diepteligging van de drains. Deze drainagediepte en de drainageweerstand binnen de Provincie Noord-Brabant zijn overgenomen in het model.

¹⁰ In de gecombineerde opgave geven agrarische ondernemers elk jaar gegevens door voor de Landbouwtelling en de mestwetgeving. De gegevens over het voorgaande jaar moeten uiterlijk 15 mei worden doorgegeven. Daarom wordt deze opgave ook wel meitelling genoemd.

Aanpassing buisdrainagekaart waterschap Aa en Maas

In 2017 is detailinformatie toegevoegd met locaties van gedraineerde percelen in het beheersgebied van waterschap Aa en Maas (Massop en Schuiling, 2017). Het gaat om een totale oppervlakte van 9170 ha (ten opzichte van de totale oppervlakte van 164.000 ha van het gehele waterschap). De selectie is gedaan op basis van bedrijven die geheel of gedeeltelijk zijn gedraineerd volgens de kaart van Aa en Maas. Voor deze bedrijven heeft opnieuw de toekenning van buisdrainage plaatsgevonden zoals beschreven in Massop en Schuiling (2016).

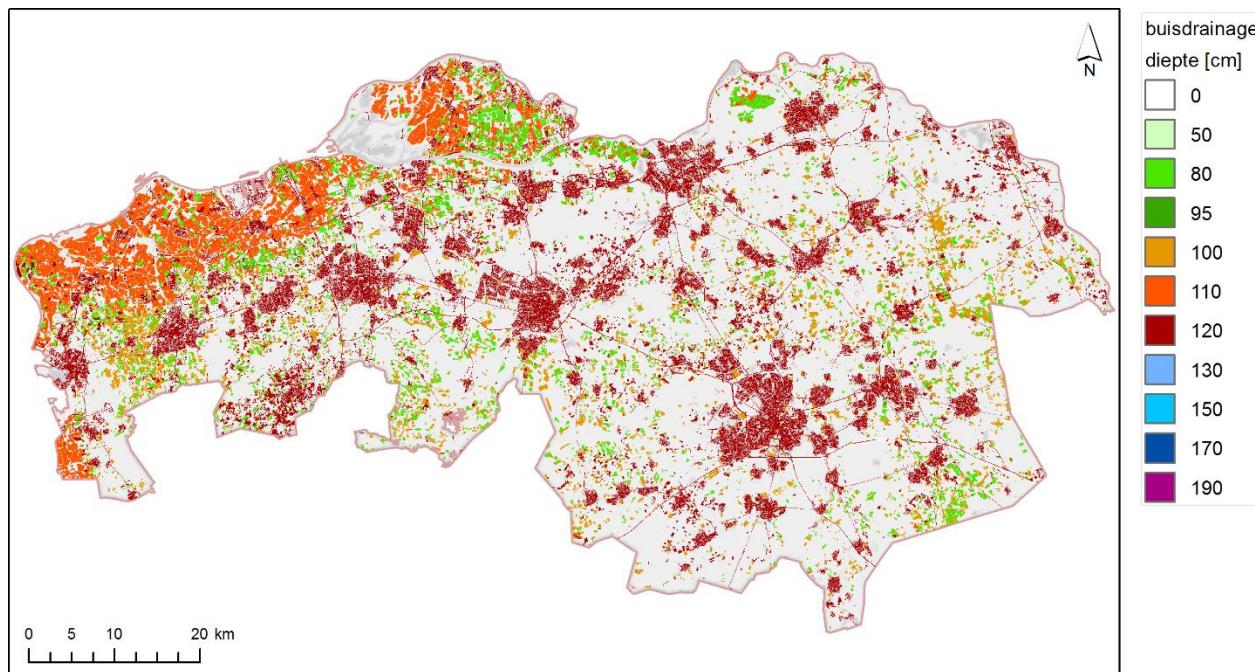
Een aantal percelen uit het drainagebestand van Aa en Maas vallen buiten de BRP-percelen, deze percelen zijn later toegevoegd. Verder zijn de volgende gebruiksvormen toegevoegd voor zover deze nog niet zijn meegenomen:

- Boom- fruitkwekerijen
- Boomgaarden
- Sportterreinen
- Kassen
- Begraafplaatsen
- Bebouwd gebied en infrastructuur en
- Vliegvelden



Drainagediepte in Brabantmodel

De drainagediepte is weergegeven in Figuur 6-3. In noordwest Brabant komen buisdrains met een diepte van 110 cm-mv veel voor. Elders hebben drains een diepte van 80 tot 95 cm. Voor bebouwd gebied en grote wegen wordt een drainagediepte van 120 cm-mv en een drainageweerstand van 100 dagen aangenomen. Volgens deze kaart heeft al het bebouwd gebied en de hoofdwegen drainage op een diepte van 120 cm-mv. We hebben ervoor gekozen om de drainage van bebouwd gebied niet mee te nemen in de modellering. Deze keuze is gemaakt tijdens de ijking op basis van de geconstateerde modelafwijkingen. Figuur 6-3 is dus overgenomen in het model, minus de aangenomen drainage voor bebouwd gebied en hoofdwegen.



Figuur 6-3: Diepte buisdrainage onder maaiveld in het Brabantmodel

6.2.9 Oppervlaktewater in België



Modelconcept

Het grondwatersysteem in België is in minder detail gemodelleerd dan het grondwatersysteem van Noord-Brabant. Het Brabantmodel is ook niet bedoeld om studies in België mee uit te voeren.

Maar om goed berekeningen binnen Noord-Brabant te kunnen uitvoeren is het nodig om een deel van België als rand van het model mee te nemen. Voor de modellering van België is gebruik gemaakt van een eerdere modelstudie voor België – Noord-Brabant (zie onderstaand kader).

Hydrogeologische studie België – Noord-Brabant (Royal Haskoning, 2010)

In 2009 en 2010 is door Royal Haskoning in opdracht van Brabant Water een grondwatermodel opgezet dat zowel Vlaanderen als Noord-Brabant omvat. Het is opgezet voor Brabant Water ten behoeve van de eigen bedrijfsvoering en het geven van input in het Provinciaal Waterhuishoudingsplan. Het model is gebruikt om een eerste inzicht te krijgen in de volgende twee aspecten:

1. Wat is de maximaal te onttrekken hoeveelheid grondwater in Noord-Brabant?
2. Wat is de herkomst van het grondwater dat nu door de Brabantse winningen wordt onttrokken?

Het geohydrologisch model is in de periode augustus 2008 – mei 2009 opgebouwd. Hierbij is aangesloten op de eerste versie van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI), in onderlinge samenwerking met Deltares. Basisbestanden uit Vlaanderen en Nederland zijn eerst verzameld in een databank. Vervolgens zijn de geologische gegevens aan weerszijden van de grens op elkaar afgestemd in het geohydrologisch model.

Voor het Brabantmodel 2018 bevat de hydrogeologische studie België – Noord-Brabant waardevolle gegevens op een grof detailniveau. Deze gegevens worden benut om de randen van het model te kunnen vullen. Het detailniveau is dus van een lager niveau dan in het aandachtsgebied van het model (Noord-Brabant).



Beschikbare gegevens waterlopen Vlaanderen

De waterlopen in Vlaanderen zijn beschikbaar in de Vlaamse Hydrografische Atlas (VHA; www.geopunt.be). De waterlopen zijn als lijn in de HGK opgenomen. Het bestand bevat zowel de kanalen als de rivieren en beken.

Schematisatie kanalen

De volgende zeven kanalen zijn in het model aangebracht (Figuur 6-4):

- 
- Albertkanaal.
 - Kanaal van Dessel-Turnhout-Schoten.
 - Kanaal Dessel-Kwaadmechelen.
 - Kanaal Bocholt-Herentals.
 - Kanaal van Beverlo.
 - Kanaal Briegden-Neerharen.
 - Zuid-Willemsvaart.



Figuur 6-4: Kanalen inclusief sluizen in België (Binnenvaart, 2009)

Voor de kanalen zijn de waterpeilen ingevoerd afkomstig van de Dienst voor de Scheepvaart. Op basis van Figuur 6-4 zijn de peilen gekoppeld aan de sluisvakken en ingevoerd in het model. Voor de (Zee)Schelde is het gemiddelde peil van meetpunt Albertdok, opgelegd, TAW +2.80 m (Hydronet, 2009). Dit is gelijk aan 47 cm boven NAP. Voor het Netekanaal is geen waterpeil bekend en is een waterpeil van ongeveer 1,5 meter onder maaiveld aangenomen. Voor de Antitankgracht ten zuiden van de Kalmthoutse Heide zijn de peilen overgenomen uit een oppervlaktewatermodel dat is opgesteld door Haskoning België (Haskoning, 2011).

Voor de kanaalweerstand is een waarde aangehouden van 150 tot 1000 dagen. Er is aangenomen dat er een weerstandshoudende sliblaag op de kanaalbodem aanwezig is.

Er is voor de beken in België geen peil bekend. In een eerdere studie (Royal HaskoningDHV, 2010) is een waterpeil aangehouden van 1,5 meter onder maaiveld. De drainageparameters en natte omtrek zijn weergegeven in Tabel 6-2. Er wordt van uitgegaan dat de beken kunnen draineren en niet kunnen infiltreren.

Tabel 6-2: Parameters waterlopen als lijnstuk opgenomen

Breedte [m]	Uittreeweerstand [d]	Type	Intreeweerstand [d]
20-50	15 - 40	Kanalen	150 -1000
10	5	Grottere beken	>>
2,5	2,5	Kleinere beken	>>

Gevoeligheid kanaalweerstand

Om te toetsen hoe gevoelig de berekende grondwaterstanden in Nederland zijn voor de kanaalweerstand, is eerder (Royal Haskoning, 2010) een gevoelighedsanalyse uitgevoerd. Hieruit bleek dat zelfs met een extreem lage uittreeweerstand (1 dag) voor de kanalen in België er geen verschillen merkbaar zijn voor het watersysteem in Noord-Brabant, met uitzondering van de omgeving van winning Luyksgestel. Dit is te verklaren omdat de veranderingen doorwerken in het ondiepe grondwatersysteem en daarom niet ver uitstralen. Indien het kanaal van Herentals naar Bocholt infiltrerend werkt, heeft dit een invloed op de grondwaterstanden in de omgeving van Luyksgestel. In een latere studie bij Herentals is de intreeweerstand na kalibratie gesteld op 160 dagen. Deze waarde is overgenomen in het Brabantmodel.



Schematisatie landbouwontwatering

De landbouwontwatering in Vlaanderen is als vlakparameter in het model opgenomen en toegevoegd in niveau 2, de secundaire waterlopen. Voor de drainagediepte is een kaart gebruikt met een klasse-indeling gebaseerd op de Vlaamse bodemkaart. De diepte varieert tussen 0,4 en 1,5 meter ten opzichte van maaiveld. Als drainageweerstand is uniform 100 dagen aangehouden.

De waarden zijn overgenomen uit de studie hydrogeologie van België – Noord Brabant (Royal HaskoningDHV, 2010).

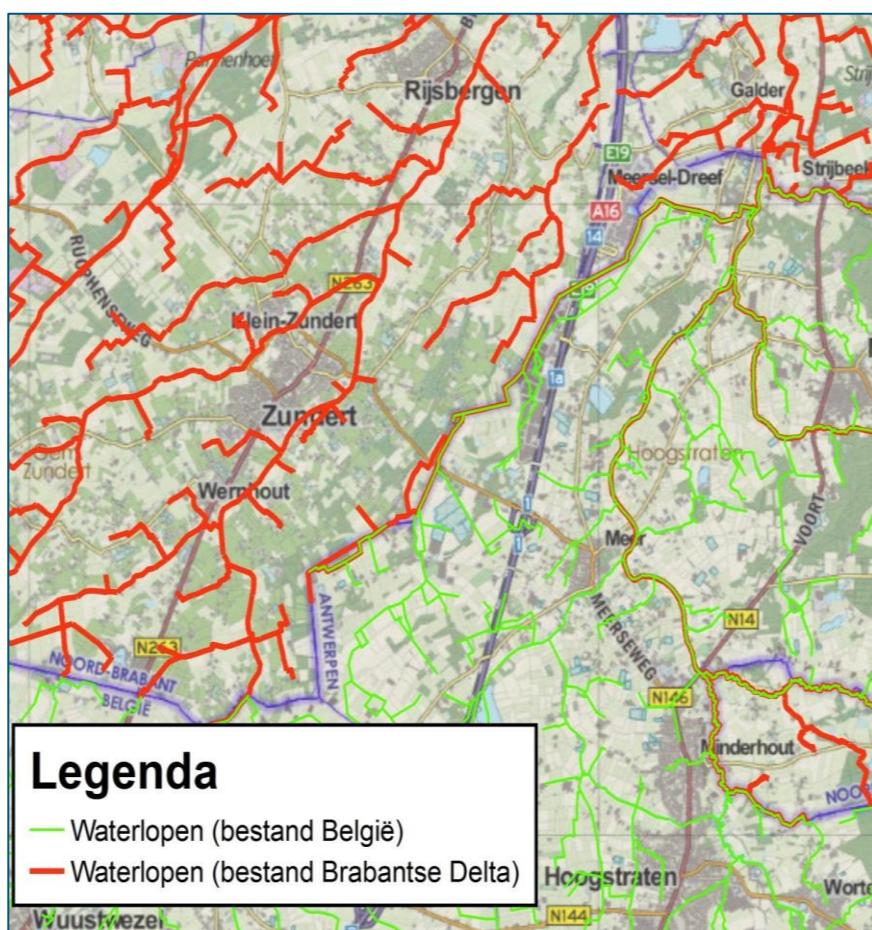


6.2.10 Controle aansluiting waterlopen

Het Brabantmodel maakt gebruik van veel verschillende bronnen met oppervlaktewaterdata. Er is een aantal controles uitgevoerd om na te gaan hoe de overgangen in waterlopen tussen verschillende bronnen uitpakken:

- Sluiten waterpeilen goed op elkaar aan?
- Zitten er geen dubbele waterlopen in het samengestelde bestand?

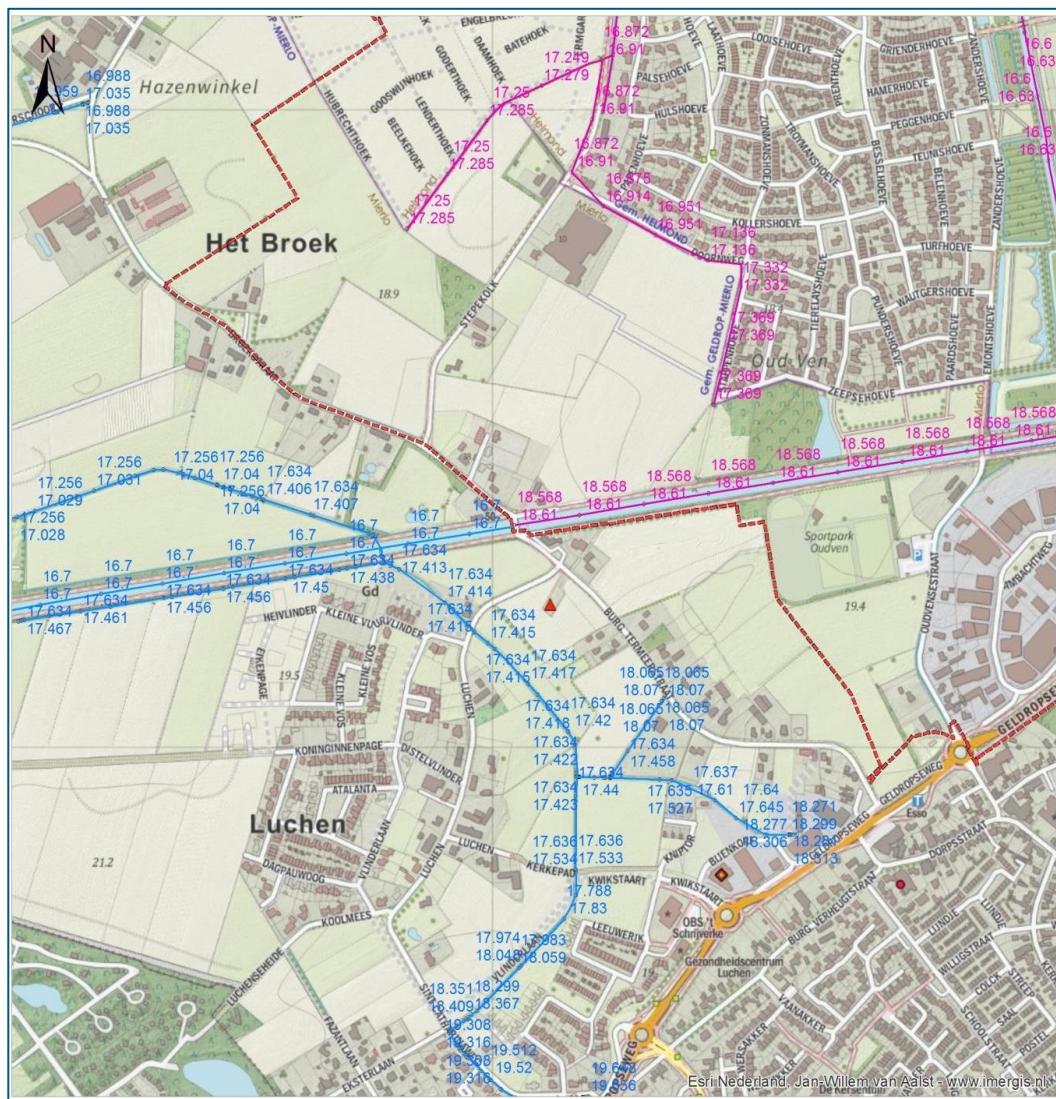
Dubbele waterlopen kunnen ontstaan door het combineren van bestanden, bijvoorbeeld langs de Nederlands-Belgische grens. In Figuur 6-5 is voor de omgeving van Zundert weergegeven welke waterlopen in het Brabantse Delta bestand en in het Belgische bestand zitten. Te zien is dat er overlap is.



Figuur 6-5: Controle op overlap tussen ligging waterlopen in Nederland en België in de omgeving van Zundert

Er is veel zorg besteed aan het opbouwen van een bestand zonder overlap, met name op de grens tussen de waterschappen in Brabant en op de Nederlands-Belgische grens. Bij overlap krijgt de ligging of waterstand uit de Nederlandse bron voorrang boven de Belgische bron. Bij overlap tussen waterlopen krijgt het beherende waterschap voorrang. Deze bewerkingen zijn handmatig uitgevoerd.

Op verschillende locaties tussen waterschap de Dommel en Aa en Maas zijn de overgangen in beeld gebracht voor de waterstanden. De waterstanden komen meestal goed overeen, met uitzondering van een aantal locaties op de kanalen. De locaties zijn teruggekoppeld aan de waterschappen en de resultaten zijn ook vergeleken met monitoringsdata van Rijkswaterstaat. In de bronbestanden van waterschap Aa en Maas en De Dommel blijken op een aantal locaties afwijkingen ten opzichte van de daadwerkelijk geregistreerde peilen voor te komen. Dit is het gevolg van modelkeuzes in het Sobekmodel. Als voorbeeld is het verschil in waterstand op het Eindhovensch kanaal bij de waterschapsgrens weergegeven in Figuur 6-6. In dit geval klopten de berekende gegevens van waterschap Aa en Maas niet. Voor alle locaties waar significante afwijkingen voorkomen zijn tijdelijke correcties gemaakt aan de hand van de gemeten waarden door Rijkswaterstaat. Wanneer op termijn de Sobek modellen zijn aangepast is deze correctie niet meer nodig.



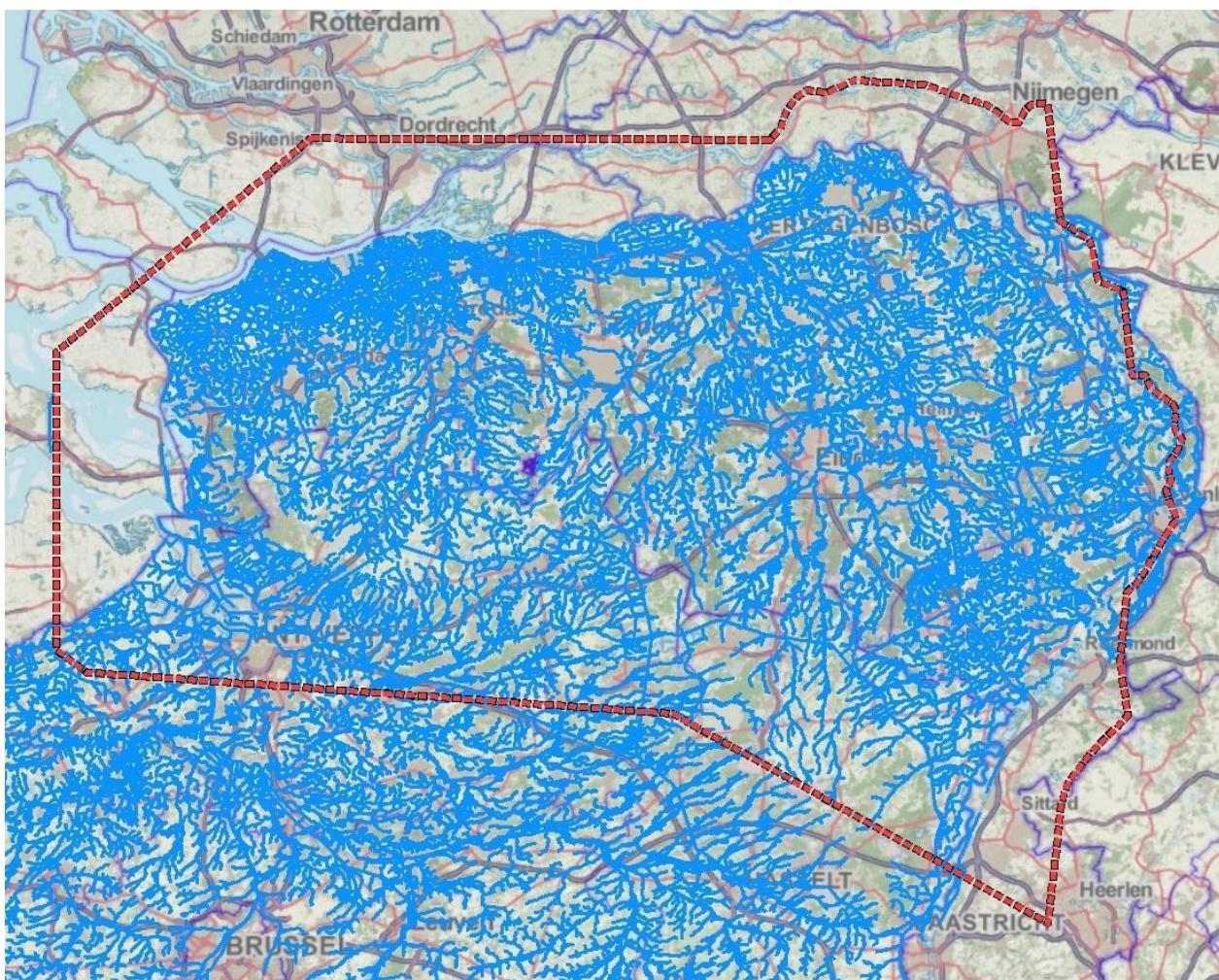
Figuur 6-6: Peilen modellen van Aa en Maas (roze) en de Dommel (blauw) – boven is zomerpeil, beneden is winterpeil

6.3 Modellering en tools

6.3.1 Geolinqs module primaire waterlopen en kanalen



De primaire waterlopen zijn waterlopen beheerd door het waterschap. Voor deze waterlopen is vaak veel informatie beschikbaar vanuit het waterschap, zoals het dwarsprofiel, locaties van kunstwerken en dimensies. De beschikbare informatie is via oppervlaktewatermodellen op lijnniveau toegekend in het model. Er is een aparte Geolinqs module toegepast waarbinnen alle primaire waterlopen zijn opgenomen met één gegenereerde shapefile met alle oppervlaktewaterinformatie. Dit scheelt veel bewerkingen binnen het grondwatermodel. Per waterloop is de beschikbare informatie toegepast om zodoende tot een gebiedsdekkend bestand met waterstanden voor de primaire waterlopen te komen. Figuur 6-7 geeft een indruk van de opgenomen primaire waterlopen voor het modelgebied.



Figuur 6-7: Opgenomen primaire waterlopen in Geolinqs binnen de modelgrens

Resultaat van Geolinqs



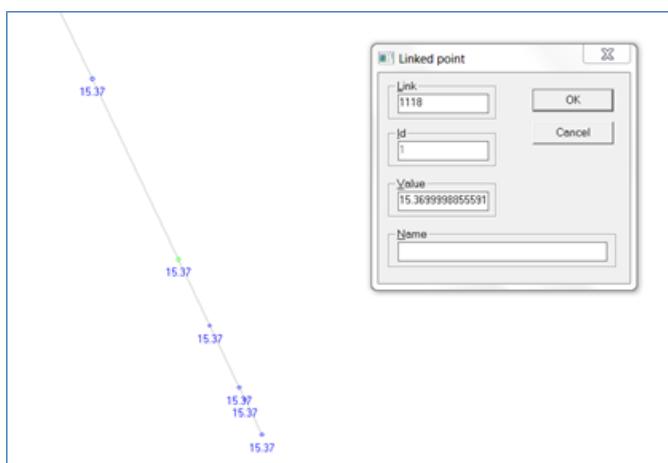
Resultaat van Geolinqs zijn twee bestanden:

- Een lijnenbestand in een grid met een uniek id nummer.
- Een puntenbestand met een nummer dat verwijst naar de waterloop waarbij het punt hoort (bovenstaande id).

Het puntenbestand bevat per punt de volgende informatie:

- Een uniek nummer.
- Een koppeling naar de waterloop waarbij het punt hoort bijvoorbeeld het waterloop id.
- Een parameter (peil, natte omtrek, drainageweerstand of infiltratieweerstand).
- De parameterwaarde van de betreffende parameter.

Door Triwaco worden de verschillende bestanden aan elkaar gekoppeld tot een uniform bestand. In Figuur 6-8 is een indruk gegeven van het puntenbestand (voorjaarspeil in dit geval). ‘Link’ geeft het bijbehorende waterloop-id (weergegeven als grijze lijn). ‘Value’ is de waarde van de parameter, in dit geval dus het voorjaarspeil.



Figuur 6-8: Voorbeeld van het puntenbestand waarin het voorjaarspeil is gedefinieerd van een waterloop



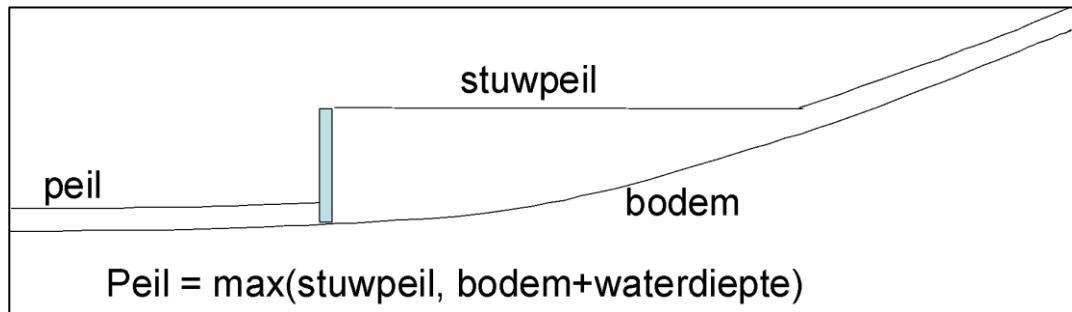
6.3.2 Depfilter voor bepaling drainageniveau

Wanneer grondwaterstanden aan maaiveld komen te staan en er grondwater uitreedt, kan dit via het maaiveld afgevoerd worden naar de waterlopen. Dit proces, afvoer over maaiveld, kan gemodelleerd worden door het maaiveld als drainageniveau op te nemen. In sommige gevallen wordt het water echter niet direct afgevoerd, doordat het natuurlijke reliëf dusdanig is dat het deze ‘depressie’ eerst gevuld moet worden voordat afvoer plaats gaat vinden. De afvoer over maaiveld wordt bepaald met een filteringstechniek waarmee het laagste niveau van afwatering per cel wordt gezocht ('Depfilter').

Voor het Brabantmodel met modelcellen van 250 * 250 meter is dit niet relevant en daarom achterwege gelaten. Het drainageniveau in Brabantse Delta is wel bepaald met deze methode omdat hier een oppervlaktewatermodel ontbreekt. Voor detailstudies kan deze filtering wel uitgevoerd worden.

Bepalen van waterpeilen in waterlopen met Depfilter voor lijnen

In het gebied van Brabantse Delta is gebruikt gemaakt van gegevens afkomstig van stuwhoogtes en bodemhoogtes. Om daarmee juiste waterpeilen in het grondwatermodel op te leggen, is een rekenmodule ontwikkeld die de invloed van stuwen in een waterloop kan bepalen in het bovenstroms gedeelte van de waterloop.



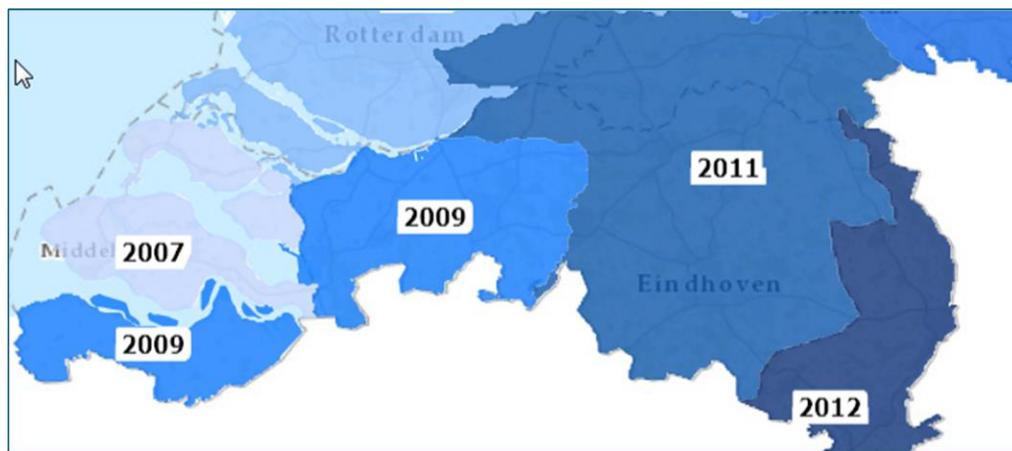
Een stuw heeft een bepaalde invloed op het waterpeil in de waterloop. Deze invloed is eindig. Verder bovenstroms is er namelijk een punt waar het (denkbeeldige) waterpeil lager komt te liggen dan de natuurlijke waterdiepte. Vanaf dit punt en verder bovenstroms wordt de natuurlijke waterdiepte als peil in het grondwatermodel gehanteerd. Er wordt onderscheid gemaakt worden tussen zomer- en wintersituaties.

6.3.3 AHN filter voor bepaling drainageniveau grotere waterlopen

**AHN filter**

Voor het bepalen van het drainageniveau van waterlopen is gebruik gemaakt van het AHN filter ontwikkeld door Deltares. Met het AHNfilter kan uit het maaiveldbestand AHN2 (0.5×0.5) het drainageniveau afgeleid worden voor TOP10 waterlopen (Brolsma et al., 2017). Het filter houdt rekening met objecten zoals bomen en huizen en filtert op lokale depressies.

Hoogtemetingen zijn beschikbaar vanuit het AHNfilter top10lijnen gridbestand. Dit drainageniveau is een momentopname en gebaseerd op het laagste bekende maaiveldniveau nabij de waterloop. Het afgeleide drainageniveau is representatief voor het moment van het invliegen van het AHN2. In Figuur 6-9 is weergegeven in welk jaar het AHN2 is ingevlogen.

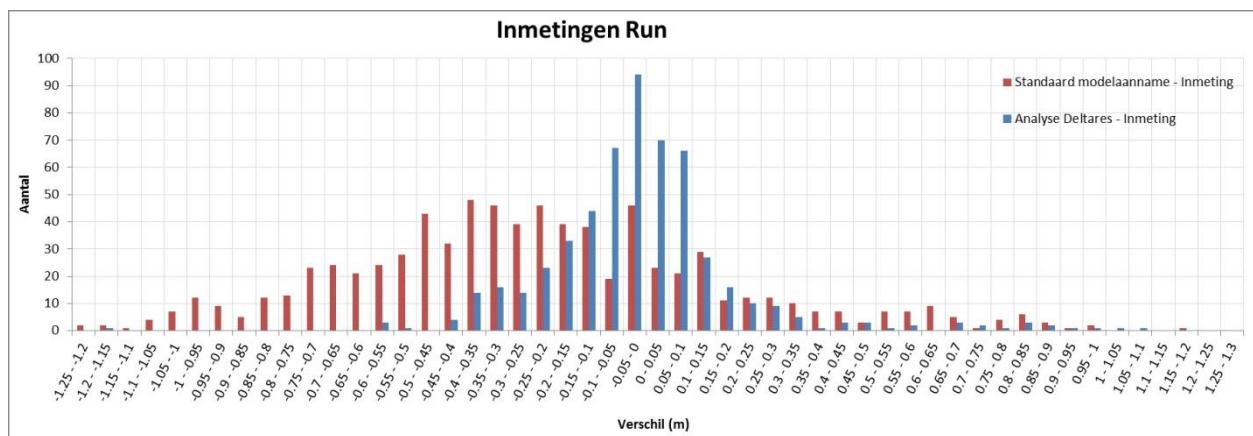


Figuur 6-9: Inwinjaren AHN2



Vergelijking met methodiek 2014

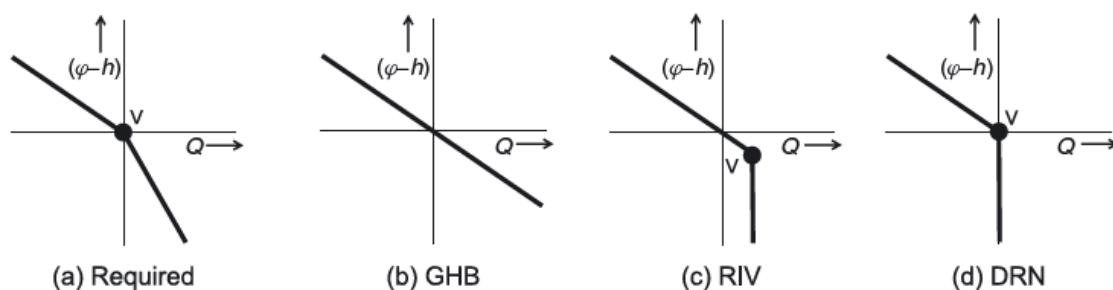
In eerdere versies van het Brabant model (2014) werd gebruikt gemaakt van een schatting van het drainageniveau ten opzichte van maaiveld op basis van landgebruik. Dit werd vervolgens via filteringstechniek gecorrigeerd zodat er een hydrologisch logisch verlopend niveau werd verkregen. Deze techniek is veelvuldig gebruikt, ook in detailstudies. In Figuur 6-10. is voor het deelgebied de Run het verschil weergegeven van het drainageniveau bepaald met het AHNfilter ten opzichte van de inmetingen. Ook is het detailniveau van de eerdere methodiek weergegeven ("standaard modelopname"). Uit deze analyse uitgevoerd door waterschap De Dommel (Karimlou, 2017) blijkt dat de methodiek met het AHN filter nauwkeuriger is dan de oude methode.



Tabel 6-3: Afwijkingen tussen modelmatig bepaalde ligging van het drainageniveau met het AHN (Deltares) en de standaard methode vergeleken met inmetingen

6.3.4 Onderscheid drainage en infiltratieweerstand in MODFLOW

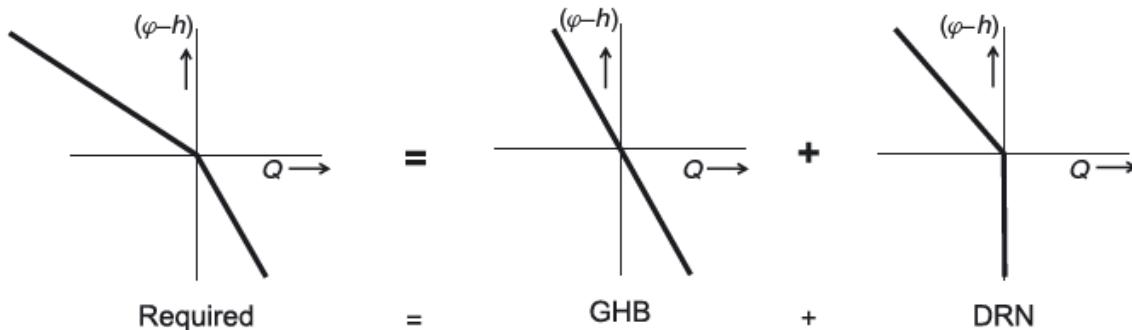
We gaan er van uit dat de infiltratieweerstand hoger is dan de drainageweering. Om dat in MODFLOW voor elkaar te kunnen krijgen is het nodig verschillende packages te combineren.



Figuur 6-10: Relatie tussen grondwaterstand min waterpeil ($\varphi - h$) en het debiet (Q) voor de verschillende MODFLOW packages

Onderdeel a uit Figuur 6-11 (Zaadnoordijk, 2009) geeft de gewenste relatie tussen grondwaterstand, waterpeil en debiet, met een verschillende drainage en infiltratieweerstand. In grafiek (b), (c) en (d) is de relatie te zien zoals die in de MODFLOW packages is ingebouwd. GHB heeft een lineaire relatie met eenzelfde weerstand voor drainage als infiltratie. In de DRN-package is alleen sprake van drainage. In de RIV-package is de infiltratie begrensd; als de grondwaterstand onder het bodemniveau zakt, neemt de infiltratie niet verder toe.

De “gewenste” grafiek kent deze begrenzing niet. Door het combineren van de GHB-package en de DRN-package is het mogelijk deze “gewenste” schematisatie te verkrijgen met een verschillende drainage- en infiltratieweerstand echter zonder begrenzing van de infiltratie, zie Figuur 6-12.



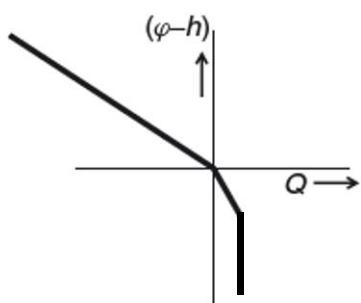
Figuur 6-11: Gewenste Q/h samengesteld met de GHB- en de DRN-package

De infiltratie wordt in de GHB-package geregeld op basis van de infiltratieweerstand, omgerekend naar een conductance. Een deel van de drainage wordt geregeld in GHB-package met dezelfde infiltratieweerstand. Het verschil tussen de drainageweerstand en de infiltratieweerstand wordt toegekend aan de DRN-package:

$$\text{conductance(DRNpackage)} = \text{conductance(drainage)} - \text{conductance(infiltratie)}$$

$$\text{conductance(DRNpackage)} = \frac{\text{celoppervlak}}{\text{drainageweerstand}} - \frac{\text{celoppervlak}}{\text{infiltratieweerstand}}$$

Als naast een verschillende drainage- en infiltratieweerstand ook een begrenzing in infiltratie is gewenst, is het mogelijk op dezelfde manier de RIV- en DRN-package te combineren. Deze schematisatie is niet gebruikt in het Brabantmodel2018.



Figuur 6-12: Gebruikte Q/h relatie

6.4 Insnijdingsconcept en natte omtrek



Insnijdingsconcept model 2014

Waterlopen zijn in één of meerdere modellagen actief, afhankelijk van de bodemhoogte. Ondiepe waterlopen draineren slechts de deklaag. Diepere waterlopen staan in contact met het watervoerend pakket. In de vorige versie van het Brabantmodel (2014) werd de weerstand van waterlopen gelijk verdeeld over de modellagen waarin de waterloop actief is. Hierbij werd geen rekening gehouden met het effect van de watervoerendheid van de modellagen. Wanneer een waterloop in contact staat met een goed doorlatende zandlaag, is het effect van deze waterloop veel groter dan wanneer de omliggende bodemlagen een lage doorlatendheid hebben. Dit concept is in 2018 verbeterd.



Gekozeninsnijdingsconcept

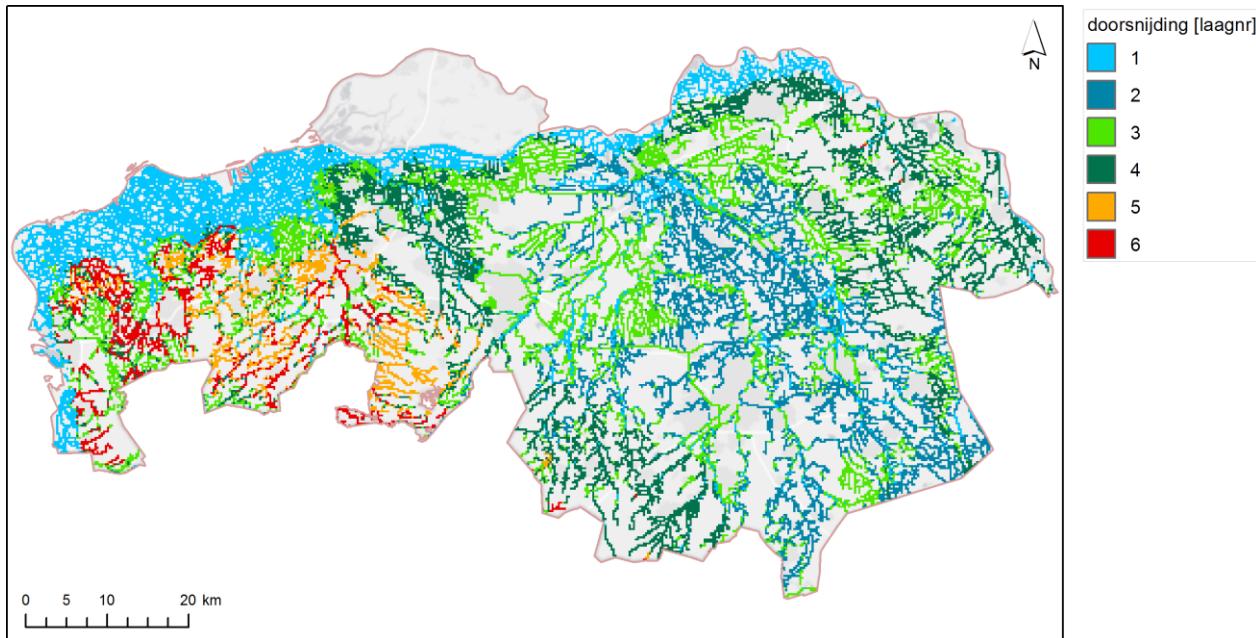
De insnijding van modellagen wordt in het model bepaald door de bodemhoogte te vergelijken met de top van iedere modellaag. Figuur 6-13 presenteert het resultaat van deze vergelijking. Als de waterbodem dieper ligt dan de top van de modellaag, dan is de waterloop in deze laag actief en wordt een conductance groter dan nul toegekend. De conductance is gelijk aan het oppervlak van de waterloop binnen de cel, gedeeld door de drainage of infiltratieweerstand.

In het Brabantmodel 2018 is de volgende aanpak gebruikt:

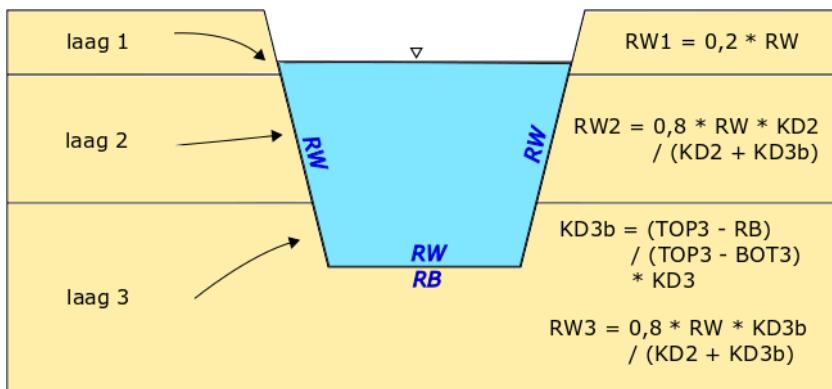
- De natte omtrek is verdeeld voor waterlopen die modellagen doorsnijden. De drainage- en infiltratieweerstand is in iedere modellaag gelijk (zie paragraaf 6.5).
- 20% van de natte omtrek is toegekend aan de bovenste modellaag, zodat het effect van de waterloop zichtbaar is in de berekende freatische grondwaterstand (PHI1), ook als de watervoerendheid laag is.
- 80% van de natte omtrek is verdeeld over de overige doorsneden modellagen aan de hand van het doorlaatvermogen van de modellagen.

Door rekening te houden met de watervoerendheid van de modellagen wordt de insnijding van goed doorlatende lagen beter zichtbaar in het modelresultaat. De methode is conceptueel weergegeven in Figuur 6-14, voor een waterloop die insnijdt tot in laag 3.

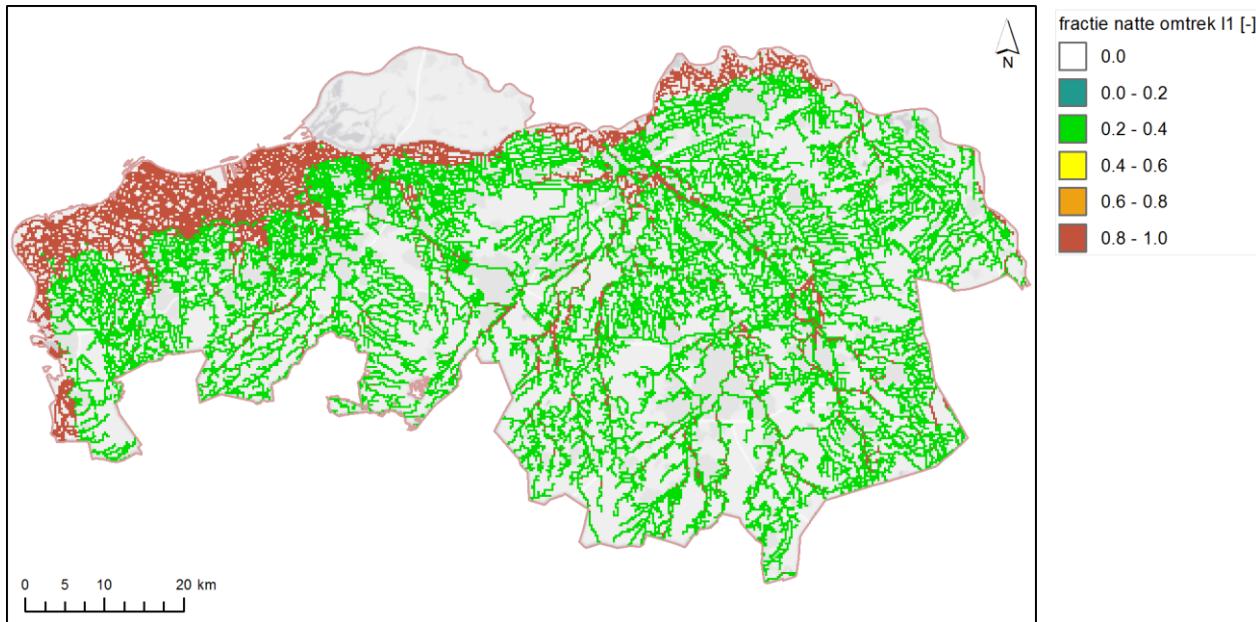
In het Brabantmodel 2018 zijn waterlopen geschematiseerd in laag 1 t/m 6. De berekende natte omtrek per modellaag is weergegeven in Figuur 6-15 tot en met Figuur 6-20. In het peilgestuurde gebied ligt een groot deel van de waterlopen volledig in de Holocene deklaag (modellaag 1). In de Centrale Slenk liggen de meeste waterlopen in de Boxtel en ondiepe Sterksel zanden (laag 2 en 3). Insnijding in laag 4 komt voor op het Kempisch Plateau en de Horst (respectievelijk Sterksel en Beegden zanden). Insnijding in laag 5 en 6 komt voor in West-Brabant.



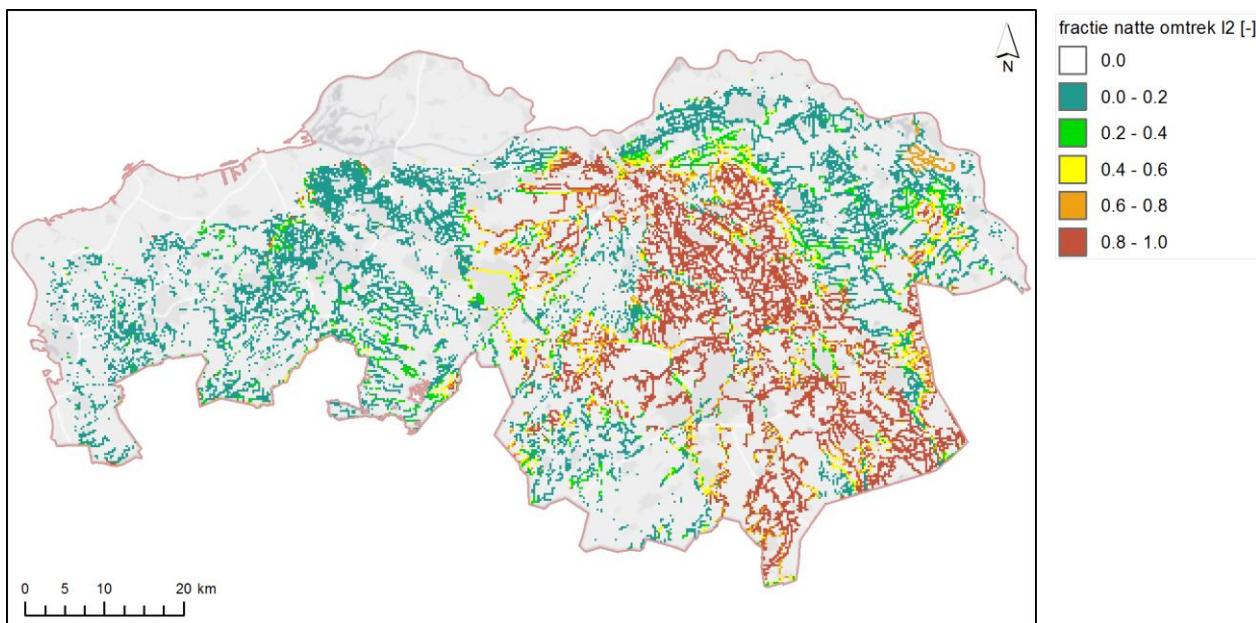
Figuur 6-13: Insnijding wateropenen



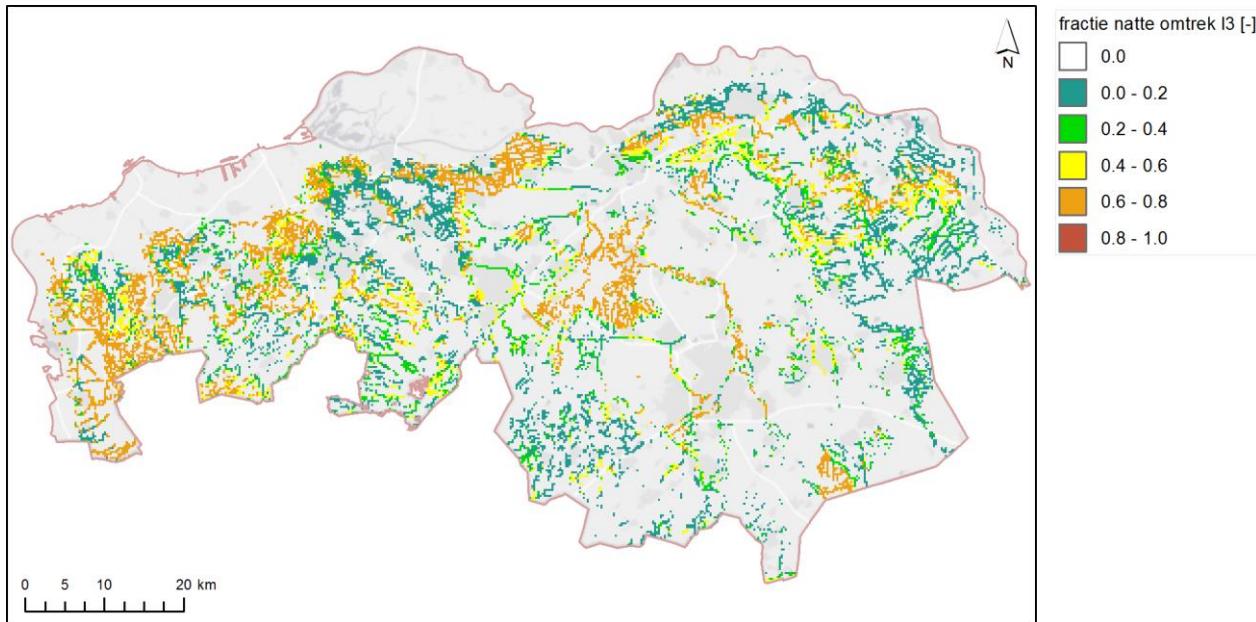
Figuur 6-14: Formules insnijdingsconcept (RW = natte omtrek, RB = bodenniveau, KD = watervoerendheid)



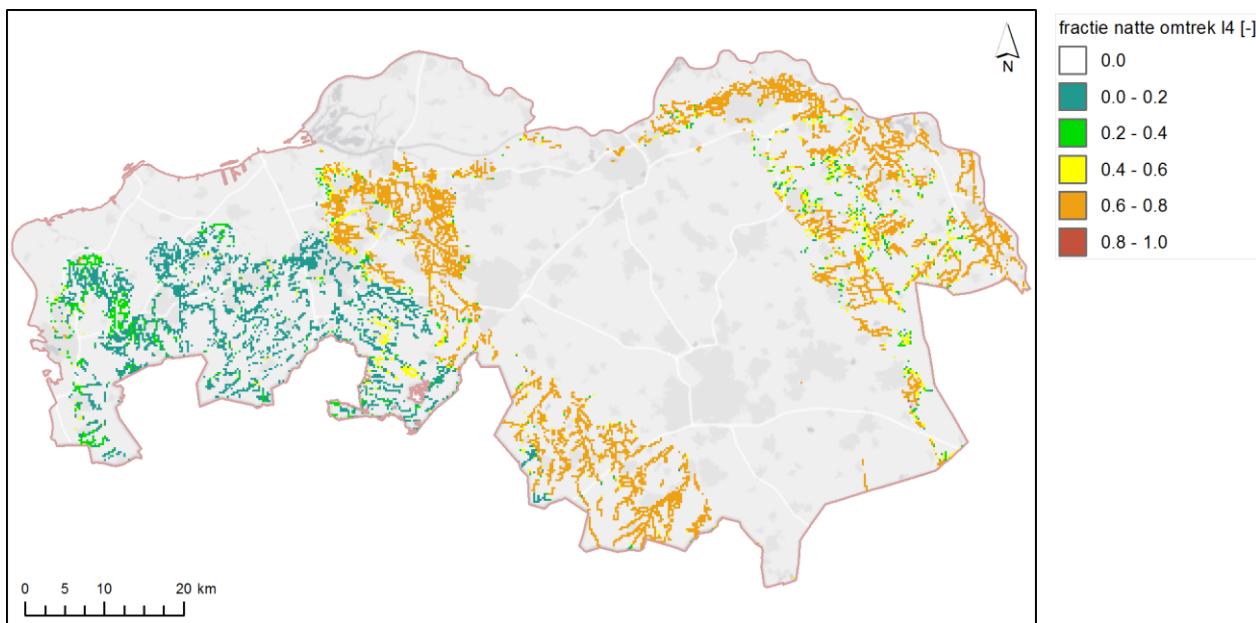
Figuur 6-15: Natte omtrek laag 1



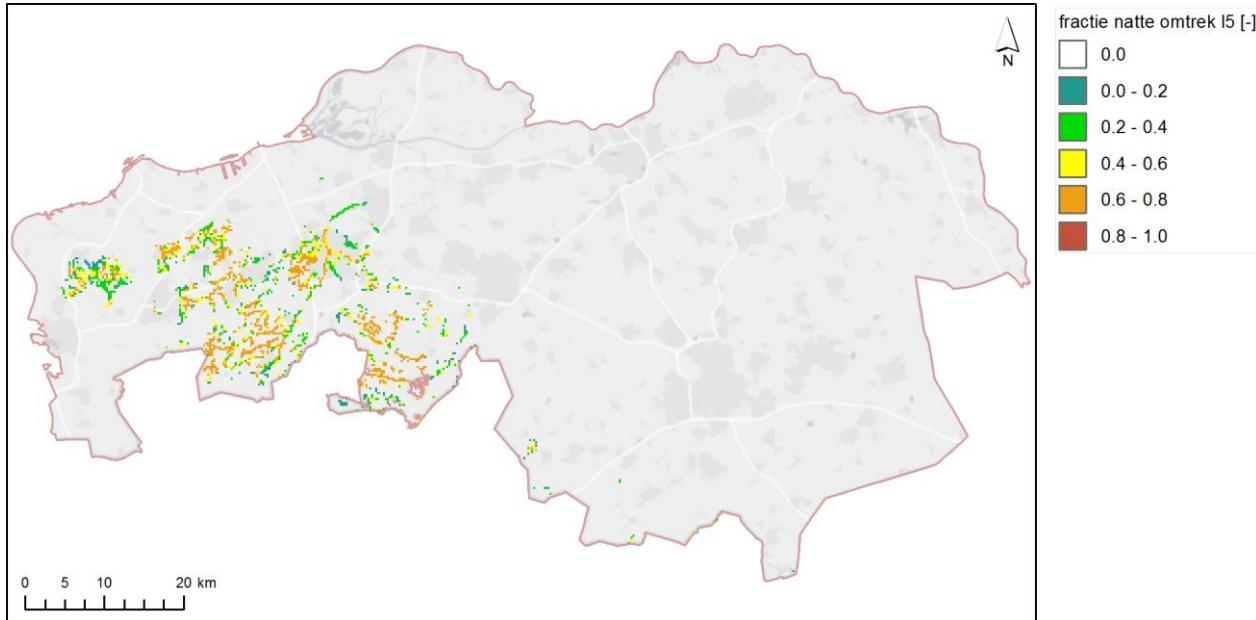
Figuur 6-16: natte omtrek laag 2



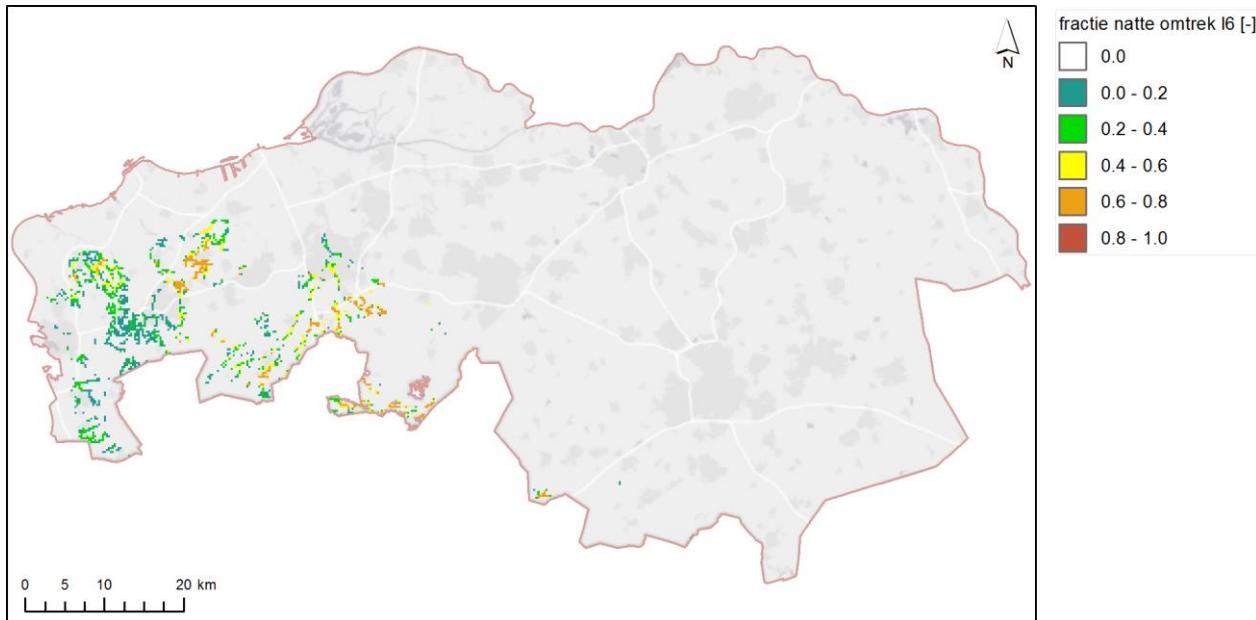
Figuur 6-17: Natte omtrek laag 3



Figuur 6-18: Natte omtrek laag 4



Figuur 6-19: Natte omtrek laag 5



Figuur 6-20: natte omtrek laag 6

6.5 Weerstanden waterlopen



Drainage en infiltratieweerstand

De interactie van de waterlopen met het grondwatersysteem wordt bepaald door de drainage- en infiltratieweerstand. Bij brede, langzaam stromende wateren wordt een hoge drainageweerstand verwacht, omdat de bodem dichtslibt door het bezinken van organisch materiaal en slib. Bij snelstromende wateren wordt een lagere drainageweerstand verwacht.



Bepaling weerstanden

Net als in de vorige versie van het Brabantmodel (2014) zijn de drainageweerstand en de infiltratieweerstand gerelateerd aan de natte omtrek van de waterloop. De natte omtrek is gebaseerd op Sobek-modellen van het watersysteem (zie uitleg insnijdingsconcept in paragraaf 6.4).

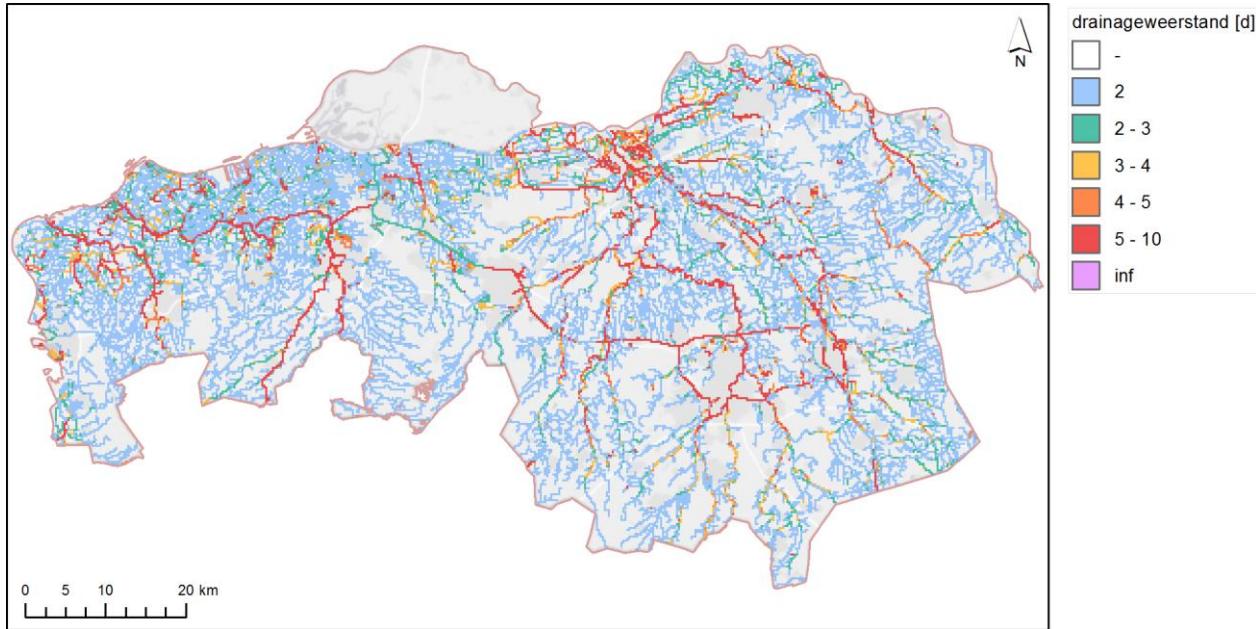
De drainageweerstand is als volgt gedefinieerd:

$$\text{Drainageweerstand} = \max(2, \min\left(\frac{\text{Natte omtrek}}{2}, 10\right))$$

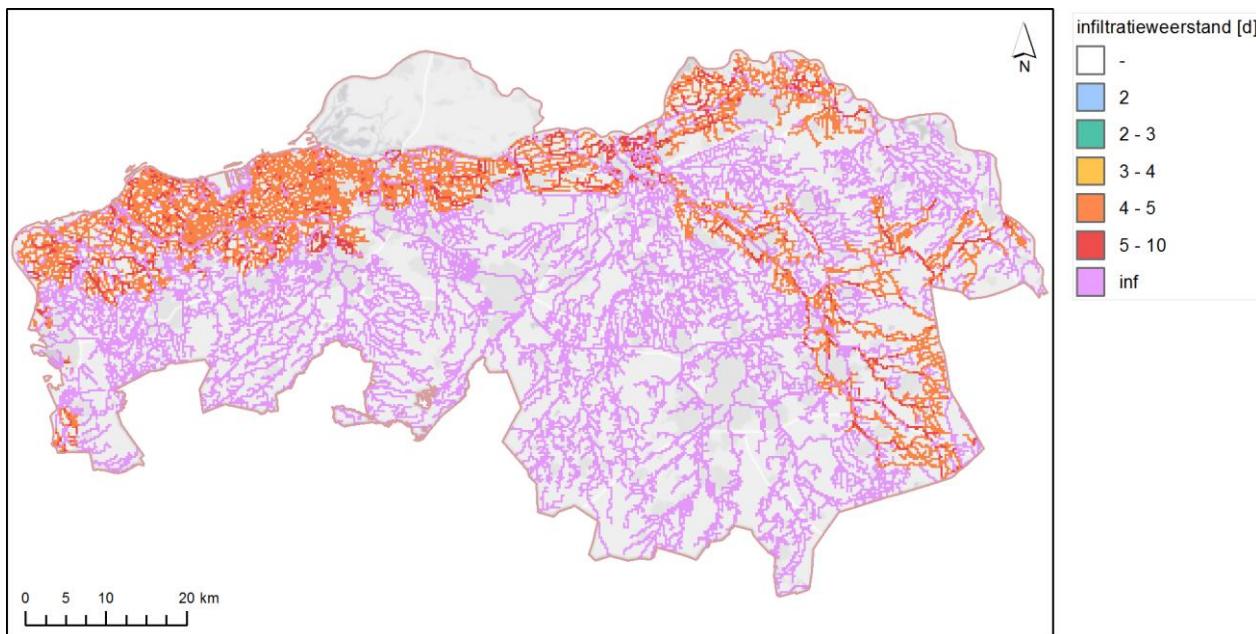
De drainageweerstand kan in deze formule nooit lager zijn dan 2 dagen of groter dan 10 dagen. Afhankelijk van de grootte van de natte omtrek treedt mogelijk één van deze twee limieten in werking. Bij een kleine tot middelgrote waterloop, kleiner dan 2 meter natte omtrek, wordt op deze wijze een relatief grotere invloed van de drainageweerstand opgenomen. Hierbij kan gedacht worden aan meer weerstand als gevolg van minder onderhoud bij kleine watergangen of de relatief grotere impact van radiale toestroming. Bij grote watergangen, breder dan 20 meter, wordt de drainageweerstand begrensd. Hier speelt kan radiale toestroming relatief makkelijker plaats vinden.

De infiltratieweerstand heeft een standaard hoge waarde, zodat infiltratie niet mogelijk is (miljard dagen weerstand). Uitzondering zijn de waterlopen in het gebied van Aa en Maas waar wateraanvoer mogelijk is en de waterlopen in de poldergebieden in West-Brabant. Daar waar de waterlopen kunnen infiltreren is een infiltratieweerstand aangehouden die twee keer zo groot is als de drainageweerstand.

De berekende drainage- en infiltratieweerstanden zijn weergegeven in Figuur 6-21 en Figuur 6-22.



Figuur 6-21: Drainageweerstand waterlopen



Figuur 6-22: Infiltratieweerstand waterlopen



Bepaling van conductance en drainageweerstand

De maaiveldhoogte is opgeschaald naar een 250 meter raster bestand voor het model, door de AHN hoogtewaarden binnen de gridcel te middelen. Vervolgens is de drainageweerstand voor de secundaire en tertiaire waterlopen bepaald:

1. Per modelcel is de totale lengte secundaire en tertiaire watergang bepaald
2. Dit is omgerekend naar een weerstand per modelcel onder de aanname dat de gemiddelde bodemweerstand 2 dagen is bij een breedte van 1 meter. Hierbij wordt eerst de totale conductance per modelcel bepaald en vervolgens omgerekend naar de totale drainageweerstand:

$$\text{conductance (cel)} = \frac{\text{som lengte (cel)} * \text{gemiddelde breedte}}{\text{bodemweerstand}} = \frac{\text{som lengte} * 1}{2}$$

$$\text{drainageweerstand(cel)} = \frac{\text{celgrootte}}{\text{conductance(cel)}} = \frac{250 * 250}{\text{conductance(cel)}}$$

6.6 Maaiveld (hoogte)



Methodiek

De ligging van het maaiveld is van invloed op diverse modelparameters, zoals de schematisatie van de ondergrond, de dikte van de onverzadigde zone maar vooral de schematisatie van de interactie met het oppervlaktewatersysteem. Dat is de reden dat de maaiveldligging in dit hoofdstuk wordt besproken. Tabel 6-4 geeft een overzicht hoe het maaiveld de grootte van diverse modelparameters bepaalt.

Tabel 6-4: Afhankelijkheden maaiveld

Modelparameter	Bron maaiveld	Toelichting
Top lagenmodel	REGISII v2.2, HCOV, H3O 100 x 100 m	Vanwege de lagere resolutie van het model (250 x 250 m) is het niet nodig om het maaiveld volgens REGISII v2.2 te vervangen door het AHN.
Dikte onverzadigde zone	AHN2/DHMV II/H3O 250 x 250 m	Maaiveld minus grondwaterstand bepaalt de bergingscapaciteit van de onverzadigde zone.
Niveau tertiaire watersysteem (RP10)	+ AHN filter 250 x 250 m	De bodemhoogte van het tertiaire watersysteem is gebaseerd op een afgeleide van het AHN, opgeschaald naar de modelresolutie door te middelen (zie paragraaf 6.3.3).
Niveau buisdrainage (RP11)	AHN2/DHMV II/H3O 250 x 250 m	Maaiveld minus buisdraindiepte volgens de buisdrainagekaart bepaalt het buisdrainageniveau.
Maaiveldontwatering (RP12)	AHN2/DHMV II/H3O 250 x 250 m	Basis voor het drainageniveau voor maaiveldontwatering. Hierop wordt een depressiefilter toegepast, zodat het drainageniveau coherent is met oppervlaktewaterpeilen en buisdrainageniveau.



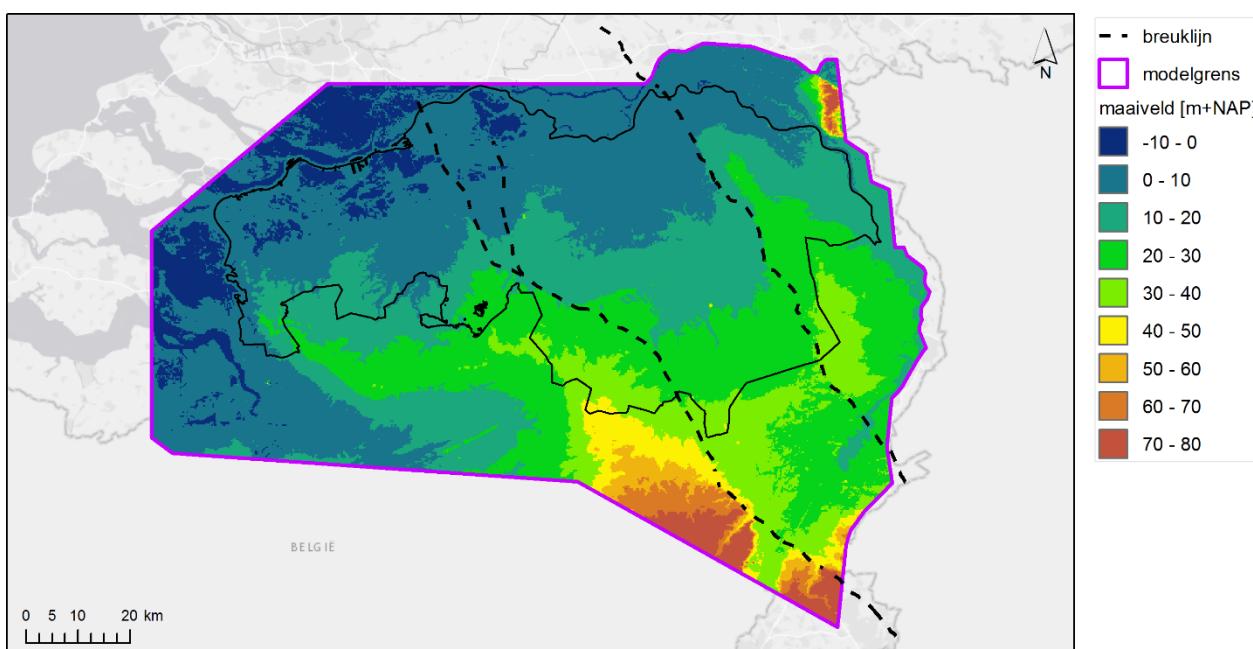
Beschikbare databronnen

De maaiveldhoogte wordt ontleend aan het AHN2 bestand dat een resolutie heeft van 5 bij 5 meter (AHN, 2013). Voor Vlaanderen is een recent maaiveldbestand gebruikt¹¹. De referentiehoogte in België is het TAW (Tweede Algemene Waterpassing). Een TAW-hoogte van 0 meter is gelijk aan het gemiddeld zeeniveau bij eb te Oostende en ligt 2.33 meter lager dan het NAP-referentiepunt. Voor het Duitse deel is informatie uit H3O (Deckers et al., 2014) gebruikt.



Afgeleid maaiveldniveau

Voor het Brabantmodel zijn alle TAW hoogtes omgezet naar NAP hoogtes. Het resultaat is weergegeven in Figuur 6-23.



Figuur 6-23: Maaiveldhoogte in Nederland en Vlaanderen (in m+NAP)

Het hoogste punt van Noord-Brabant ligt in de gemeente Luyksgestel in de omgeving van Stevensbergen en bedraagt circa 43 m +NAP. Het laagste punt van de provincie bevindt zich in het noordwestelijk poldergebied langs De Ligne tussen Steenbergen en Het Oudlandsch Laag en ligt op ca 3 m -NAP. Opvallend is de reliëfsprong op de overgang van het zandgebied naar het poldergebied ("de naad van Brabant"). Bij de Brabantse Wal bij Ossendrecht bedraagt deze sprong zelfs 20 meter. Deze hoogteverschillen hebben grote invloed op de stroming van het grondwater. Voor gebruik in het model is het maaiveldbestand opgeschaald naar 250 bij 250 m door te middelen over de modelcellen.

¹¹ Digitaal Hoogtemodel DHMV II 25 m, <https://overheid.vlaanderen.be/informatie-vlaanderen/producten-diensten/digitaal-hoogtemodel-dhmv>

7 Kalibratie

7.1 Methode en werkwijze op hoofdlijnen



Aanpak

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 parameters van het model te variëren. Voor de ijking zijn de volgende parametergroepen geselecteerd:

- Bodemparameters (kD en C).
- Breukweerstanden.

Er is gebruik gemaakt van de Monte Carlo analyse (paragraaf 7.2) waarbij de geselecteerde meetdata (paragraaf 7.3) wordt vergeleken met de berekeningsresultaten voor de gekozen kalibratieperiode 2009 – 2016 (paragraaf 7.4). Er is gewerkt van beneden (diep systeem in paragraaf 7.5) naar boven (ondiep systeem in paragraaf 7.6). Lokale aandachtspunten worden toegelicht in paragraaf 7.7. De gevoeligheid voor veranderingen in grondwaterniveau (paragraaf 7.8) en drainageweerstand (paragraaf 7.9) zijn beoordeeld. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met het resultaat van de stationaire ijking (paragraaf 7.10).



7.2 Monte Carlo analyse

Het model is stationair gejikt met de Monte Carlo methode. De Monte Carlo analyse wordt in twee stappen uitgevoerd:

1. Met een **gevoelighedsanalyse** 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 het interval wordt bepaald door de modelleur, parameters moeten namelijk binnen realistische grenzen liggen. Met de gevoelighedsanalyse 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).

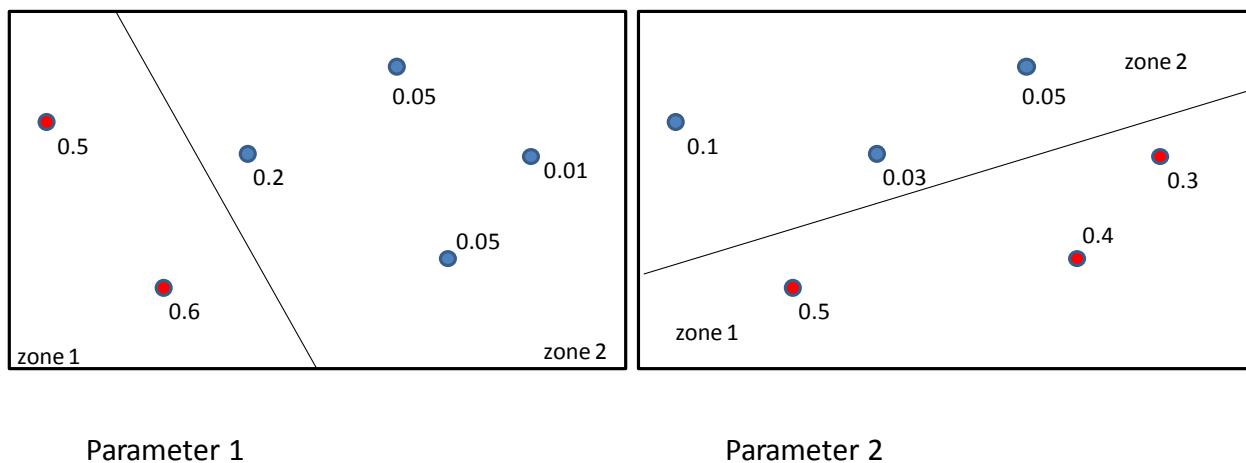
Het proces van gevoelighedsanalyse en Monte Carlo analyse is een aantal keer doorlopen. De eerste analyse is op hoofdlijnen om te kijken hoe het model presteert zonder ijking. Vervolgens zijn verschillende parameters gevarieerd en is gewerkt met zones waarbinnen de parameters veranderd kunnen worden.

De Monte Carlo analyse is een 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.

Gevoeligheidsanalyse

Voorafgaand aan de Monte Carlo berekeningen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij elke parameter afzonderlijk is gevarieerd. Deze analyse geeft inzicht over 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 7-1. In het voorbeeld heeft de eerste parameter veel effect op de grondwaterwaterstand in het westelijk deel van het modelgebied. Voor de tweede parameter is dit juist het zuidelijk 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 het interval waarin de parameter kan worden gevarieerd in de Monte-Carlo analyse verkleind. Wanneer dit niet gedaan zou worden, zou het interval veel groter blijven. Het gevonden interval wordt later in dit rapport toegelicht in paragraaf 7.10, waarbij de minimum- en maximumwaarden het interval weergeven waarbinnen gevarieerd is.



Figuur 7-1: Illustratie van gevoeligheidsanalyse en weging van de meetpunten. De rode meetpunten geven meer effect in berekende grondwaterstand voor een bepaalde parameter en worden zwaarder meegevoegd in de Monte Carlo Analyse. De analyse wordt per parameter uitgevoerd.

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 is te brengen. De resultaten van de afgeleide ijkfactoren van de verschillende Monte-Carlo modelruns zijn vastgelegd op de modelserver.

Ijk criterium

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.

7.3 Gebruikte meetdata grondwaterstanden en stijghoogten

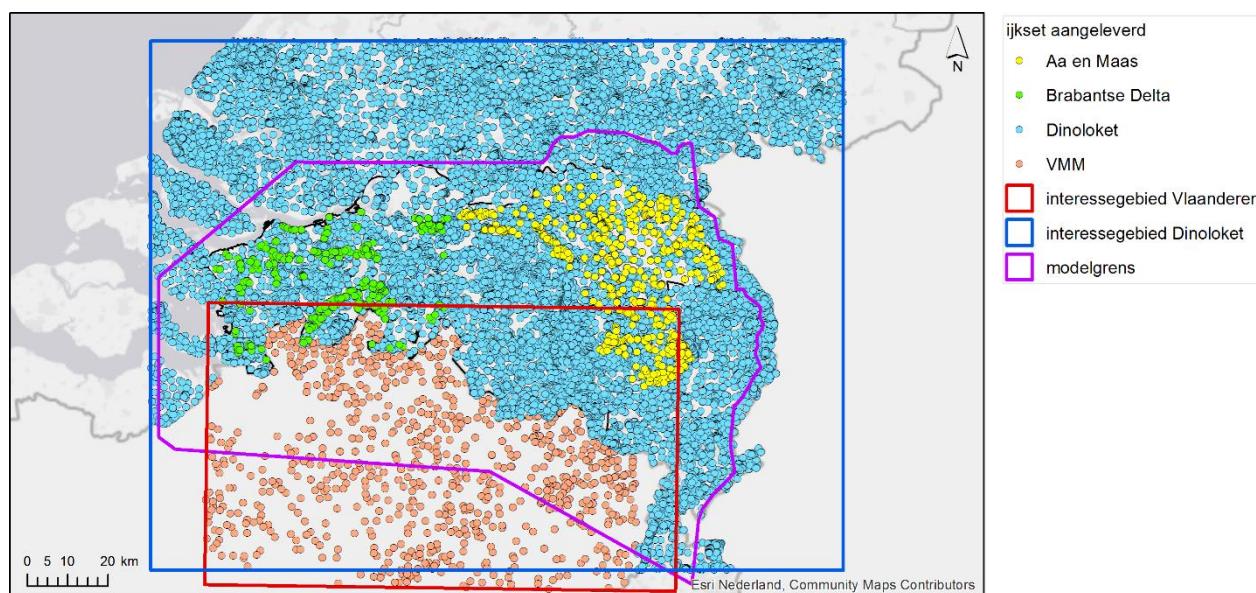


Databronnen

Voor de ijking van het grondwatermodel is een set met meetgegevens samengesteld. Er is gebruik gemaakt van zo veel mogelijk meetgegevens, zonder vooraf te selecteren.

Alle meetpunten binnen het Nederlandse deel van het modelgebied zijn opgevraagd bij TNO binnen de volgende RD New/EPSG 28992 coördinaten (Figuur 7-2):

- X: 58.000 – 230.000.
- Y: 326.000 – 457.250.



Figuur 7-2: Interessegebieden en aangeleverde meetpunten ijkset

Waterschap Aa en Maas en Brabantse Delta hebben extra meetpunten en bijbehorende metingen aangeleverd. De metingen van waterschap Brabantse Delta stonden in een afwijkend formaat (uit het programma WISKI). Hiervoor is een conversieprogramma (python script) gemaakt dat de data wegschrijft in een gestandaardiseerde csv file. Het programma is opgeleverd in de ijksetmodule. Voor waterschap De Dommel waren geen extra metingen nodig omdat bijna alle metingen in DINOLoket verwerkt zijn.

Gegevens over Vlaanderen zijn direct opgevraagd bij de Vlaamse Milieu Maatschappij (VMM). Opvragen via de website DOV verkenner geeft maar een beperkte set aan gegevens. Alle meetgegevens uit de deelmeetnetten "1 Primair" en "8 Freatisch" zijn opgevraagd binnen de volgende rechthoek binnen de Lambert72/EPSG 31370 coördinaten (Figuur 7-2):

- X: 138.000 – 255.000.
- Y: 245.000 – 175.000.

In totaal zijn 32.728 meetreeksen aangeleverd met metingen na 1970. Meetreeksen voor 1970 zijn niet verwerkt. Het aantal aangeleverde peilbuisfilters en meetpunten per bron is gegeven in Tabel 7-1.

Tabel 7-1: Aantal aangeleverde peilbuisfilters en meetpunten per bron.

Bron	Aantal peilbuisfilters [-]	Aantal meetpunten [-]
Aa en Maas	950	857
Brabantse Delta	416	384
Dinoloket	32.728	22.295
VMM	1.862	848
Totaal	35.956	24.384

In het Vlaamse bestand staan geen filternummers maar wel filterdieptes en een aquifer code (gelinkt aan HCOV codes). Via een koppeltabel kunnen de filters zo aan de juiste modellaag toegekend worden. De meetgegevens zijn vermeld in meter ten opzichte van TAW (zie paragraaf 6.6).

Deze dataset geeft een goede dekking in Noord-Brabant en omliggende Nederlandse provincies.



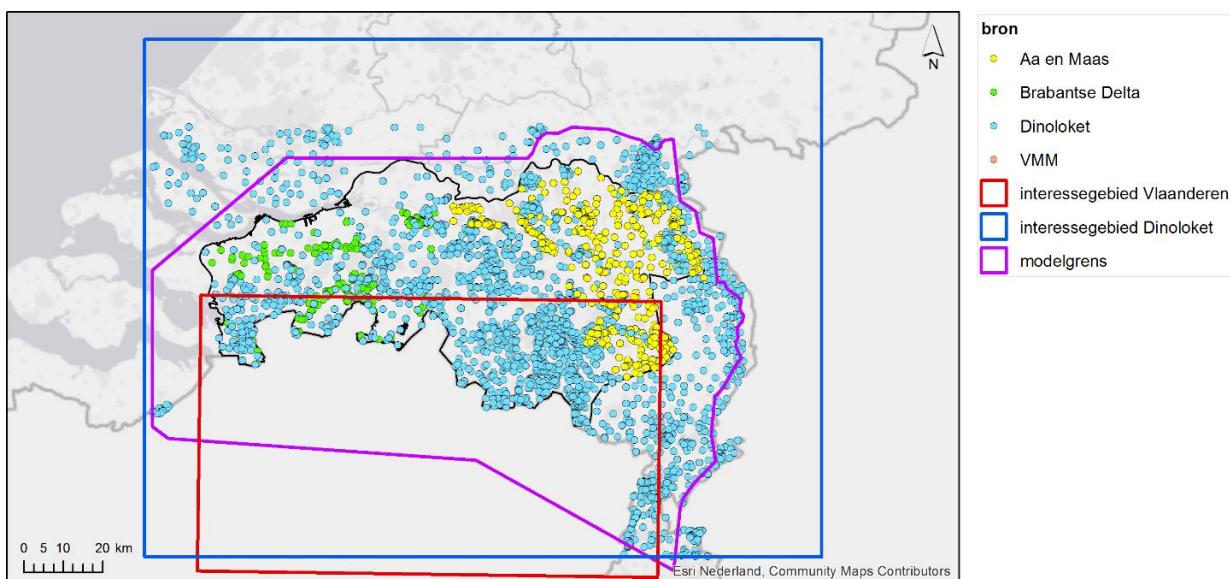
Selectie van data

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 5605 peilbuisfilters met meetreeksen, circa 15% van de aangeleverde dataset (Tabel 7-2). De meetfrequentie van de Vlaamse peilbuizen is beperkt. Daarom zijn deze niet opgenomen in de uiteindelijke ijkdataset (Figuur 7-3). Dit betekent dat het model niet geïjskt is voor Vlaanderen.

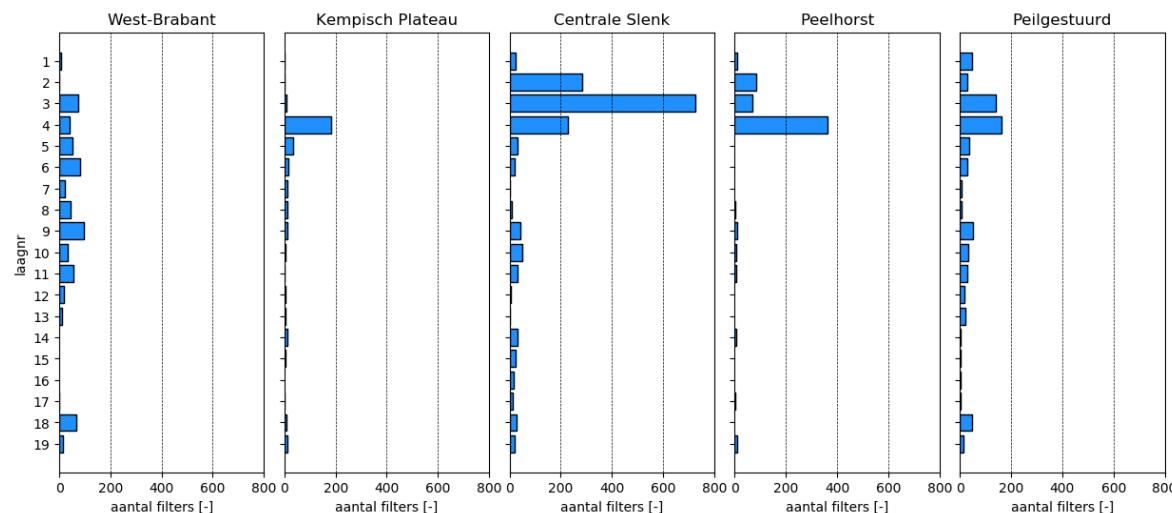


Figuur 7-3: interessegebieden en selectie meetpunten ijkset

In Tabel 7-2 wordt samengevat hoeveel filters er overblijven per databron. Het aantal beschikbare filters verschilt per deelgebied en per diepte (Figuur 7-4). Hier is rekening mee gehouden in de beoordeling van de kalibratieresultaten bij de weging van de metingen.

Tabel 7-2: Aantal peilbuisfilters en meetpunten per bron, ijkset

Databron	Aantal peilbuisfilters [-]	Aantal meetpunten [-]
Aa en Maas	734	665
Brabantse Delta	267	251
Dinoloket	4604	2924
VMM	0	0
Totaal	5605	3840



Figuur 7-4: Aantal beschikbare filters per deelgebied en per modellaag

Statistieken

 Van de meetreeksen in de ijkdataset zijn de volgende statistieken berekend:

- Minimum, maximum en aantal metingen.
- Mediaan van alle metingen binnen de ijkperiode. Er is voor mediaan gekozen om het effect van uitschieters en eventuele meetfouten te elimineren. De mediaan wordt per jaar berekend. Vervolgens wordt het gemiddelde genomen over de mediaan per jaar. Zo telt ieder jaar even zwaar mee, ongeacht veranderingen in de meetfrequentie.
- GHG, GLG en GVG volgens de kwantielbenadering (toelichting volgt hieronder).
- GHG, GLG en GVG volgens de klassieke methode (toelichting volgt hieronder).
- Dynamiek (GHG – GLG) volgens de kwantielbenadering.

Weging van metingen

Vooraf zijn sommige metingen per filter ingedeeld in verschillende klassen van betrouwbaarheid.

We hebben hiervoor gebruik gemaakt van een analyse die eerder door Artesia (2017) in opdracht van Brabant Water is uitgevoerd. Voor 1725 meetpunten in Noord-Brabant zijn tijdreeksmodellen gemaakt met als verklarende variabelen: neerslag, verdamping en ontrekkingen. Er is beoordeeld of de gemeten reeksen hiermee goed verklaard kunnen worden. Dit was het geval voor 442



meetpunten (26 %). Voor 675 meetpunten (39 %) was de uitkomst twijfelachtig en voor 608 meetpunten kon de reeks niet goed verklaard worden (35%).

Vanaf stap 1 van de ijking (zie paragraaf 7.5) is een weging toegepast aan de punten in de ijkdataset:

1. Een factor bepaald uit de analyse van Artesia (2017). Tijdreeksen die beter verklaard kunnen worden door neerslag en verdamping krijgen meer gewicht in de ijking (factor 4). Meetreeksen die twijfelachtig zijn en niet zijn beoordeeld door Artesia krijgen de factor 2. De meetreeksen die niet goed verklaard kunnen worden, hebben de factor 1 gekregen.
2. Een factor op basis van de horizontale en verticale meetdichtheid. Meetpunten met een hogere meetdichtheid krijgen een lagere weegfactor. Dit betekent dat clusters van meetpunten minder zwaar meewegen dan punten waar weinig meetpunten omheen liggen. Hetzelfde principe geldt voor de verticale dichtheid. Meetpunten in lagen met weinig meetpunten wegen zwaarder. In de diepere lagen zijn minder meetpunten beschikbaar dan in de ondiepe lagen. Met deze wegingsmethode is het mogelijk om de ijking van de diepere lagen meer gewicht te geven.
3. Een factor op basis van de volledigheid van de meetreeks. Meetreeksen met een beperkt aantal metingen binnen de ijkperiode krijgen minder gewicht in de ijking.

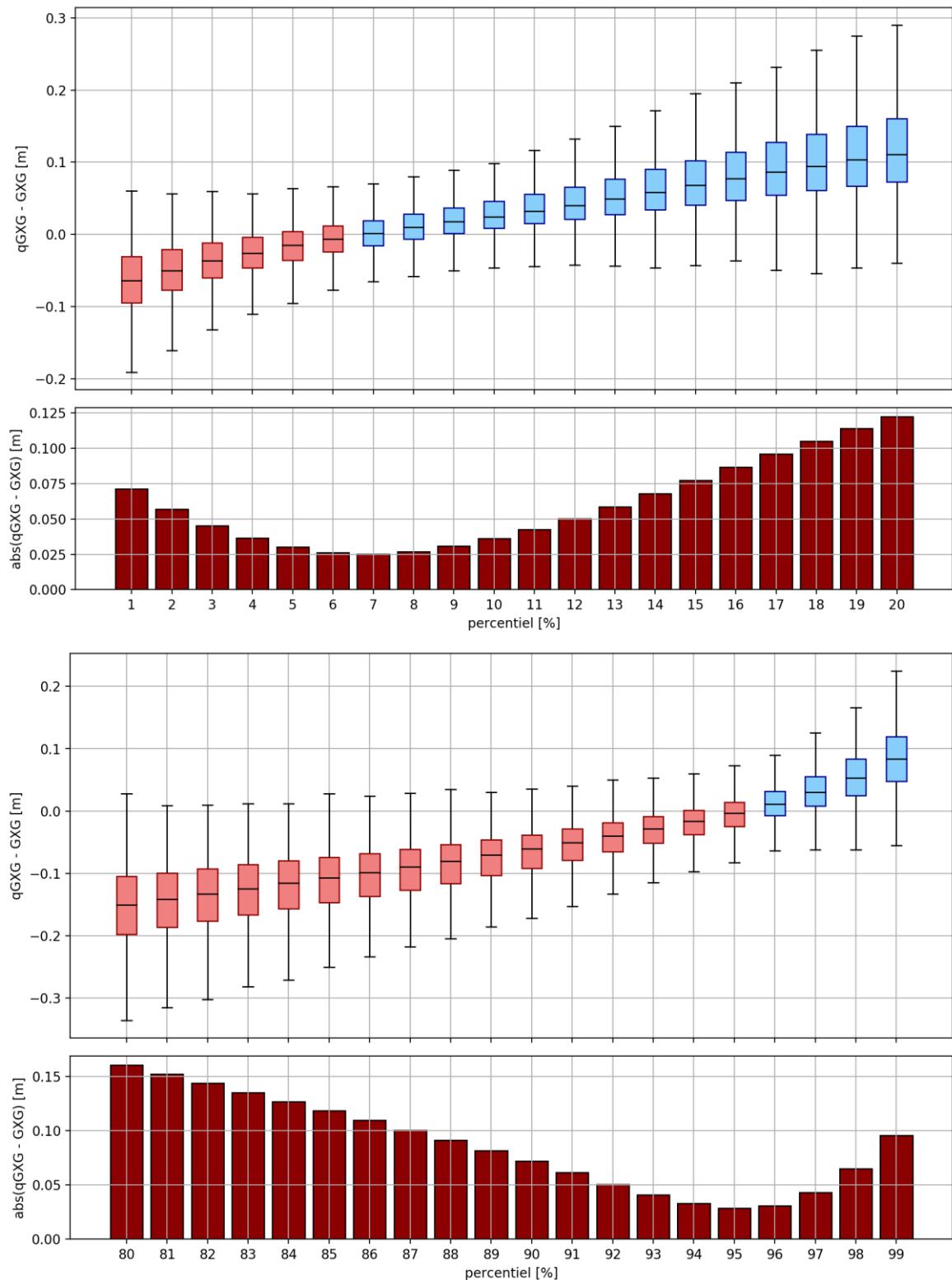
Ook reeksen die als minder betrouwbaar zijn geclasseerd kunnen voor de kalibratie belangrijke informatie bevatten. Daarom worden deze metingen toch betrokken. Bijvoorbeeld omdat metingen in de buurt van een winning informatie geven over de diepte van de pompkegel.



Bepaling van de GHG en GLG; kwantielmethode

De Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) wordt op de klassieke manier bepaald door de jaarlijks 3 hoogste grondwaterstanden te middelen over de periode van 1 april tot en met 31 maart (hydrologisch jaar) en vervolgens de jaarwaarden te middelen over een periode van tenminste 8 jaar. De analyse was gebaseerd op handmetingen met twee metingen per maand, op de 14^e en 28^e dag van de maand. De Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) werd op soortgelijke wijze bepaald voor de 3 laagste grondwaterstanden per hydrologisch jaar.

Met de komst van drukopnemers worden grondwaterstanden veel frequenter gemeten. Dit maakt het mogelijk om de GHG en GLG te bepalen met meer metingen. Er wordt dan gebruik gemaakt van de frequentie van overschrijding. De vraag is wat het juiste percentage van overschrijding is. De GHG op de klassieke wijze is gebaseerd op de drie hoogste waarnemingen uit een set van 24 waarnemingen; ofwel de 12,5% in de tijd hoogste waarnemingen. Als deze waarnemingen gemiddeld worden zal de GHG ongeveer in de buurt van de helft van deze waarde liggen dus 6% van de tijd. Er is gecontroleerd met de gehele set aan waarnemingen voor het Brabantmodel wat de afwijking is per peilbuis tussen de klassieke methode en een percentielwaarde met een interval van 1-20% voor de GLG en 80-99% voor de GHG. Hieruit blijkt dat de afwijking ten opzichte van de klassieke definitie het kleinste is bij een percentielwaarde van 7% voor de GLG en 95% voor de GHG (Figuur 7-5). Voor een andere dataset of andere periode kan de optimale waarde net wat anders liggen. Voor de validatie hebben we gekozen voor een symmetrische verdeling van de percentielwaarden met 6% voor de GLG en 94% voor de GHG.



Figuur 7-5: Absolute afwijking tussen bepaalde GHG (boven) en GLG (onder) op de klassieke manier en voor verschillende kwantielwaarden

7.4 Kalibratieperiode

Keuze voor periode

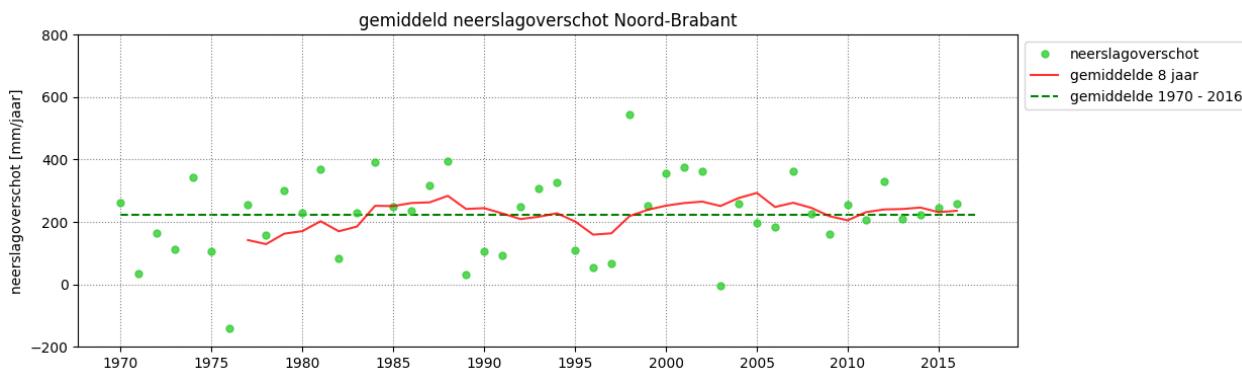


Een stationair grondwatermodel wordt bij voorkeur geijkt voor een periode waarin zo min mogelijk variatie is opgetreden (in neerslag, onttrekking, waterstanden). En het neerslagoverschot in de modelperiode moet gemiddeld ongeveer gelijk zijn aan het gemiddelde neerslagoverschot over een langere periode.



Selectie voor kalibratieperiode 2009 -2016

Voor de stationaire kalibratie is de periode 2009 - 2016 gekozen als representatief voor het langjarig gemiddelde. Deze periode geeft gemiddeld gezien een neerslagoverschot vergelijkbaar met het gemiddelde in de afgelopen 30 jaar (Figuur 7-6). 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. Het betreft gemiddelde waarden voor de provincie Noord-Brabant, binnen de jaren kunnen regionale verschillen voorkomen.



Figuur 7-6: Gemiddeld neerslagoverschot per jaar over alle KNMI stations in Noord-Brabant en het gemiddelde neerslagoverschot berekend over de voorgaande acht jaar van het betreffende jaar



Effect van veranderingen in winningen

De periode moet bij voorkeur een periode zijn waarbinnen geen grote veranderingen in onttrekking hebben plaatsgevonden. In de periode 2009-2016 hebben zich de volgende relevante veranderingen wat betreft onttrekking voorgedaan:

- De winningen Boxmeer en Vierlingsbeek zijn in 2012 gestopt.
- Het windebiet is significant toegenomen voor de winning Loosbroek, Helmond en Tilburg.
- Het windebiet is significant afgangen voor de winning Huijbergen.
- De winning Budel is verdiept.

Voor de zones rond deze winningen is het moeilijk om stationair te ijken, omdat er geen sprake is van een gemiddelde situatie. Bij de tijdsafhankelijke validatie is in meer detail naar deze gebieden gekeken, om te beoordelen of de langjarige veranderingen in stijghoogten in overeenstemming zijn met de gemeten veranderingen (zie paragraaf 8.7).

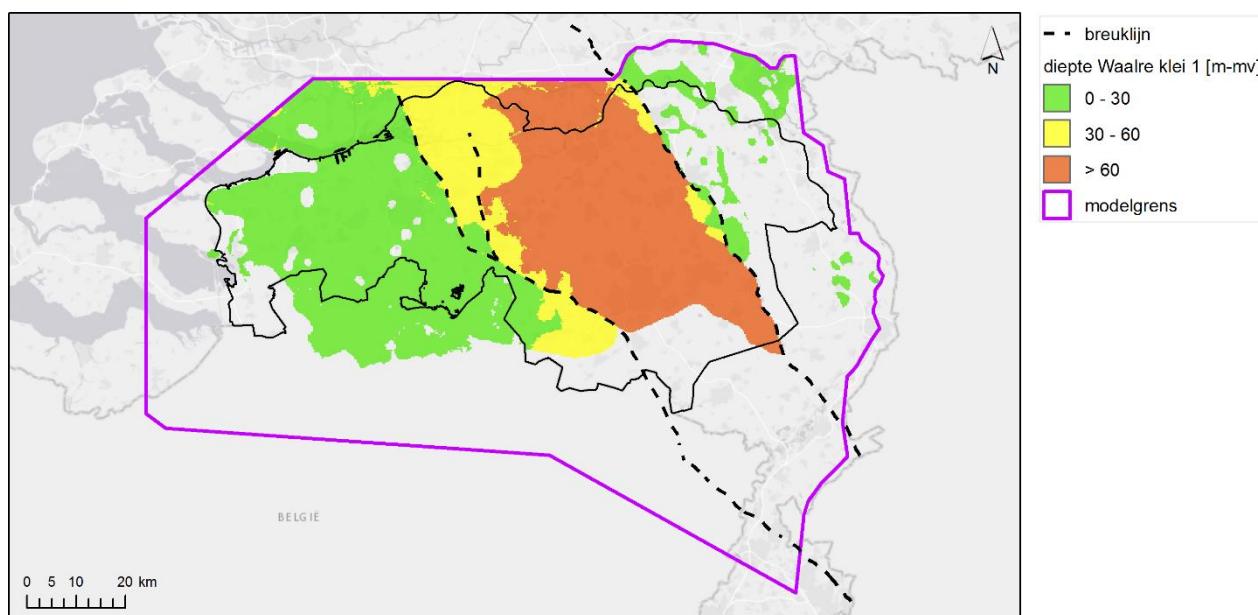
7.5 IJking diepe systeem (stap 1)

Aanpak

Als eerste stap is het diepe grondwatersysteem geijkt. Dit is een logische stap omdat de ijking van het diepe systeem een regionale invloed heeft. Daarna kunnen de ondiepe parameters geijkt worden.

Voor sommige modellagen zijn meerdere REGIS-lagen uit verschillende formaties samengenomen. Deze formaties hebben een verschillende herkomst en kunnen daarom zeer verschillende eigenschappen hebben. Bij het opstellen van eerdere versies van het Brabant model (Royal Haskoning 2012 en RHDHV 2014) bleek dat deze lagen het beste apart meegegenomen kunnen worden in de kalibratie. Door het apart meenemen van deze lagen ontstaat in de ijking een soort natuurlijke zonering doordat de verschillende afzettingen op verschillende plaatsen voorkomen. Dit maakt de parameters minder afhankelijk van elkaar.

De meest relevante modellagen zijn geijkt met een Monte Carlo analyse. De selectie van de meest relevante modellagen is gebaseerd op de gevoeligheidsanalyse (zie paragraaf 7.2). Het resultaat van de ijking is een ijkfactor voor de belangrijkste watervoerende en slecht doorlatende lagen. Dit zijn de weerstand van de Waalre klei en het doorlaatvermogen van de dikke watervoerende lagen, zoals de Formaties van Sterksel, Peize Waalre, Maassluis, Oosterhout en Breda. Het doel is om het systeem op hoofdlijnen goed te benaderen, zodat de stijghoogtepatronen globaal overeenkomen met metingen en kennis van het systeem.



Figuur 7-7: Zonering Waalre klei 1 in drie zones gebaseerd op de diepteligging van de Waalre klei 1



Ijkfactoren

De volgende ijkfactoren zijn gehanteerd:

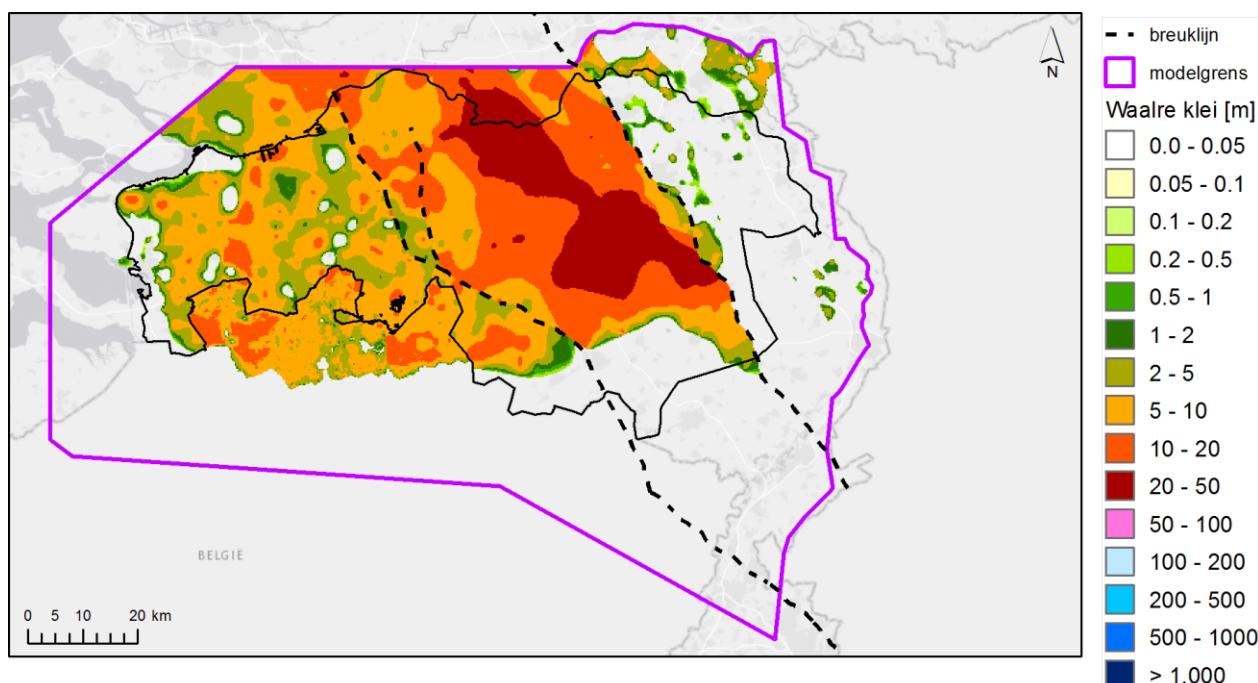
- Één factor voor de kD per REGIS formatie (b.v. Oosterhout, Breda). Als een modellaag meerdere REGIS formaties bevat, is de kD van deze laag samengesteld uit meerdere ijkfactoren. Elke REGIS laag heeft dus zijn eigen ijkfactor gekregen. Formaties die een beperkte verbreiding hebben, worden niet apart geijkt.
- Één factor voor de weerstand van de slecht doorlatende modellagen (C1 t/m C18).
- De Waalre klei 1 (C8) is in drie zones opgedeeld, op basis van de diepteligging van de Waalre klei 1 (Figuur 7-7). Daarom loopt de zonering niet precies gelijk met de grens van de Centrale Slenk. Uit de ijking blijkt dat de weerstandswaarden van de gele en groene gebieden ongeveer gelijk aan elkaar is (Figuur 7-7).

- De Bredazanden zijn opgedeeld in drie zones (West-Brabant, Centrale Slenk en Peelhorst). Dit is nader beschreven later in deze paragraaf.



Waalre klei 1

Waalre klei 1 komt in de provincie Noord-Brabant in een groot gebied voor. Waalre klei 1 ligt in de Centrale Slenk dieper dan in het gebied ten westen hiervan. De kleilaag is in de slenk ook dikker (zie Figuur 7-8). De verwachting is dat de weerstand van de kleilaag per meter klei verschilt als gevolg van de diepteligging. Namelijk hoe dieper de kleilaag ligt hoe compacter de laag zal zijn.



Figuur 7-8: Dikte van de Waalre klei 1 (scheidende laag 8)



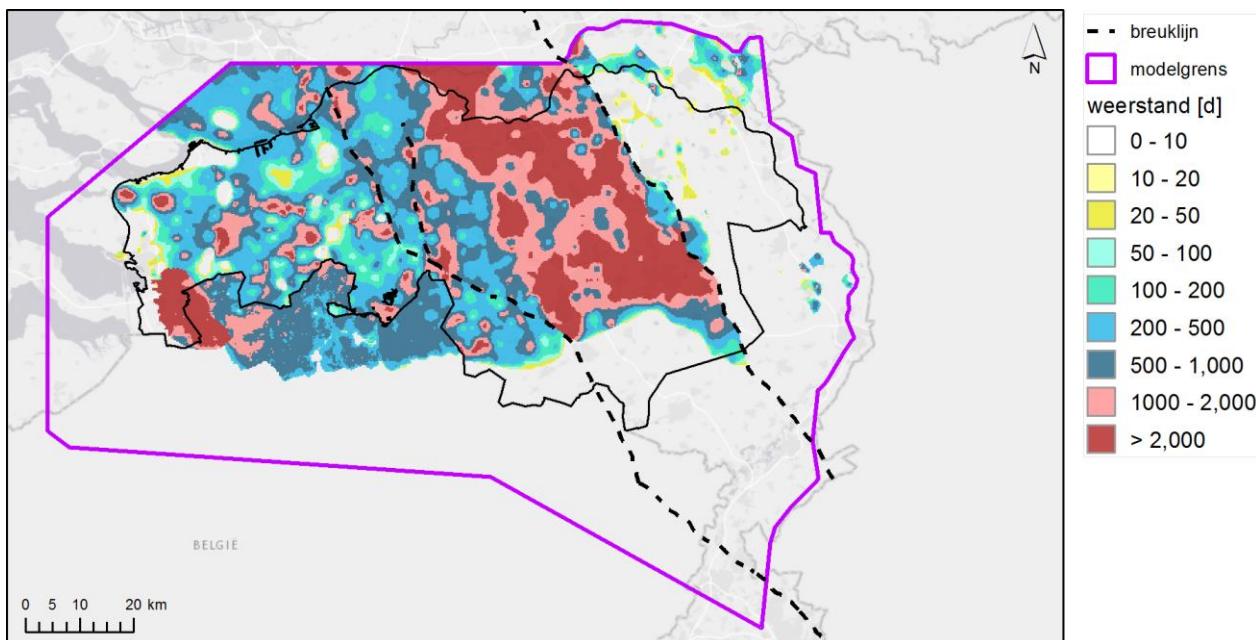
Ijking van de Waalre klei in drie zones

De ijking van de weerstand van Waalre klei 1 is gevarieerd voor de drie zones genoemd in Figuur 7-7. De diepteligging van Waalre klei 1 verschilt ook van noord naar zuid. In noordelijke richting, in het rivierengebied, komt Waalre klei 1 minder diep te liggen. Uit de ijking van het rivierengebied in het MORIA model (Royal HaskoningDHV, 2018) is gebleken dat de weerstand van Waalre klei 1 hier minder hoog is per meter klei. De bepaalde weerstanden van Waalre klei 1 in het Brabant model en MORIA sluiten goed op elkaar aan. De weerstand van Waalre klei 1 in het gele gebied in Figuur 7-7 bedraagt ongeveer 15.000 dagen in beide modellen.

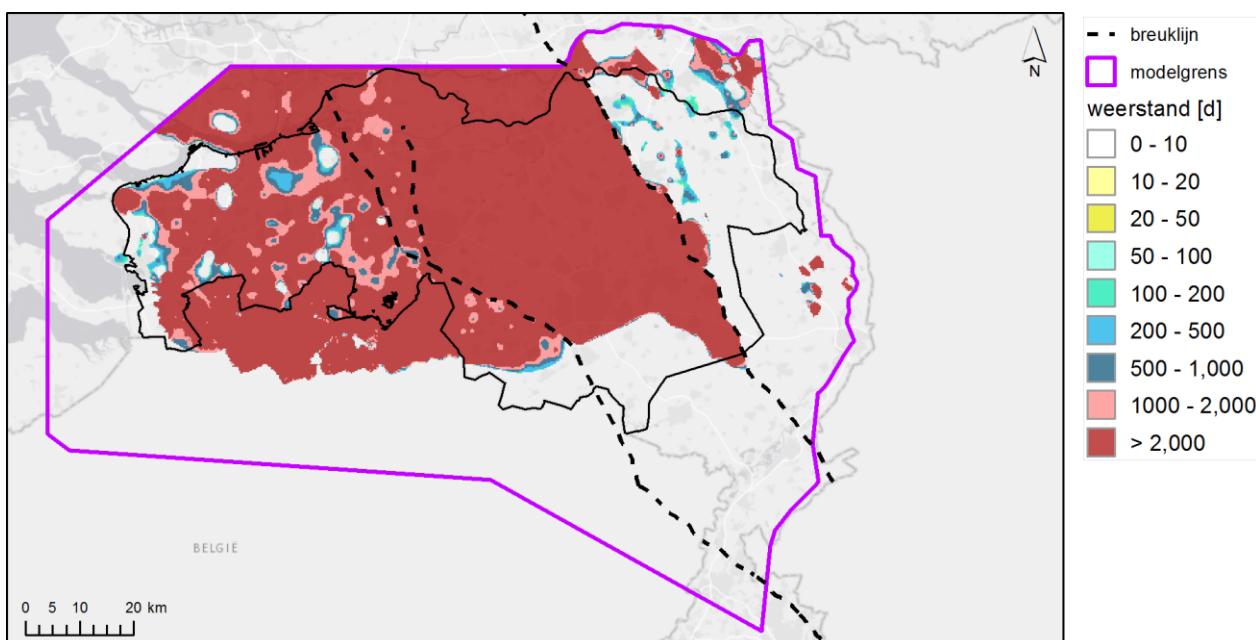
Er is overwogen om ook de weerstand te variëren met de diepteligging van de lagen, maar dit was niet nodig. De diepteligging van Waalre klei 1 binnen de Centrale Slenk varieert relatief weinig en komt pas in het rivierengebied aanzienlijk hoger te liggen. Het variëren met de drie zones is daarom voldoende.

De weerstand van Waalre klei 1 is in de drie zones met verschillende Monte Carlo stappen bepaald en bijgesteld. Uitgangspunt zijn de weerstandswaarden in REGISII v2.2. Deze weerstandswaarden zijn hoger dan in de REGISII.1.

De bepaalde optimale weerstand is veel hoger dan de uitgangswaarde in REGISII v2.2, zie Figuur 7-9 en Figuur 7-10. Dit is ook bediscussieerd met TNO, de opstellers van REGIS. Door de geologen van TNO werd verwacht dat op basis van de kenmerken van Waalre klei 1 de weerstand lager is. De weerstand van Waalre klei 1 wordt als voorbeeldproject gebruikt voor de retourstroom naar REGIS. In dit project wordt regionale opgedane kennis in modelstudies weer gedeeld.



Figuur 7-9: Weerstand Waalre klei 1 volgens REGISII v2.2

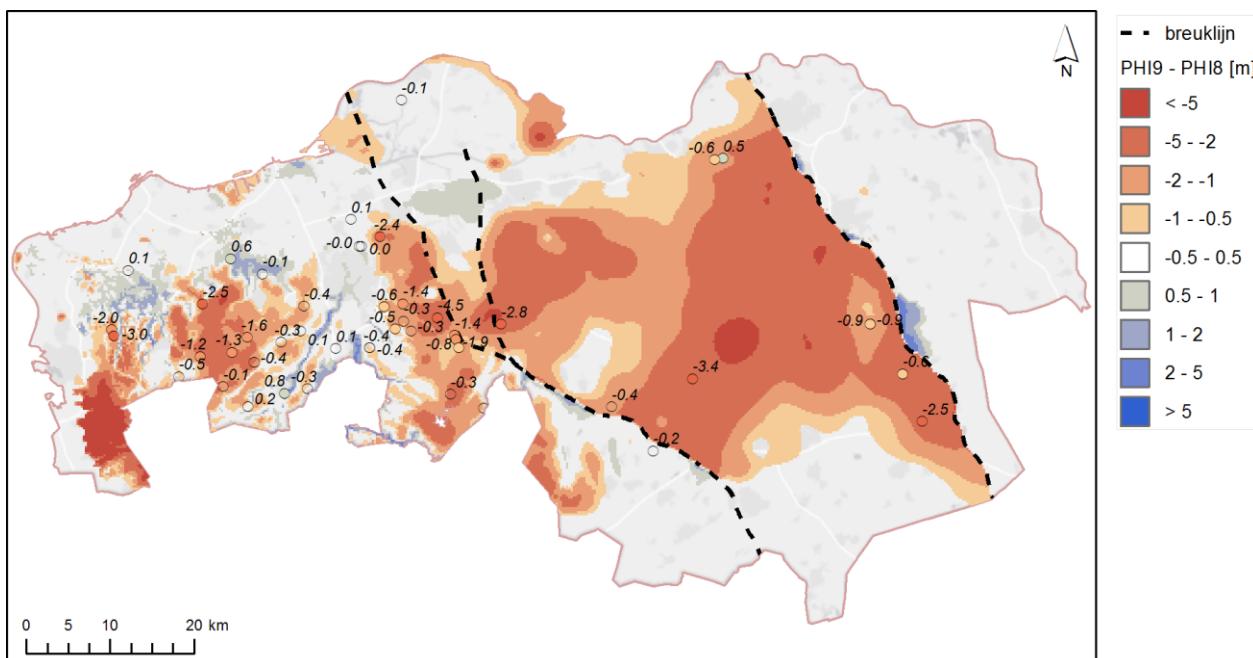


Figuur 7-10: Weerstand Waalre klei 1 na toepassing ijkkfaktoren

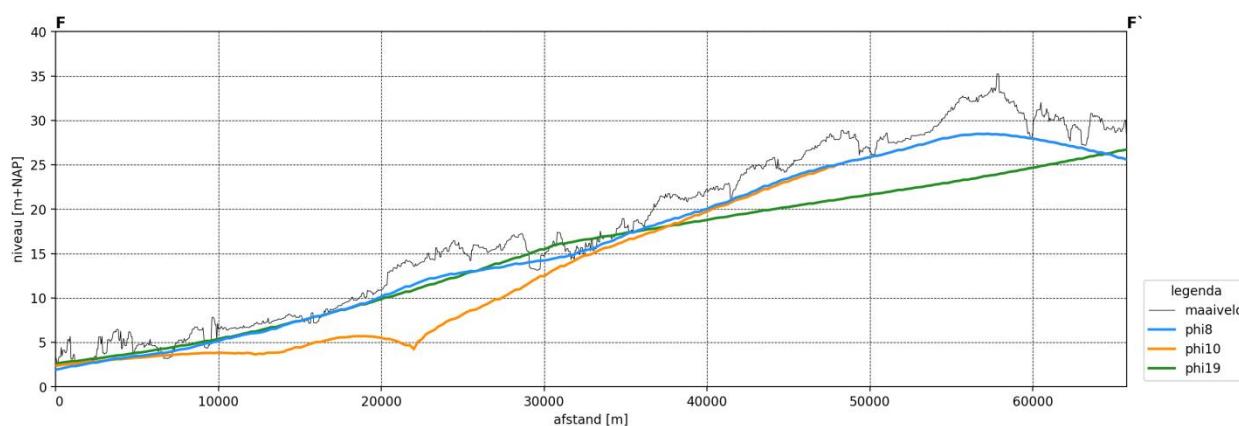


Berekeningsresultaat: stijghoogteverschil over de Waalre klei

In Figuur 7-11 is het gemeten en berekende stijghoogteverschil gepresenteerd over de Waalre klei; het verschil tussen phi8 en phi9. De stijghoogte onder Waalre klei 1 is sterk verlaagd met enkele meters ten gevolge van het onttrekken van grondwater. Er is sprake van een groot stijghoogteverschil over Waalre klei 1 (Figuur 7-11 en Figuur 7-12). Indien Waalre klei 1 een minder grote weerstand zou hebben dan in het model aangenomen, zou de berekende verlaging veel minder groot zijn. Wanneer de weerstandswaarden uit REGISII v2.2 overgenomen worden, wordt niet een voldoende verlaging in stijghoogte berekend, in vergelijking met de gemeten waarden. De enige logische verklaring is dat de weerstand van Waalre klei 1 hoger is dan vermeld in REGISII v2.2.



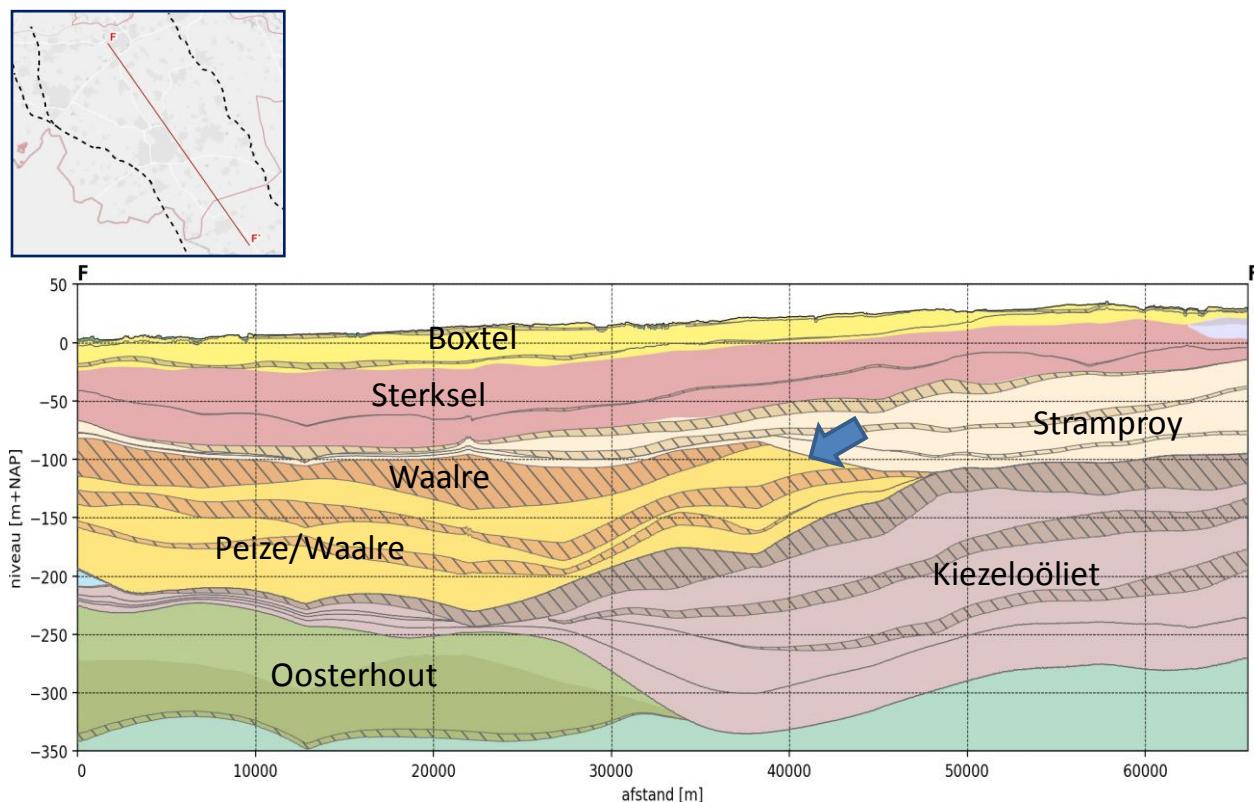
Figuur 7-11: Berekende en gemeten stijghoogteverschil over Waalre klei 1 (na ijking)



Figuur 7-12: Berekende stijghoogten in geohydrologisch dwarsprofiel F-F' door de Centrale Slenk

In het profiel (Figuur 7-13) is te zien dat er bovenstrooms (in het zuiden) een plek is waar Waalre klei 1 ontbreekt. Met verkennende berekeningen is beoordeeld wat het effect van kortsluiting is van deze lagen. Als deze kortsluiting er niet zou zijn, is de weerstand van Waalre klei 1 mogelijk kleiner. De kortsluiting bleek maar

een beperkt effect te hebben op de berekende diepe stijghoogten. Conclusie is dat de kortsluiting geen reden kan zijn om de weerstand van Waalre klei 1 aan te passen.



Figuur 7-13: Geohydrologisch dwarsprofiel F-F' door de Centrale Slenk (pijl geeft mogelijke kortsluiting weer). Gearceerd zijn scheidende lagen

Kiezeloöliet formatie

Waalre klei 1 gaat in zuidelijke richting over in de Kiezeloöliet formatie, met bovenin de Brunssum klei. Voor deze kleilaag komen in REGISII v2.2 standaard hoge c-waarden voor (50.000 tot meer dan 150.000 dagen). De weerstand van deze kleilaag hoeft daarom in de ijking veel minder aangepast te worden.



Breda zanden

De Breda zanden vormen het onderste watervoerende pakket in het grootste gedeelte van het model. De dikte varieert van circa 30 meter in West-Brabant tot maximaal circa 800 meter in de Slenk. De formatie bestaat voornamelijk uit fijnzandige afzettingen, waarin ook kleilagen worden aangetroffen. Vanwege de dikte van het pakket en de aanwezigheid van ongekarteerde slecht doorlatende lagen kan de verticale stromingsweerstand binnen het pakket niet verwaarloosd worden. Daarom wordt in het model een verticale anisotropiefactor toegepast. Hiermee wordt een weerstand berekend die opgeteld wordt aan de weerstand van de onderste slecht doorlatende laag in het model (C18). Anisotropie is niet in andere modellagen toegepast.

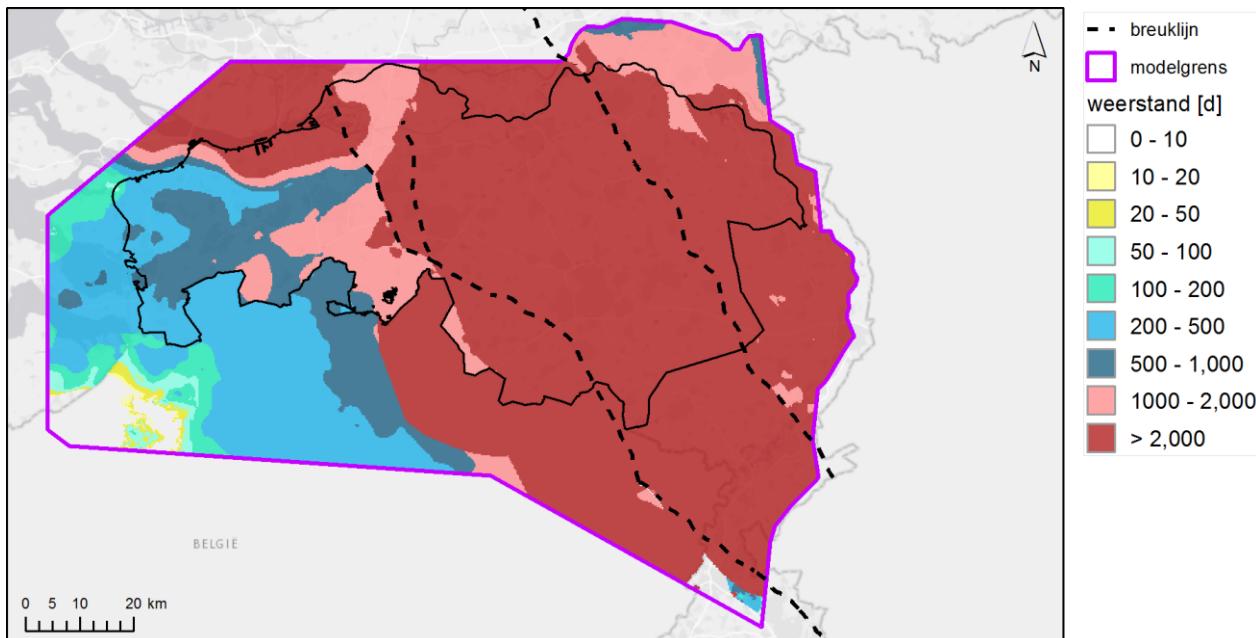


Bepaling weerstand Breda zanden

Deze weerstand is berekend met de volgende formule:

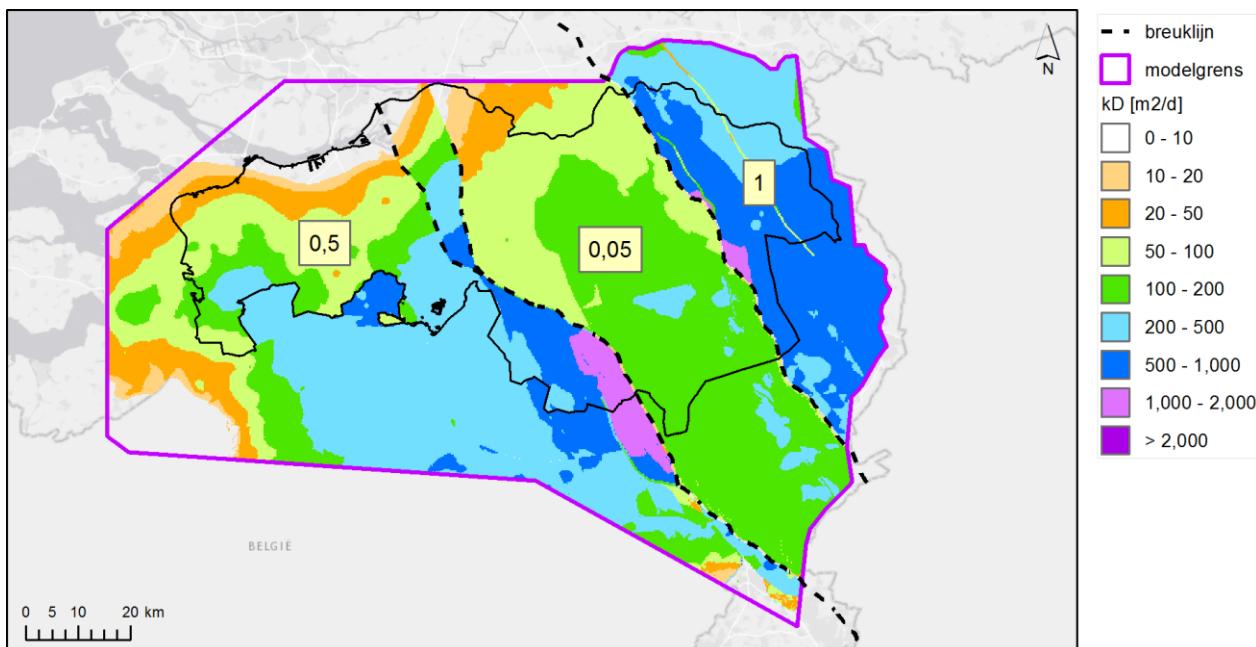
$$C \text{ Breda zanden} = \frac{\text{top19} - \text{bot19}}{\frac{kD19}{\text{top19} - \text{bot19}} * \text{anisotropiefactor}}$$

In de ijking is gekozen voor een anisotropiefactor van 0,02. De resulterende weerstand is weergegeven in Figuur 7-14.



Figuur 7-14: Weerstand Breda berekend met verticale anisotropiefactor 0,02

In de ijking blijkt dat de stijghoogte in de Breda zanden in de Centrale Slenk wordt overschat en in de Peelhorst wordt onderschat. Daarom is gekozen voor een aparte ijkfactor voor de Breda zanden in drie zones: West-Brabant, de Slenk en de Peelhorst. De resulterende watervoerendheid en de gevonden ijkfactoren zijn weergegeven in Figuur 7-15. De ijkfactor is de factor waarmee de oorspronkelijke kD-factor wordt vermenigvuldigd. In de Slenk is de ijkfactor het laagst, waarschijnlijk omdat het pakket hier veel dikker is en er dus sprake is van extra weerstand in de verticale stromingsrichting.



Figuur 7-15: Watervoerendheid Breda zanden en ijkfactoren



Aanpassing breukweerstanden

De afgeleide weerstandswaarden na ijking zijn eerder beschreven in paragraaf 5.7. De toegekende weerstanden van de hoofdbreuken en de kleinere breuken zijn getoetst en geoptimaliseerd.

7.6 IJking ondiepe systeem (Stap 2)



Aanpak

Na de ijking van het diepe systeem is het ondiepe systeem geijkt en verfijnd. Er is gekeken naar de verschillen tussen de gemeten en berekende waarden van freatische grondwaterstanden en ondiepe stijghoogten. De ondiepe ijking is gericht op drie onderdelen:

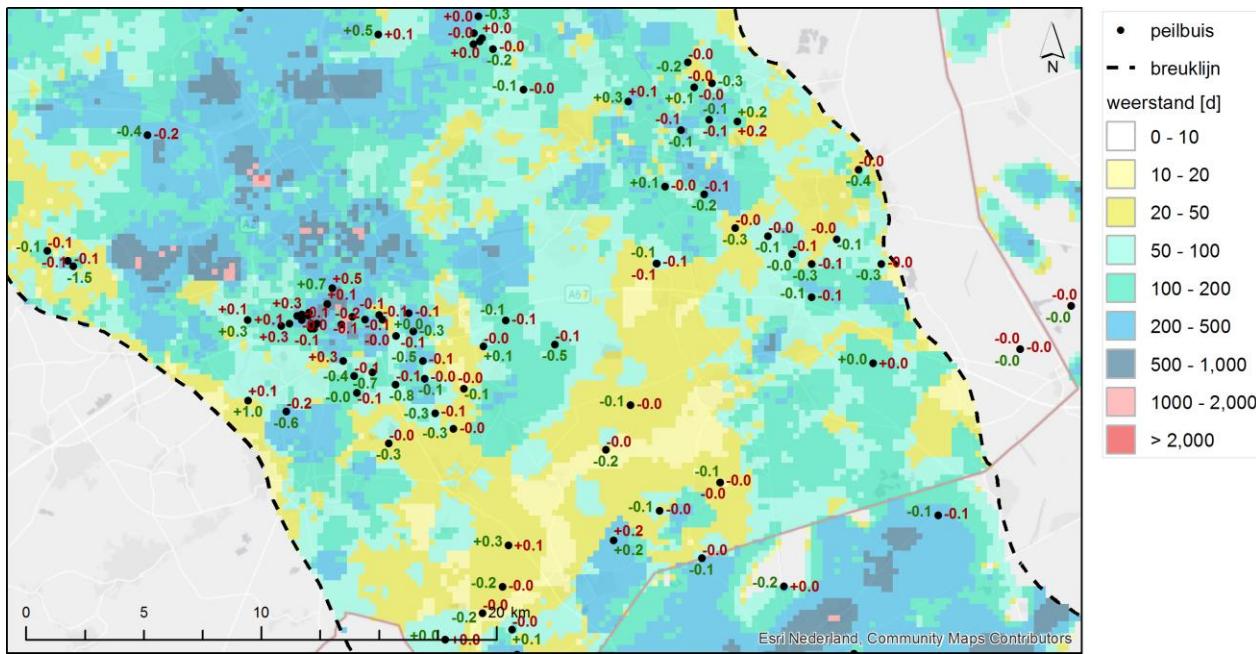
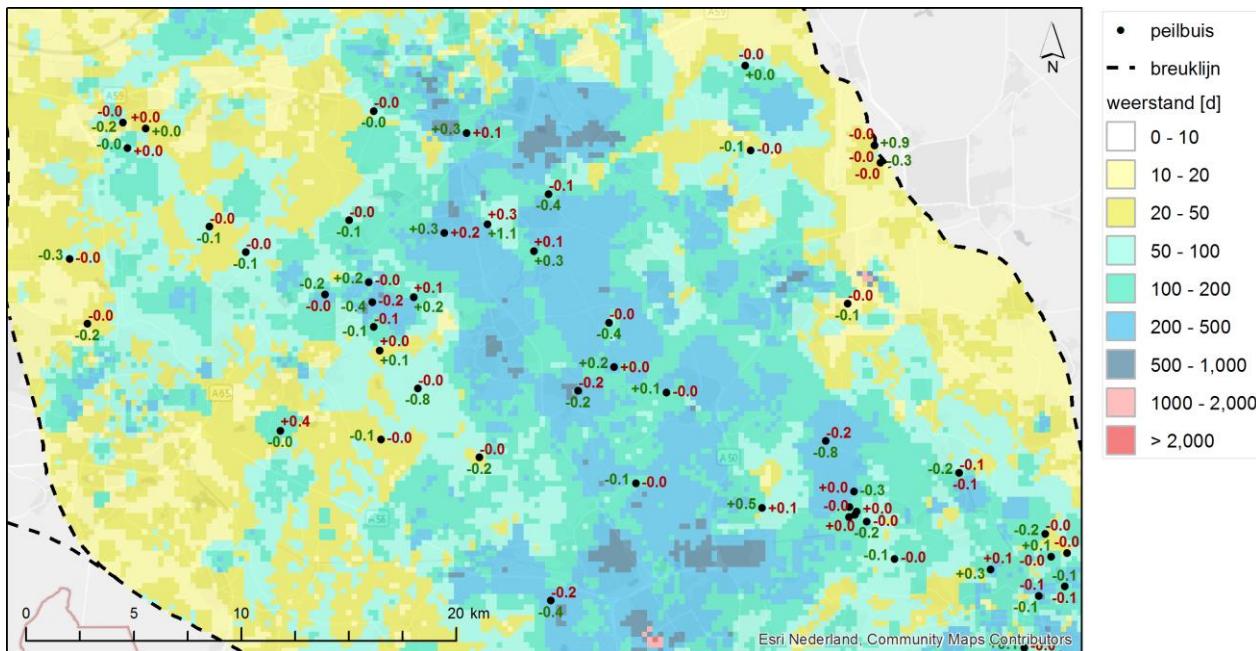
- De weerstand van de Boxtelklei in de Centrale Slenk.
- De drainageweerstand waterlopen. Gezien de celgrootte moet de drainageweerstand wellicht naar boven worden bijgesteld.
- De hoeveelheid berekening.



Bepaling weerstand Boxtelklei

De Boxtelklei is een heterogene voorkomende kleilaag (zie paragraaf 5.8).

In de ijking is beoordeeld in hoeverre het gemeten potentiaalverschil over de Boxtelklei overeenkomt met de berekende waarden. Deze vergelijking is eerst gemaakt voor het ongekalibreerde ondiepe grondwatersysteem (Figuur 7-16). Conclusie is dat de gemeten en berekende waarden voor de meeste punten redelijk goed overeenkomen; de afwijkingen zijn beperkt tot 10 a 20 centimeter. Voor enkele punten was de afwijking toch groter. Conclusie uit de ijking is dat de verbreding van de Boxtelklei en leem in REGISII v2.2 veel beter in kaart is gebracht. Met deze aanpassingen wordt een veel beter ijkresultaat verkregen dan het grondwatermodel uit 2014 met REGIS II.1. Maar lokaal kan het model nog verbeterd worden. Maar het ijkresultaat was nog onvoldoende. Daarom is ervoor gekozen om het model te verbeteren met aanvullende data uit boringen voor de gehele provincie Noord-Brabant (zie paragraaf 5.8).



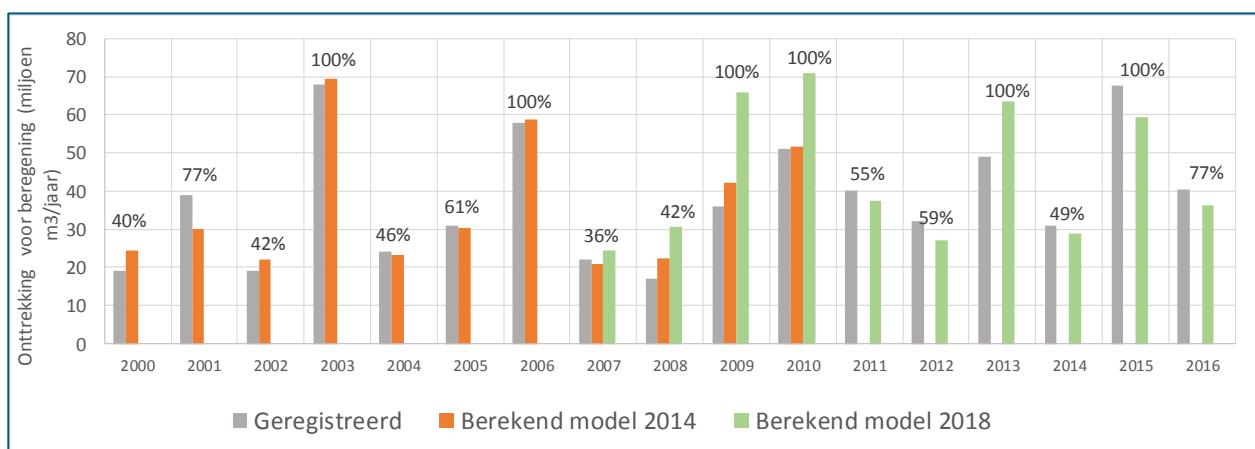
Figuur 7-16: Gemeten (in groen) en berekend (in rood) potentiaalverschil over de Boxtelklei ten opzichte van de weerstand van de Boxtelklei. De figuur boven is het noordelijk deel en onder het zuidelijk deel.



Kalibratie van beregeningshoeveelheid en vergelijking met 2014 model

De hoeveelheid berekening is bepaald met een empirische formule (zie paragraaf 5.11). De waardes in deze formule zijn gefit op het verschil tussen gemeten en berekende waarden van de hoeveelheid berekening. Een nadeel van een dergelijke empirische formule is dat de geldigheid mogelijk beperkt is, zowel in de tijd als in ruimte. Een ander tijdsinterval of een ander gebied geeft mogelijk een andere formule.

In 2018 is het model aangepast met een aanpassing van de invoerparameters voor Fluzo. Dit geeft een verschil in berekend vochttekort en heeft daarom invloed op de berekende berekening. De berekende verdamping en daarmee het vochttekort is groter in het 2018 model in vergelijking met het 2014 model. Voor de jaren 2007 tot en met 2010 zijn resultaten beschikbaar voor de hoeveelheid berekening in beide modellen. In Figuur 7-17 is te zien dat de hoeveelheid berekening met het 2018 model ook groter is, vooral voor de jaren 2009 en 2010. De hoeveelheid berekening is voor deze jaren aanmerkelijk hoger dan de geregistreerde hoeveelheid. Maar voor de jaren 2011 tot en met 2016 kloppen de hoeveelheid berekende berekening weer vrij goed met de geregistreerde hoeveelheid berekening. Dit laat zien dat de empirische formule robuust is en dat geen aanpassing nodig is.



Figuur 7-17: Berekende en geregistreerde debieten voor berekening uit grondwater in Noord-Brabant en het afgeleide rendement per jaar in procenten uit empirische formule beschreven in paragraaf 5.11

7.7 Lokale aandachtspunten (Stap 3)



Aanpak

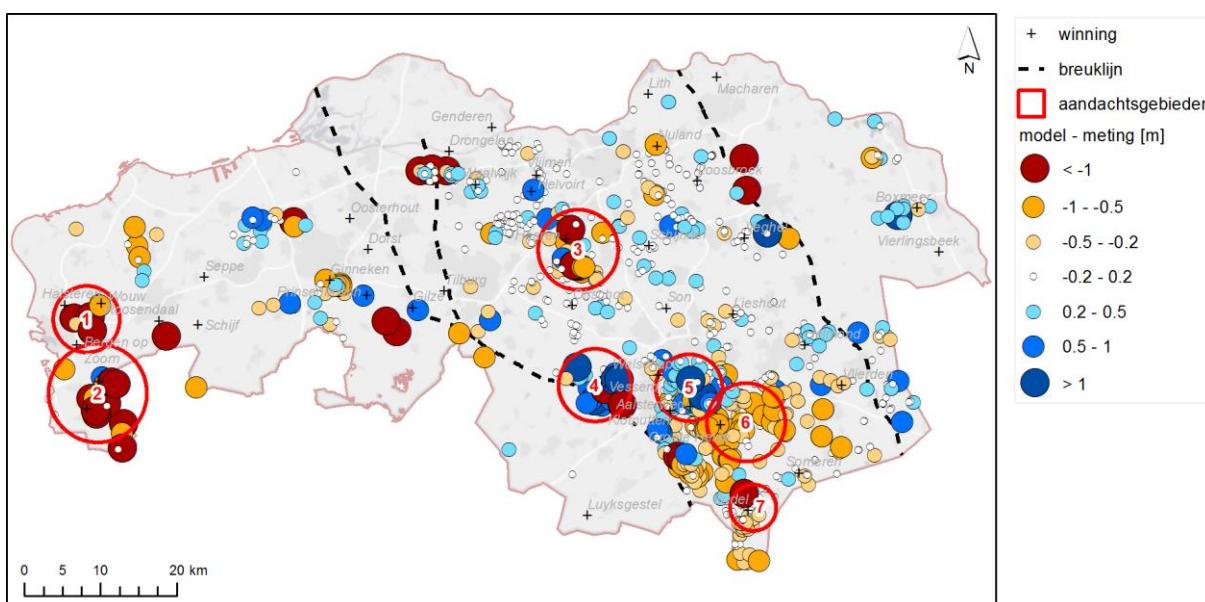
Het Brabant model is een regionaal model en op deze schaal geijkt. Lokaal kunnen er afwijkingen voorkomen. Met het maken van deelmodellen en detailstudies kunnen deze lokale verschillen verkleind worden. Bij de ijking van het Brabant model is gekeken naar structurele afwijkingen in modellaag 3 (Boxtel), modellaag 4 (Kreftenheide/Sterksel) en modellaag 9 (Peize/Waalre). Deze lagen zijn geselecteerd om een beeld te geven van duidelijk verschillende watervoerende pakketten en omdat in deze lagen relatief veel metingen beschikbaar zijn (zie Tabel 7-2).



Afwijkingen in modellaag 3

In Figuur 7-18, met de afwijkingen tussen berekende en gemeten in modellaag 3, zijn zeven gebieden te zien waar structurele afwijkingen voorkomen:

1. Aanwezigheid van schijngrondwaterspiegels op de Brabantse Wal.
2. Aanwezigheid van schijngrondwaterspiegels op de Brabantse Wal. De winning Huijbergen is sterk afgenoem. De Brabantse Wal is daarom stationair niet goed te modelleren. Daarnaast zorgt de aansluiting met België in het lagenmodel voor stromingsweerstand die in werkelijkheid niet aanwezig is.
3. In natuurgebied Kampina is het in werkelijkheid natter dan het model berekent. Mogelijk is er hier meer weerstand in de Boxtelklei (laag 2 en 3) dan afgeleid uit boringen.
4. De berekende grondwaterstanden zijn hoger dan gemeten rond Vessem. Brabant Water onttrekt hier grondwater uit de Formatie van Sterksel. Spoelwater van de winning wordt weer in vennen geïnfiltreerd naar het grondwater. Dit is niet verwerkt in het grondwatermodel, maar kan niet de grote verschillen verklaren. In het gebied komen lokale breuken voor. Hierover is weinig bekend. Er is een lokale breuk actief gemaakt (weerstand 200 dagen), maar dit heeft beperkt effect.
5. Ten westen van Eindhoven is het voornamelijk te nat. Mogelijk zit hier meer drainage in stedelijk gebied dan in het model is ingevoerd.
6. Ten zuiden van Eindhoven is het model voornamelijk te droog. Er is geen duidelijke oorzaak.
7. Rond Budel zijn de berekende grondwaterstanden te laag. De winning van Budel is verdiept in 2013. Daarom is dit gebied stationair moeilijk te iijken. Ook de bemaling van Nyrstar heeft invloed op de grondwaterstand. Deze onttrekking is in het model opgenomen.



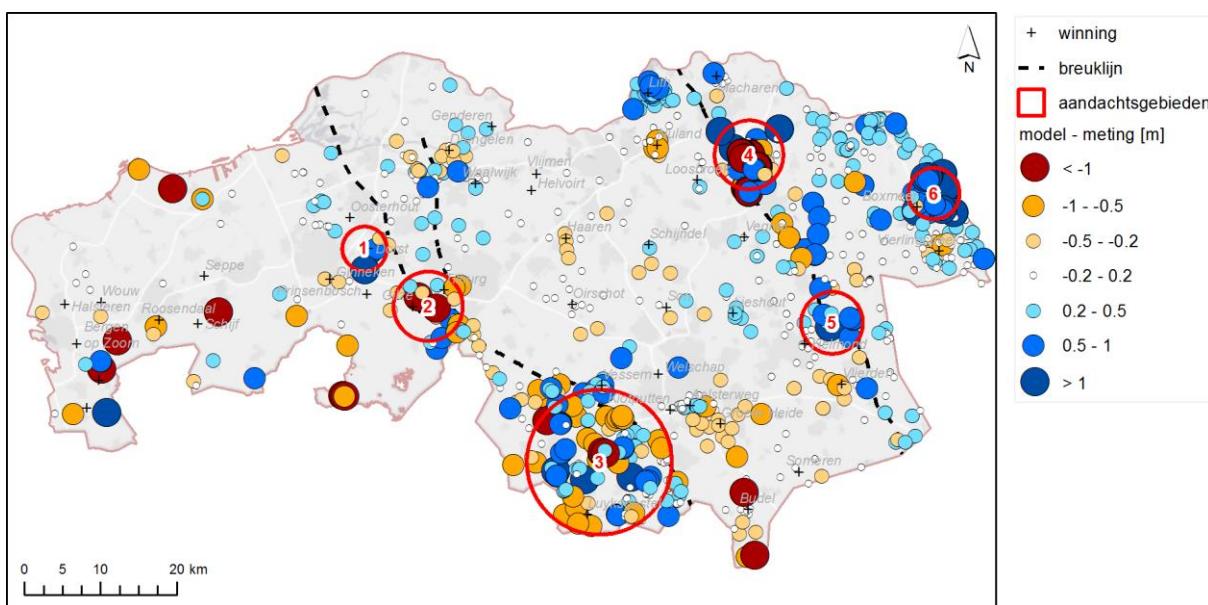
Figuur 7-18: Verschil tussen gemiddeld berekend en gemeten grondwaterstand in laag 3 met zeven aandachtsgebieden



Afwijkingen in modellaag 4

In Figuur 7-19 met de afwijkingen tussen berekende en gemeten in modellaag 4 zijn zes gebieden te zien waar structurele afwijkingen voorkomen:

1. Ten westen van de Feldbiss breuk zijn de berekende grondwaterstanden te hoog.
2. Er zijn grote afwijkingen tussen de Feldbiss en Gilze-Rijen breuk. Mogelijk is er plaatselijk nog wel breukwerking in het traject verder naar het noorden.
3. De grondwaterstanden rond de beekdalen zijn overwegend te hoog. De berekende grondwaterstanden in een gebied aan de zuidgrens bij de Keunensloop en de Beekloop zijn te laag. Ook in diepere lagen wordt de stijghoogte overschat.
4. Op de Horst zijn de berekende grondwaterstanden te laag. Dit gebied is gevoelig voor variaties in de grondwateraanvulling. Grondwaterstroming wordt beïnvloed door breuken, de Peelrandbreuk in het westen en de Raambreuk in het oosten. Er is beoordeeld of aanpassing van de breukweerstand een verbetering geeft in berekende grondwaterstanden. Dit was niet het geval. De aanwezigheid van Waalre klei 1 op de Horst is veranderd van versie REGIS II.1 naar versie II.2, die wordt gebruikt in het 2018 grondwatermodel. In plaats van een continue laag komt Waalre klei 1 nu niet overal voor. Deze bevinding wordt ondersteund door boordata (mondelinge mededeling TNO). Deze configuratie geeft in totaal minder weerstand en dus wat lagere grondwaterstanden.
5. Het model berekent te hoge grondwaterstanden rondom Helmond. Hiervoor is geen duidelijke oorzaak.
6. Het model berekent te hoge grondwaterstanden rondom winning Boxmeer. Deze winning is stopgezet in 2012. Dit kan stationair niet goed worden berekend. Een andere oorzaak kan zijn dat de Maas in werkelijkheid meer draineert dan wordt gemodelleerd.



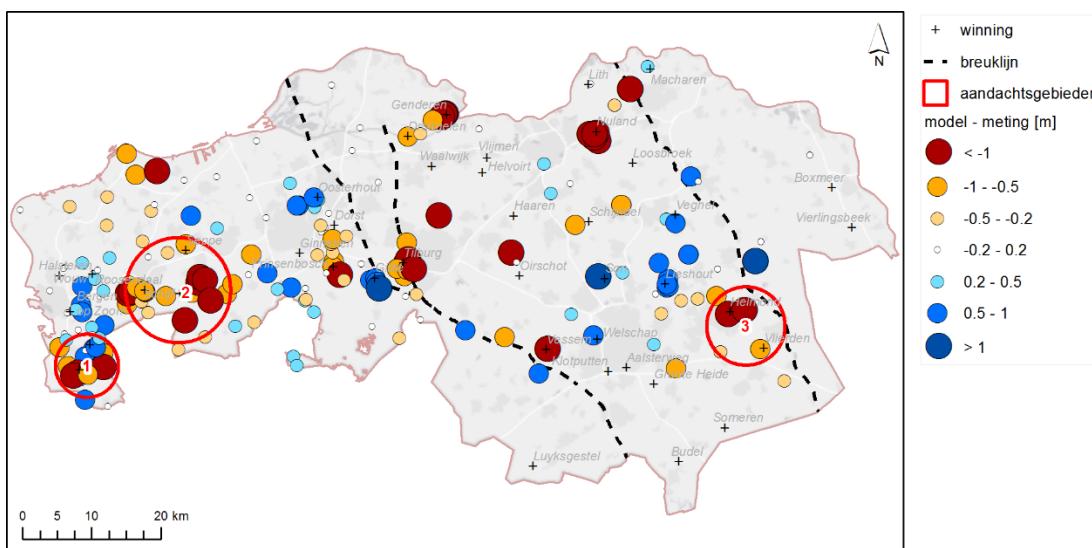
Figuur 7-19: Verschil tussen gemiddeld berekend en gemeten grondwaterstand in laag 4 met zeven aandachtsgebieden



Afwijkingen in modellaag 9

Modellaag 9 is de zandlaag onder Waalre klei 1. In Figuur 7-20 met de afwijkingen tussen berekende en gemeten stijghoogten in modellaag 9 zijn drie gebieden te zien waar structurele afwijkingen voorkomen:

1. De berekende stijghoogten onder de Brabantse Wal zijn te laag. Mogelijk zit hier te veel stromingsweerstand op de grens met België.
2. Hetzelfde verschijnsel treedt op ten oosten van Roosendaal.
3. Rond Helmond zijn de berekende stijghoogten te laag. Hetzelfde is te zien in diepere modellagen (laag 10 en dieper). Mogelijk is de weerstand van de Waalre klei hier te hoog. Boven de Waalre klei is sprake van overschatting, onder de Waalre klei is het te droog.



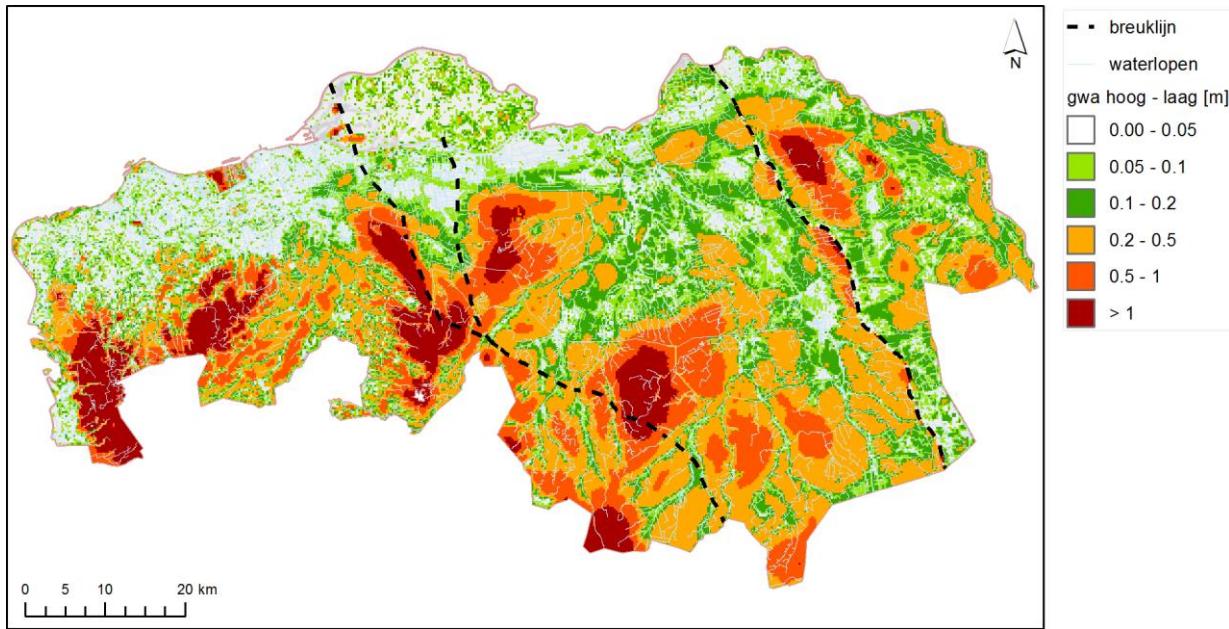
Figuur 7-20: Verschil tussen gemiddeld berekend en gemeten grondwaterstand in laag 9 met drie aandachtsgebieden

7.8 Gevoeligheid voor veranderingen in grondwaternauvulling



De grondwaternauvulling is gemodelleerd met FLUZO (zie hoofdstuk 4). Dit is een apart model waarin de fysische processen van verdamping, infiltratie in de bodem en gewasgroei worden gesimuleerd. Ook hier zijn onzekerheden in parameters en invoerdata zoals de meteorologie. Deze onzekerheid is niet naar één ijkfactor te vertalen. Daarom is de grondwaternauvulling niet meegenomen in de ijkking. De gevoeligheid van het grondwatermodel voor variatie in grondwaternauvulling is wel onderzocht. Hiervoor is in een stationaire berekening de grondwaternauvulling gevarieerd met een factor 0,8 (laag) en 1,2 (hoog).

Het effect van de grondwaternauvulling op de freatische grondwaterstand is weergegeven in Figuur 7-21, voor de situatie met een hoge grondwaternauvulling (1,2 * gwa) minus de situatie met een lage grondwaternauvulling (0,8 * gwa). Vooral de hogere gronden met relatief weinig drainage zijn gevoelig voor veranderingen van de grondwaternauvulling: het effect bedraagt hier meer dan 1 meter.



Figuur 7-21: Gevoeligheid voor variatie in de grondwaternaamvulling (gwa *1,2 minus gwa *0,8)

De gekozen grondwaternaamvulling is bepalend voor de kalibratie. Bij een lagere of hogere grondwaternaamvulling gaat de gemiddelde absolute fout omhoog (Tabel 7-3). Dit wil echter niet zeggen dat de gekozen grondwaternaamvulling optimaal is: waarschijnlijk kan bij een andere grondwaternaamvulling dezelfde modelnauwkeurigheid worden verkregen door andere ijkfactoren te kiezen voor de doorlatendheid van de bovenste modellagen.

Tabel 7-3: Gevoelighedsanalyse grondwaternaamvulling: effect op de modelnauwkeurigheid

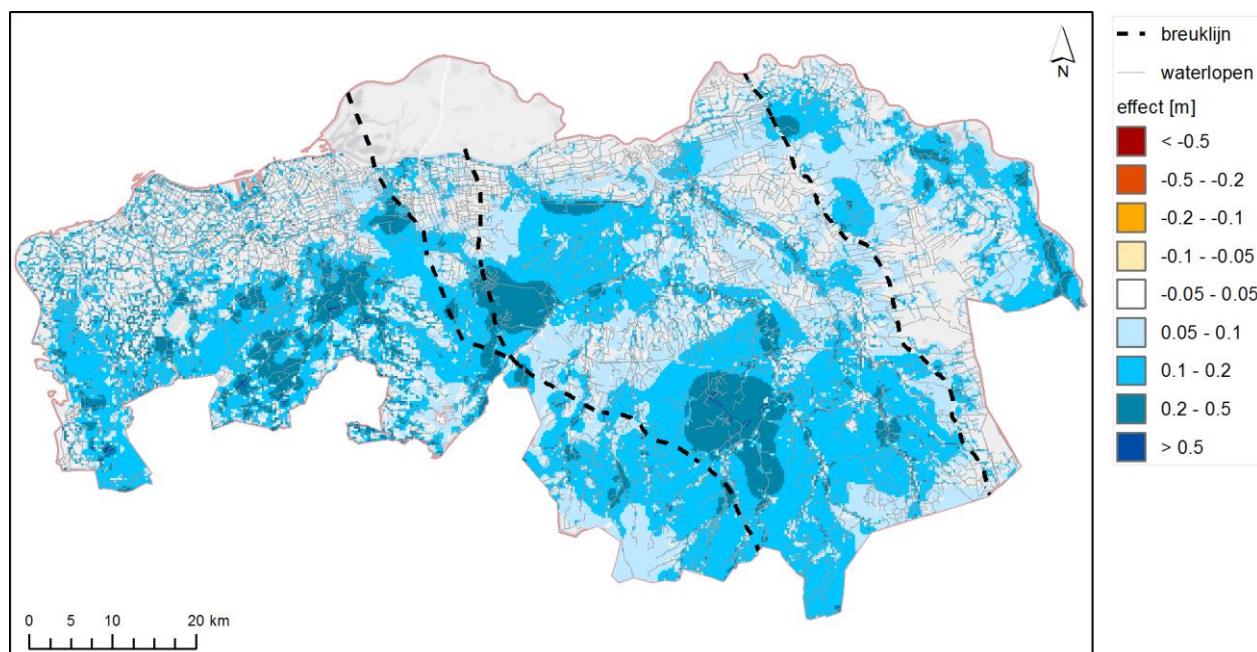
Variant	Gemiddelde fout [m]	Gemiddelde absolute fout [m]
gwa * 0,8	-0,24	0,48
gwa	-0,03	0,40
gwa * 1,2	0,11	0,41

Opmerking: de gemiddelde fout is berekend over alle filters binnen de Provincie Noord-Brabant.

7.9 Gevoeligheid voor verandering in drainageweerstand



Het grondwatermodel is opgezet met cellen van 250 bij 250 meter. De gebruikte formule geeft mogelijk een onderschatting van de drainageweerstand in het model. Om de gevoeligheid hiervan op de modeluitkomsten in beeld te brengen is een berekening gemaakt waarin alle drainageweerstanden twee keer zo groot zijn gemaakt. Meer drainageweerstand betekent minder drainage en dus hogere grondwaterstanden. De infiltratie weerstand is van minder invloed op de schaal van de provincie Noord-Brabant en is gelijk gehouden.



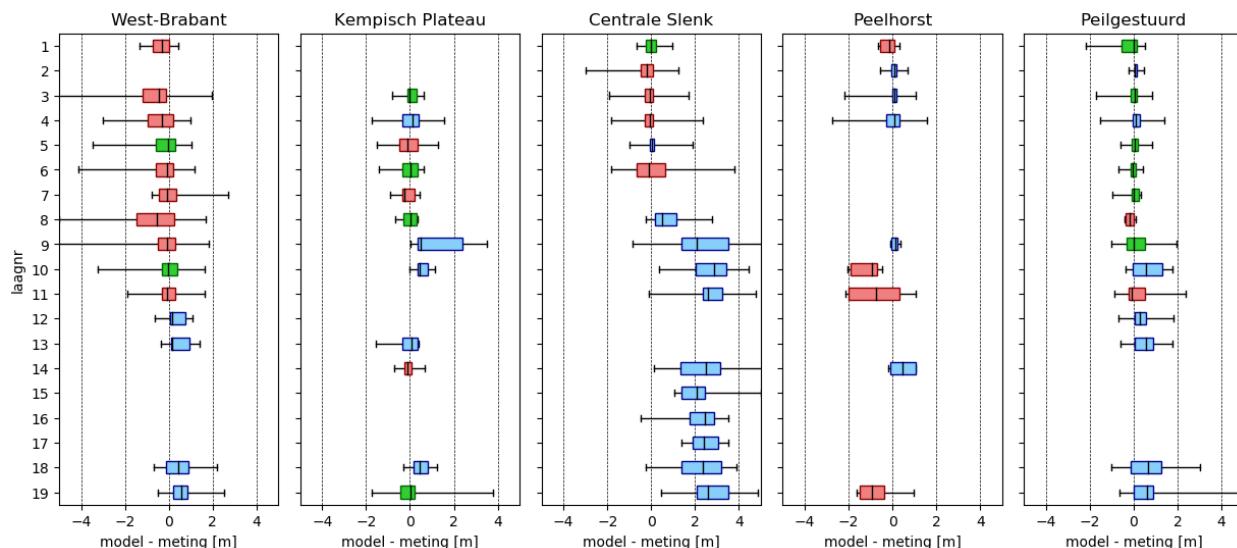
Figuur 7-22: Gevoelighedenanalyse drainageweerstand: effect van twee keer zo hoge weerstand op de freatische grondwaterstand

In Figuur 7-22 is te zien dat niet alle gebieden even gevoelig zijn voor verandering van de drainageweerstand. Vooral de bovenstroomse gebieden van de Centrale Slenk en West-Brabant zijn het meeste gevoelig. De grondwaterstand kan hier met meer dan 50 cm stijgen. De drainageweerstand is niet aangepast in het model.

7.10 Resultaat stationaire ijking



Het model is stationair geijkt met de Monte Carlo methode. De stationair berekende stijghoogten zijn vergeleken met de mediaan over de metingen van de peilbuiscfilters in de ijkset. Figuur 7-23 toont het ijkresultaat op basis van de nieuwe modelopzet, maar nog zonder ijking.



Figuur 7-23: Stationaire modelafwijkingen per deelgebied per modellaag voor ijking. (blauw = te nat, groen = gemiddeld goed, rood = te droog). De zijkanten van de boxen geven de 25e en 75e percentielwaarde weer. De lijnen geven de spreiding in modelafwijking weer (minimum en maximum).

Met de beschreven ijking in stap 1 en 2 is het model verbeterd. Voor de ijking bedraagt de gemiddelde absolute afwijking over alle buizen in Noord-Brabant 0,59 m. Met de ijking is dit omlaag gebracht naar 0,40 m (Tabel 7-4). De gemiddelde fout bedraagt -0,03 m. Na ijking ligt de gemiddelde fout dus dicht bij nul.

Tabel 7-4: Modelnauwkeurigheid voor en na stationaire ijking

Variant	Gemiddelde fout [m]	Gemiddelde absolute fout [m]
Voor ijking (cal0)	0,11	0,59
Na ijking (cal1)	-0,03	0,40

De ijkdataset bevat reeksen die variëren in lengte van 1 tot 8 jaar. Omdat de mediaan van een kortere reeks minder representatief is dan de mediaan van een langere reeks, is de modelnauwkeurigheid als functie van de reekslengte onderzocht (Tabel 7-5). Het blijkt dat de gemiddelde fout en gemiddelde absolute fout weinig variëren in functie van de reekslengte. Zowel de kortere als de langere reeksen zijn dus bruikbaar voor de stationaire ijking van dit model.

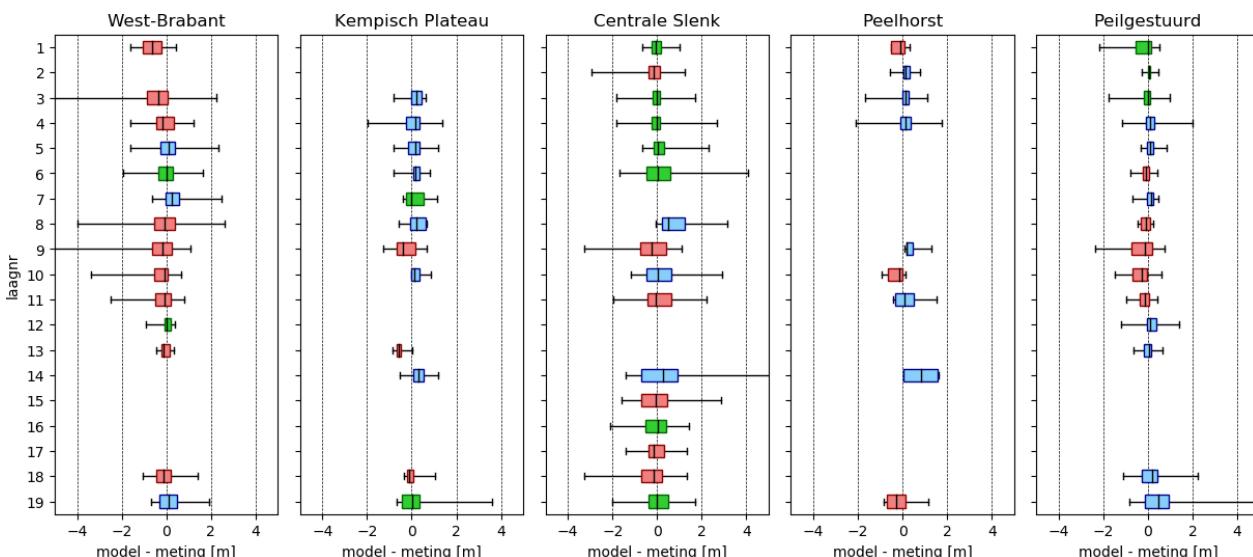
Tabel 7-5: Modelnauwkeurigheid als functie van de reeks lengte

Aantal meetjaren [-]	1	2	3	4	5	6	7	8
Aantal filters [-]	516	551	639	694	540	480	240	127
Gemiddelde fout [m]	-0.03	-0.05	-0.05	-0.01	-0.02	-0.07	0.03	-0.02
Gemiddelde absolute fout [m]	0.37	0.40	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.31

Opmerking: de gemiddelde fout is berekend over alle filters binnen de Provincie Noord-Brabant.

De modelafwijkingen per deelgebied (Figuur 7-24) laten het volgende zien:

- In West-Brabant worden de grondwaterstanden in het Holocene en de Boxtel zanden (laag 1 en 3) te laag berekend. Ook onder de Waalre zanden (vanaf laag 8) zijn de berekende stijghoogen te laag.
- Op het Kempisch Plateau worden de grondwaterstanden en de stijghoogen voornamelijk te hoog berekend.
- In De Centrale Slenk wordt de grondwaterstand en de stijghooge in het eerste watervoerend pakket (laag 1 t/m 4) goed berekend. De stijghoogen in de watervoerende pakketten hieronder (Waalre zanden, Maassluis, Kiezeloöljet, Oosterhout, Breda) zijn afwisselend te hoog en te laag berekend.
- Op de Peelhorst wordt de stijghooge in het eerste watervoerende pakket (laag 2, 3, 4 en 9) gemiddeld goed berekend. In laag 10 (Waalre zanden) en laag 19 (Breda zanden) wordt de stijghooge voornamelijk te laag berekend.
- In het peilgestuurde gebied worden de grondwaterstanden en de stijghooge relatief goed berekend. De modelafwijkingen zijn hier beperkt door de sterke invloed van het oppervlaktewatersysteem. Net als in West-Brabant worden de stijghoogen in de Waalre zanden (laag 8 t/m 11) onderschat.



Figuur 7-24: Stationaire modelafwijkingen per deelgebied per modellaag na ijkking (blauw = te nat, groen = gemiddeld goed, rood = te droog). De zijkanten van de boxen geven de 25e en 75e percentielwaarde weer. De lijnen geven de spreiding in modelafwijking weer (minimum en maximum).

De uiteindelijk afgeleide ijkfactoren per modellaag zijn gepresenteerd in Tabel 7-6.

Tabel 7-6: Gekozen interval uit de gevoeligheidsanalyse (zie paragraaf 7.2) voor de ijkfactoren per modellaag en de gevonden optimale waarde na ijking

Laag	Formatie	Min [-]	Max [-]	Ijkfactor [-]
1	Holoceen	0,5	1,5	1
	Holoceen	0,5	5	1
2	Boxtel	0,5	1,5	0,5
	Boxtel/Liempde & Boxtel	0,5	5	1
3	Boxtel	0,5	1,5	0,5
	Boxtel	0,5	5	1
4	Boxtel	0,5	1,5	0,5
	Kreftenhaye	0,5	1,5	1
	Beegden	0,1	1	0,2
	Sterksel	0,5	1,5	1,1
5	Beegden en Sterksel	0,5	5	1
	Sterksel	0,5	1,5	1,1
	Stramproy	0,5	1,5	1,5
6	Stramproy	0,5	5	5
	Stramproy	0,5	1,5	1
7	Stramproy	0,5	1,5	1,5
	Stramproy	0,5	5	1
8	Stramproy	0,5	1,5	1,5
	Waalre klei (0 - 30 m-mv)	10	15	10
	Waalre klei (30 - 60 m-mv)	10	15	10
9	Waalre klei (> 60 m-mv)	10	30	25
	Peize / Waalre	0,5	1,5	0,8
	Waalre	0,5	5	5
10	Peize / Waalre	0,5	1,5	0,8
	Waalre	0,5	5	1
11	Peize / Waalre	0,5	1,5	0,8
	Waalre	0,1	2	0,1
12	Peize / Waalre	0,5	1,5	0,8
	Maassluis	0,5	2	1,5
13	Maassluis	0,5	5	1
	Maassluis	0,5	2	1,5
14	Maassluis	0,5	5	3
	Kiezeloöliet (West-Brabant)	0,5	2	1,5
15	Kiezeloöliet (Slenk)	0,5	1,5	0,7
	Kiezeloöliet (Peelhorst)	0,5	1,5	1
	Kiezeloöliet	0,5	2	1,5
	Kiezeloöliet	0,5	5	1
16	Kiezeloöliet (West-Brabant)	0,5	1,5	0,7
	Kiezeloöliet (Slenk)	0,5	1,5	1
	Kiezeloöliet (Peelhorst)	0,5	2	1,5
	Kiezeloöliet	0,5	5	3
17	Kiezeloöliet (West-Brabant)	0,5	1,5	0,7
	Kiezeloöliet (Slenk)	0,5	1,5	1
	Kiezeloöliet (Peelhorst)	0,5	2	1,5
	Oosterhout	0,5	2	0,85
18	Kiezeloöliet & Oosterhout	0,5	5	1,5
	Oosterhout	0,5	2	0,85
	Breda	0,5	5	1
19	Breda (West-Brabant)	0,5	1,5	0,5
	Breda (Slenk)	0,01	0,2	0,05
	Breda (Peelhorst)	0,5	1,5	1

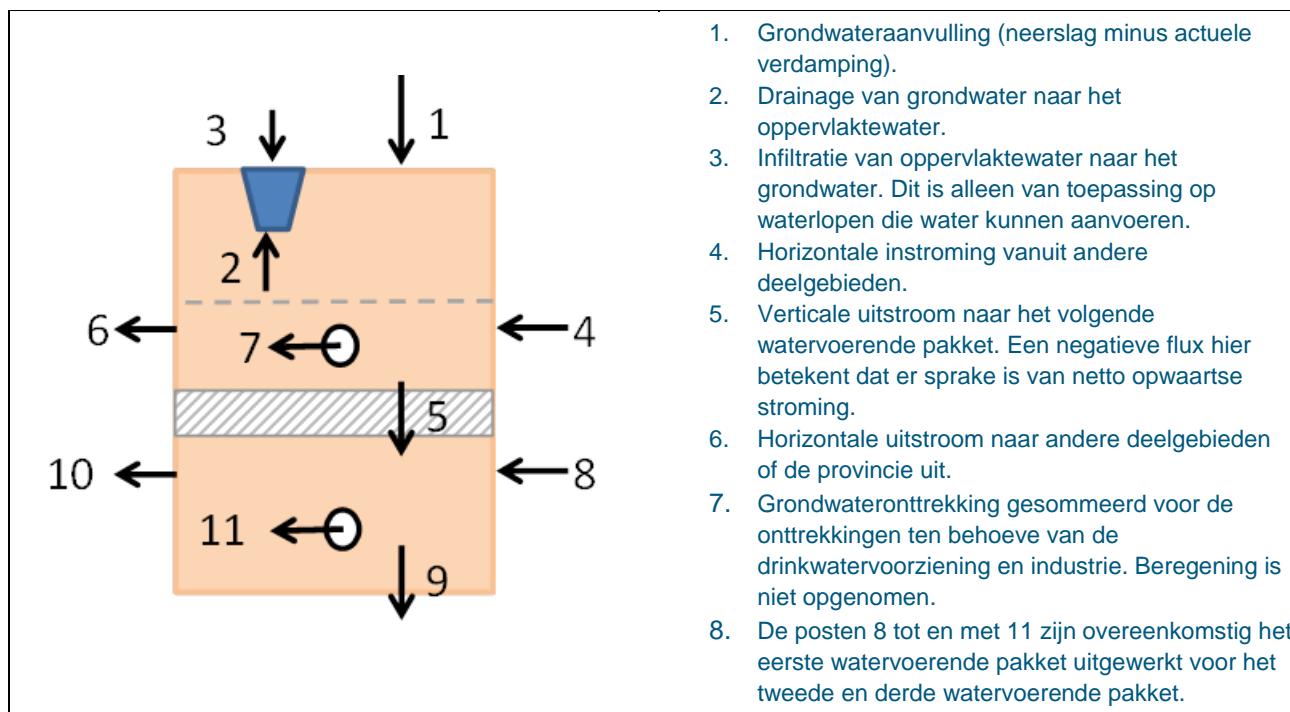
8 Modeluitkomsten en validatie

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste modeluitkomsten gepresenteerd in de vorm van waterbalansen (paragraaf 8.1), isohypsenkaarten voor de diepe watervoerende pakketten (paragraaf 8.2), de freatische grondwaterstanden (paragraaf 8.3) en de berekende verticale opwaartse stroming (paragraaf 8.4). Het model is gevalideerd aan gemeten afvoeren door waterschap Aa en Maas en de Dommel (paragraaf 8.5) en gemeten grondwaterstanden in de tijd (paragraaf 8.6 en paragraaf 8.7).

8.1 Waterbalansen

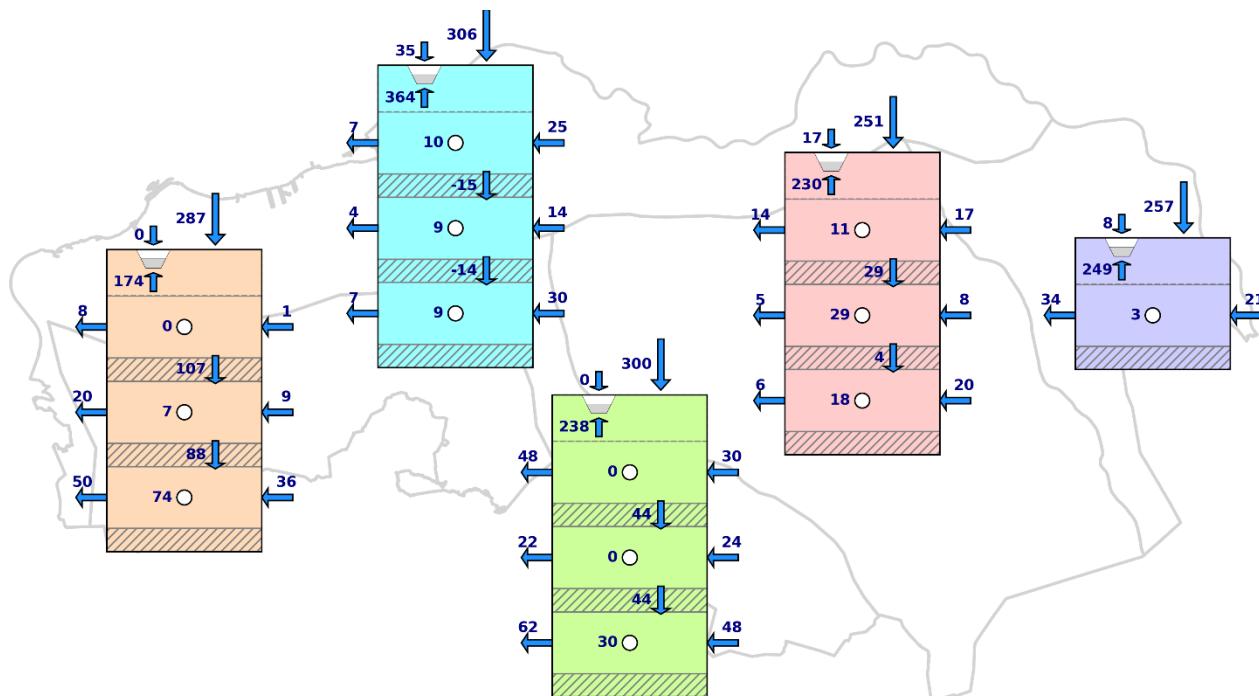


Voor de waterbalansfiguren is eenzelfde soort weergave gekozen als eerder is gedaan in het Draagkracht rapport (Royal HaskoningDHV, 2017c). De waterbalanstermen zijn toegelicht in Figuur 8-1.

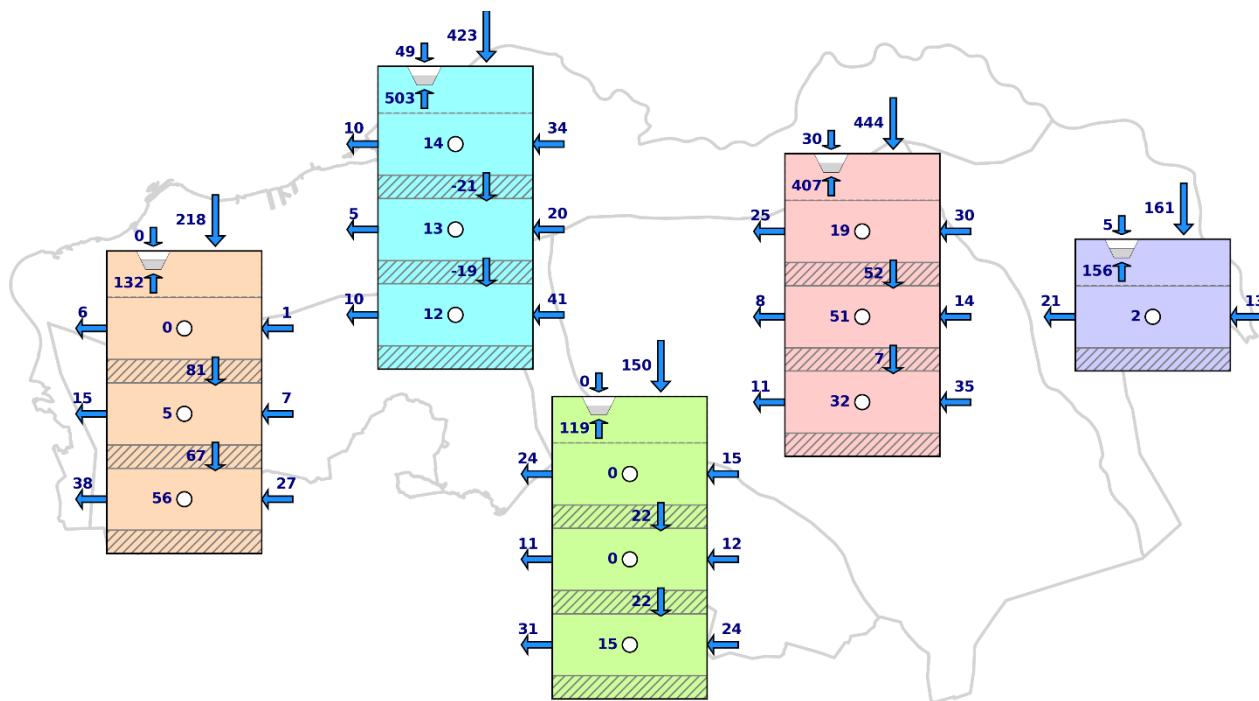


Figuur 8-1: Waterbalanstermen

De waterbalansen zijn gepresenteerd in hoeveelheden mm per jaar (Figuur 8-2) en in miljoen m³/jaar (Figuur 8-3). Presentatie in mm/jaar maakt een vergelijking tussen deelgebieden mogelijk, omdat de hoeveelheden onafhankelijk zijn van de grootte van het deelgebied. De presentatie in miljoen m³/jaar sluit aan bij het bestaande beeld over de hoeveelheid water die wordt onttrokken. De waterbalans is gepresenteerd voor de vijf geohydrologische deelgebieden zoals eerder toegelicht in paragraaf 5.1 en Figuur 5-1. De berekende afvoer door het oppervlaktewatersysteem is in paragraaf 8.5 van dit rapport gevalideerd aan gemeten waarden voor enkele deelstroomgebieden. De overige waterbalansposten liggen vast (de onttrekkingen) of zijn niet goed te valideren (horizontale instroom/ uitstroom en de grondwaternaavulling). De waterbalans is opgedeeld in het eerste watervoerende pakket (modellaag 1-4), tweede watervoerende pakket (modellaag 5-12) en derde watervoerende pakket modellaag 13-19).



Figuur 8-2: Huidige waterbalans [mm/jaar]

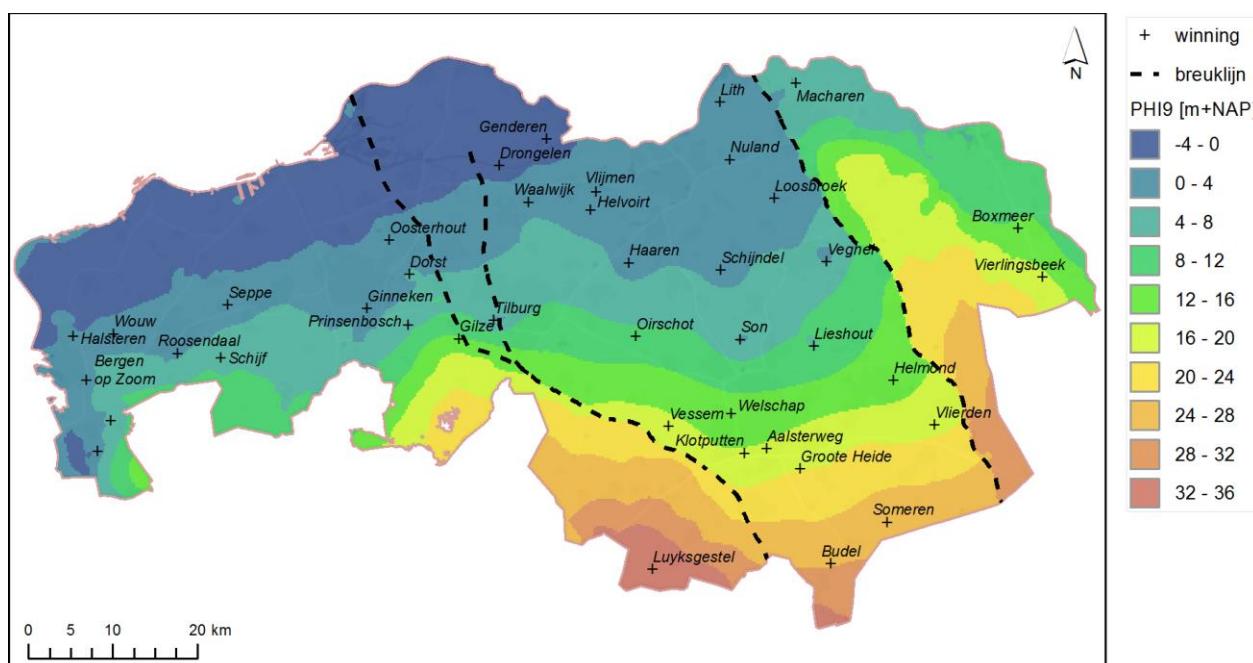


Figuur 8-3: Huidige waterbalans [miljoen m³/jaar]

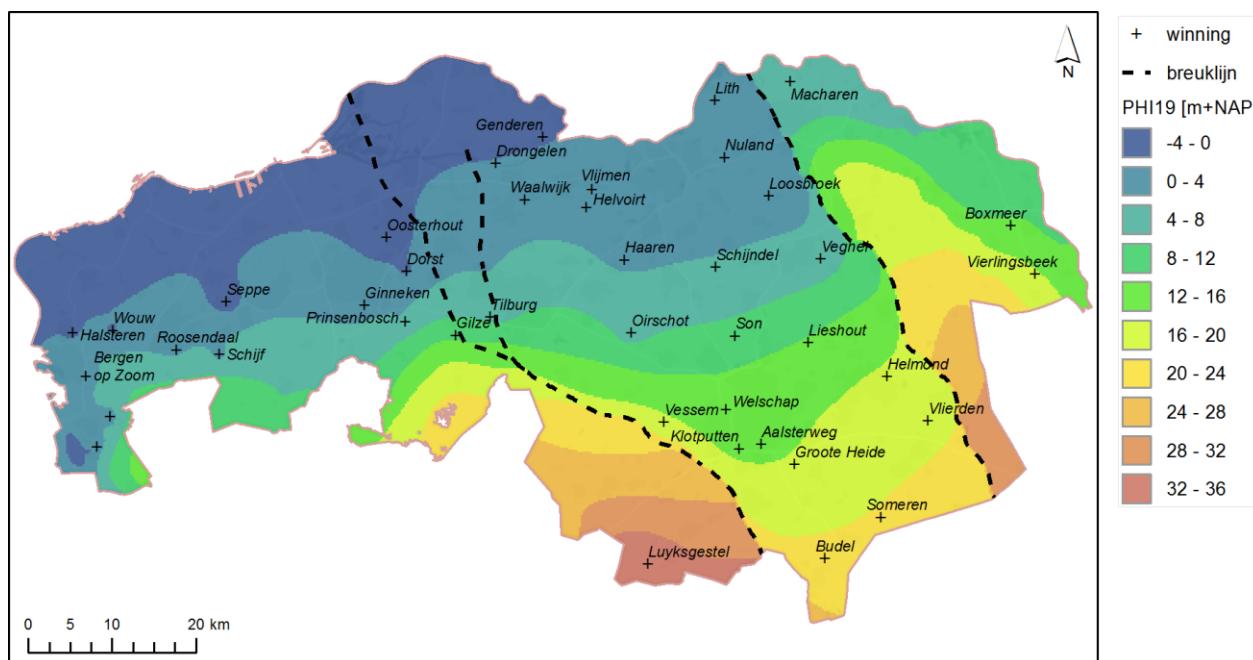
8.2 Potentialen



De berekende stijghoogten in modellaag 9 en modellaag 19 zijn gepresenteerd in Figuur 8-4 en Figuur 8-5. Deze lagen zijn gekozen omdat dit duidelijk gescheiden diepe watervoerende pakketten zijn. De stijghoogte in beide pakketten verschilt, maar het regionale beeld in potentialen lijkt erg op elkaar. In hoofdstuk 7 is eerder ingegaan op de ijking van berekeningen aan metingen.



Figuur 8-4: Berekende potentiaal in modellaag 9 (Waalrezanden)



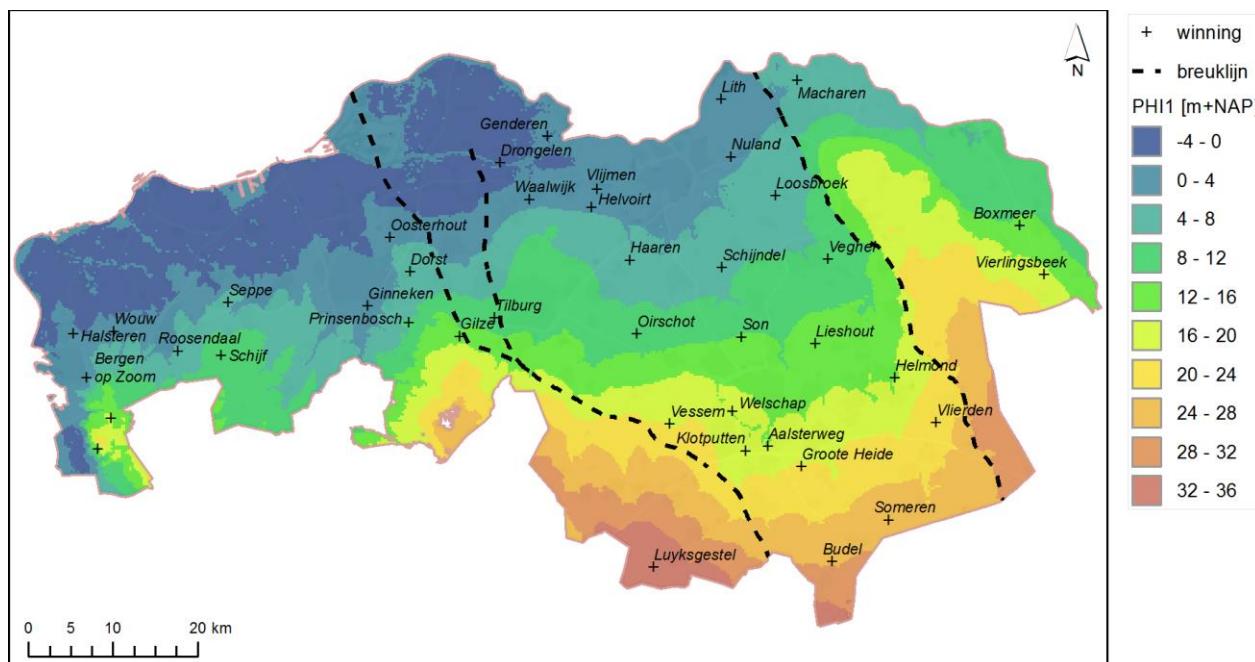
Figuur 8-5: Berekende potentiaal in modellaag 19 (Bredazanden)

8.3 Grondwaterstanden en GxG

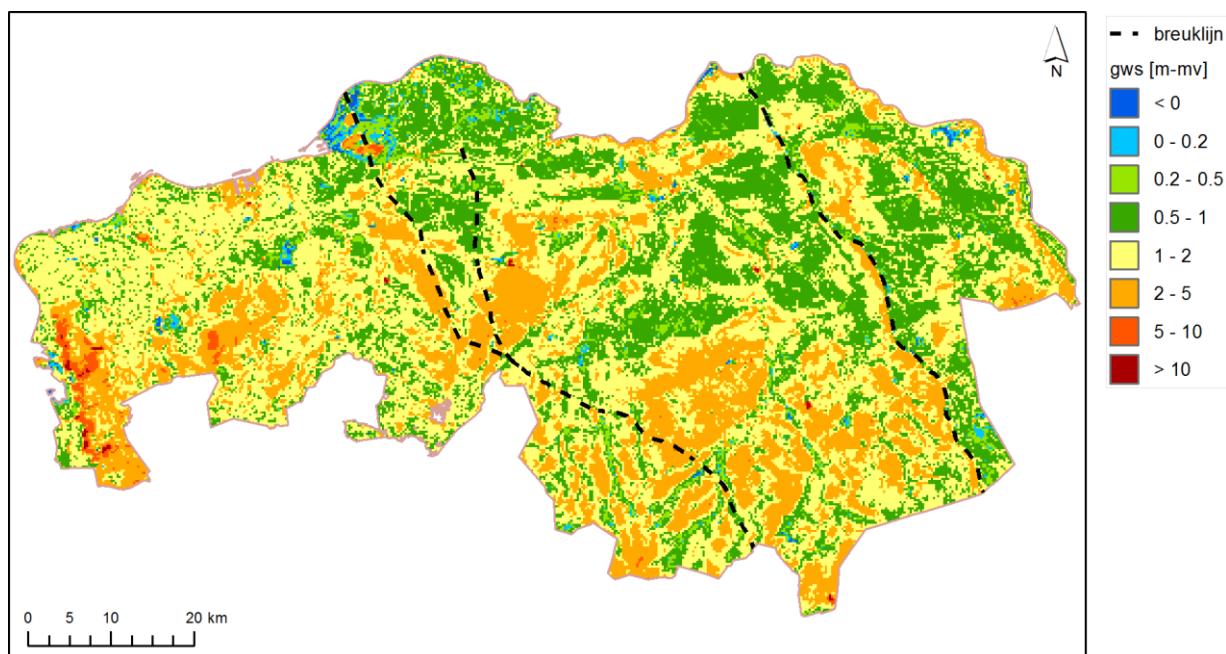


Berekende grondwaterstanden

De gemiddeld berekende grondwaterstand ten opzichte van NAP en maaiveld zijn gepresenteerd in Figuur 8-6 en Figuur 8-7. De grondwaterstanden ten opzichte van NAP volgen de regionale topografie. De grondwaterstanden ten opzichte van maaiveld worden bepaald door de lokale topografie zoals de laaggelegen beekdalen en hooggelegen zandgronden.

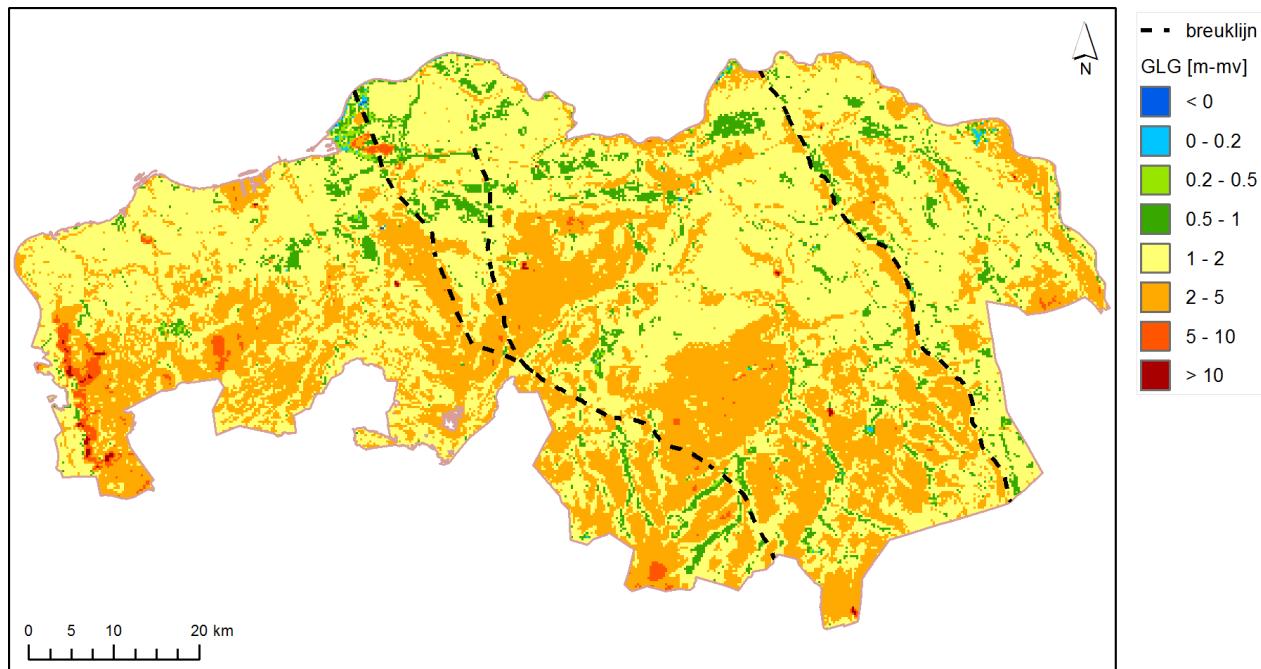


Figuur 8-6: Berekende grondwaterstand (modellaag 1) ten opzichte van NAP

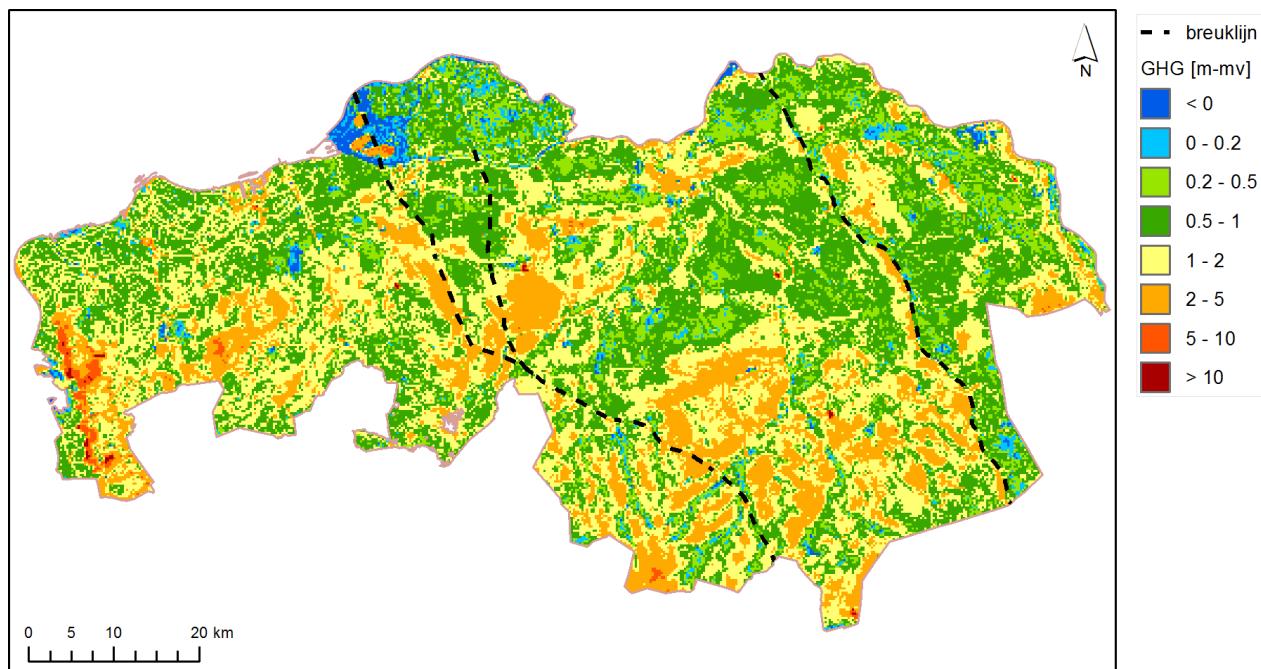


Figuur 8-7: Berekende grondwaterstand (modellaag 1) ten opzichte van maaiveld

De berekende GLG en GHG zijn gepresenteerd in Figuur 8-8 en Figuur 8-9.



Figuur 8-8: Berekende GLG ten opzichte van maaiveld



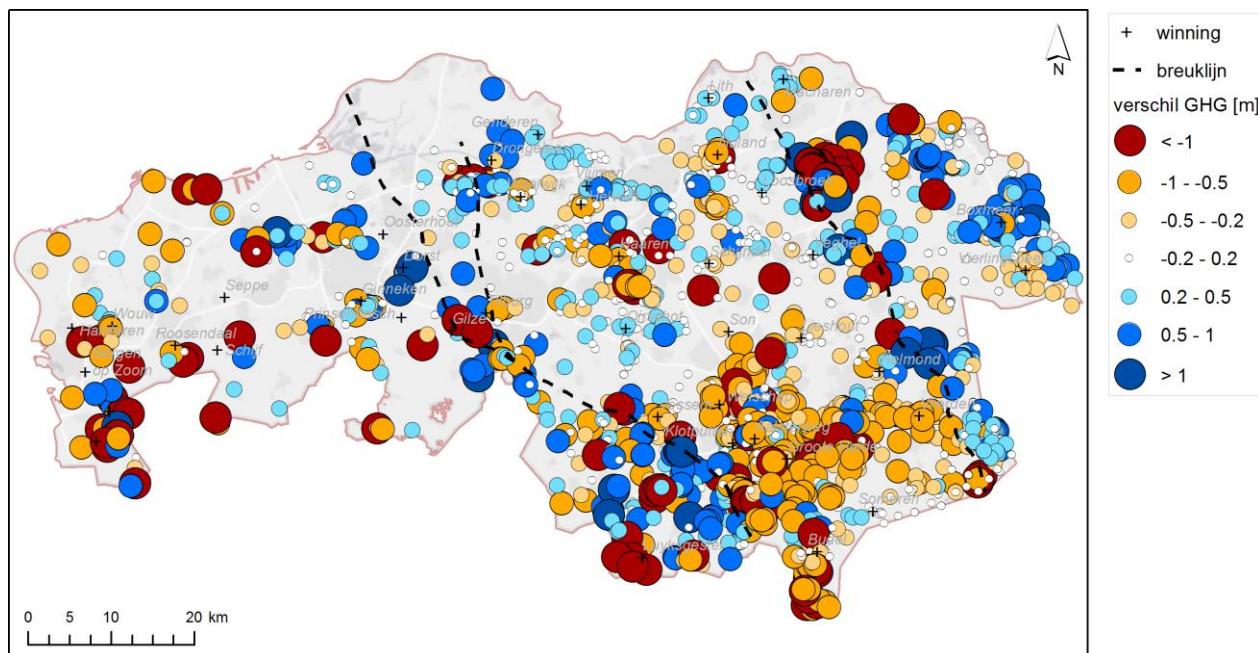
Figuur 8-9: Berekende GHG ten opzichte van maaiveld



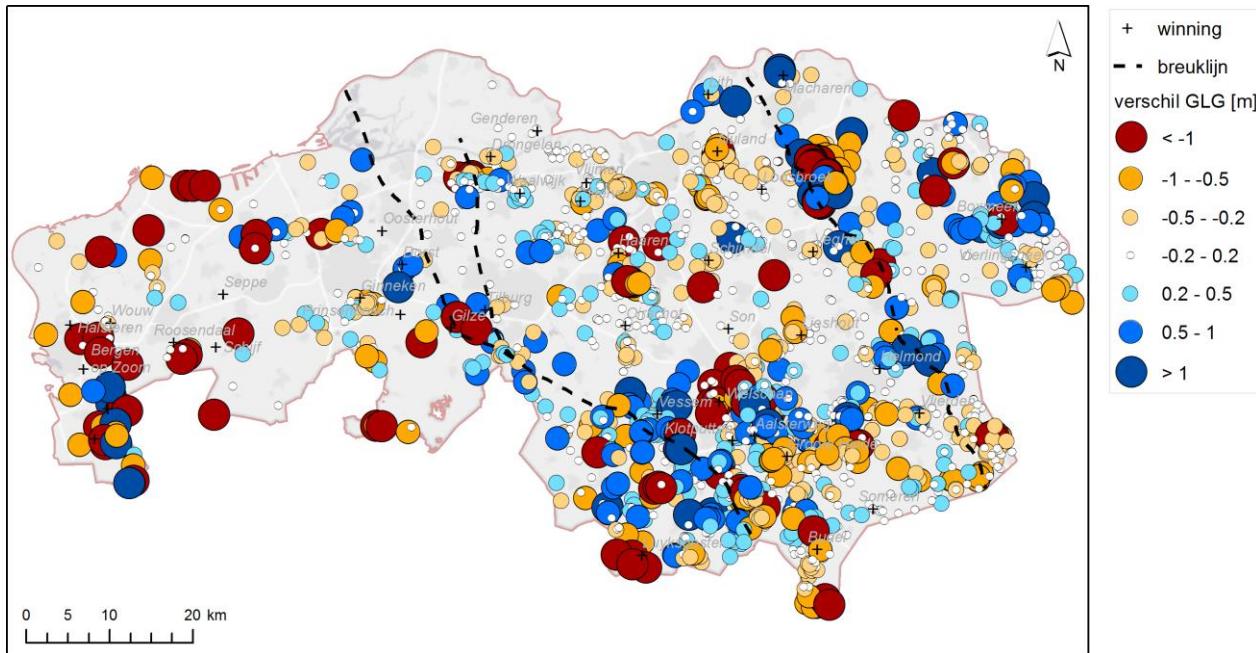
Validatie GHG, GLG en gemiddelde dynamiek

Het grondwatermodel is gevalideerd voor de gemeten en berekende GHG, GLG en gemiddelde dynamiek in de periode 2009 - 2016. Deze waarden zijn afgeleid voor de bovenste vier modellagen (het freatische grondwatersysteem). Er is gebruik gemaakt van de kwantielbenadering die eerder is toegelicht in paragraaf 7.3. De dynamiek is gedefinieerd als het verschil tussen GLG en GHG, gemiddeld over de jaren 2009 – 2016. Per jaar is de berekende GHG en GLG uitgerekend en vervolgens gemiddeld. Met een vergelijking van de gemeten en gemodelleerde dynamiek kan worden geconcludeerd of de amplitude in grondwaterstanden binnen een jaar goed worden benaderd.

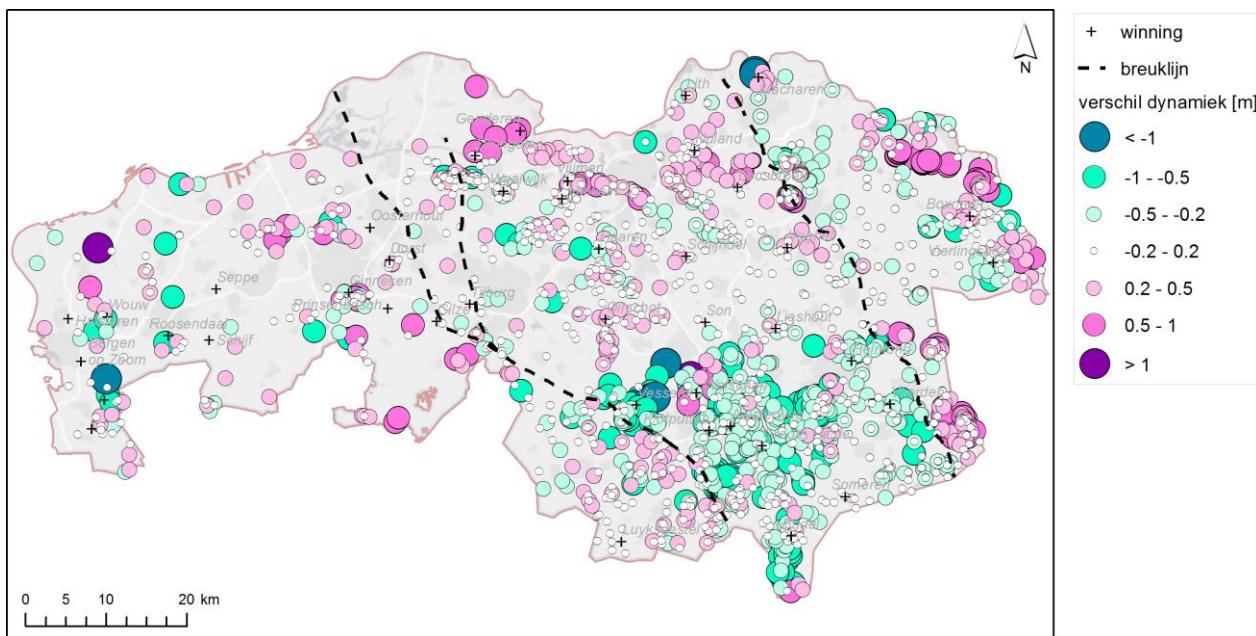
Over de gehele provincie komen afwijkingen voor in de GHG (Figuur 8-10). In West-Brabant, rondom Roosendaal en de Brabantse Wal en ten zuiden van Eindhoven wordt de GHG voornamelijk onderschat; ten westen van de Feldbiss en Gilze-Rijen breuk overschat. In de Centrale Slenk wordt de GHG voornamelijk onderschat. Op de Peelhorst zijn rond Gemert, Helmond en Boxmeer grote afwijkingen zichtbaar. In de afwijkingen in de GLG zijn dezelfde gebieden te zien waar afwijkingen tussen berekening en meting voorkomen (Figuur 8-11), hoewel de afwijkingen in de GLG gemiddeld kleiner zijn. De dynamiek (GHG – GLG) wordt bij de meeste peilbuizen met minder dan 20 cm afwijking benaderd. In de Centrale Slenk ten zuiden van Eindhoven wordt de dynamiek onderschat (Figuur 8-13).



Figuur 8-10: Afwijking tussen berekende en gemeten GHG voor de periode 2009 – 2016

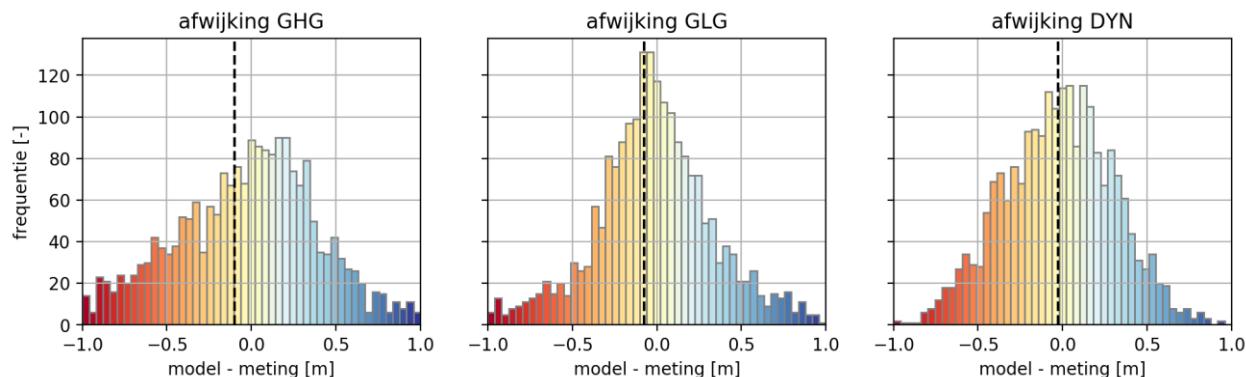


Figuur 8-11: Afwijking tussen berekende en gemeten GLG voor de periode 2009 – 2016



Figuur 8-12: Afwijking tussen berekende en gemeten dynamiek voor de periode 2009 – 2016

De geconstateerde afwijkingen tussen berekening en meting zijn samengevat in Figuur 8-13.

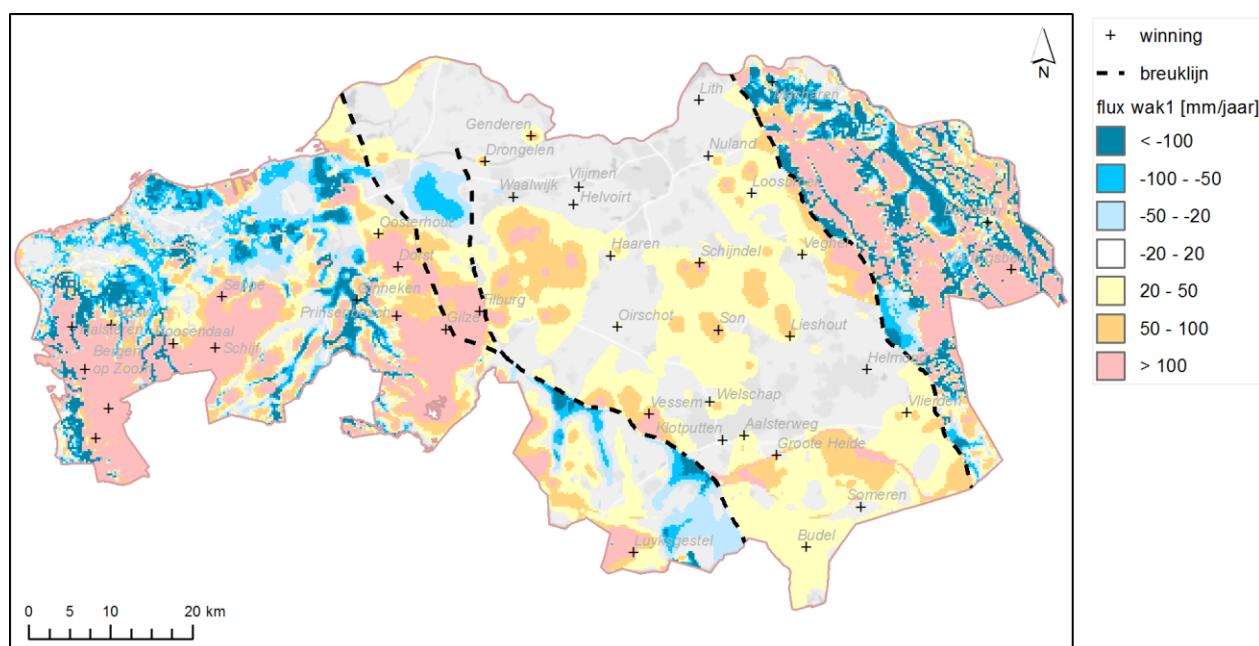


Figuur 8-13: Verdeling van afwijkingen tussen berekende en gemeten GHG, GLG en dynamiek (DYN)

8.4 Opwaartse stroming



De grootte van de berekende opwaartse stroming van het tweede naar eerste watervoerende pakket is weergegeven in Figuur 8-14. Opwaartse stroming is in blauwkleuren weergegeven. Op de "Naad van Brabant", de overgang van zand naar kleigebied slaat infiltratie vaak om in een opwaartse flux. Beekdalen en reliëfovergangen zorgen voor een opwaartse stroming van grondwater vanuit het tweede naar het eerste watervoerende pakket.



Figuur 8-14: Berekende flux van het tweede naar het eerste watervoerende pakket¹²

¹² Dit is de stroming van modellaag 5 naar modellaag 4

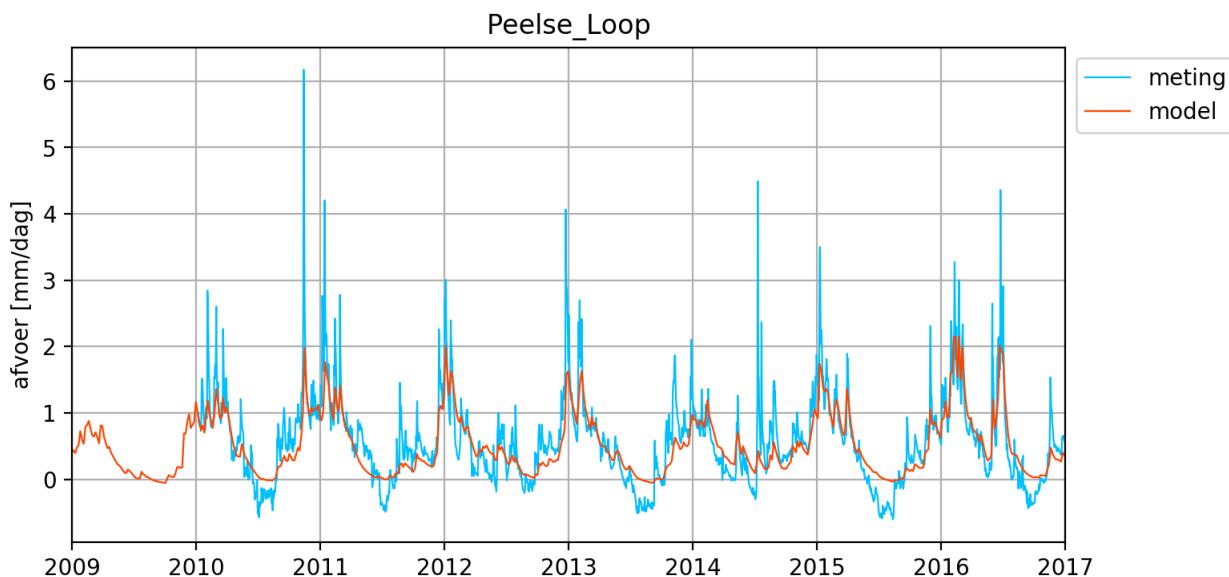
8.5 Afvoeren



Voor waterschap De Dommel (22 deelstroomgebieden) en waterschap Aa en Maas (5 deelstroomgebieden) zijn de gemeten en berekende afvoeren met elkaar vergeleken (Figuur 8-17).

De berekende afvoer in het grondwatermodel is gelijk aan het totaal afgevoerde hoeveelheid gedraaide water binnen dit deelstroomgebied. Dus al het water dat door de wateropen, greppels en buisdrainage wordt afgevoerd. De snelle afvoer in stedelijk gebied zit niet in het grondwatermodel en wordt buiten beschouwing gelaten.

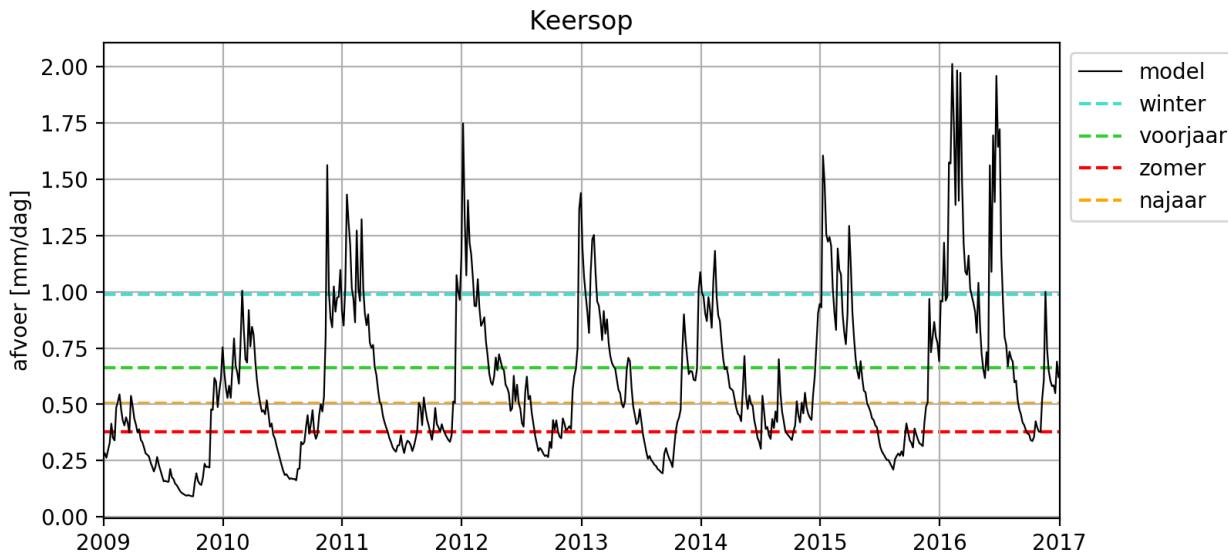
Voor waterschap Aa en Maas zijn de gemeten afvoeren aangeleverd. De afvoeren zijn per deelstroomgebied aangeleverd, door de meting op het uitstroompunt te corrigeren voor de bovenstroomse aanvoer naar het deelstroomgebied. We hebben hieruit de mediane afvoer bepaald voor de periode 2009 – 2016. Figuur 8-15 is een voorbeeld van de bepaalde afvoer in de Peelse Loop. Het grondwatermodel berekent niet de hoge pieken in afvoer, omdat de snelle afvoercomponent, zoals maaiveldafvoer, geen onderdeel is van het grondwatermodel. En het grondwatermodel berekent ook minder extreem lage afvoer, omdat geen rekening wordt gehouden met stuwebeheer, zoals waterconservering in droge tijden.



Figuur 8-15: Bepaalde afvoer in de Peelse Loop uit metingen en berekende afvoer door grondwatermodel

De gemeten afvoer van waterschap de Dommel is aangeleverd als de mediaan van de gemiddelde afvoer voor de vier seizoenen (voorjaar, zomer, najaar, winter) voor meerdere jaren. Wij hebben deze vier mediane seizoenswaarden gemiddeld tot een jaargemiddelde. De jaren waarvoor de seizoen gemiddelden bepaald zijn, verschillen van de ijkperiode (2009-2016) van het grondwatermodel. De seizoen debieten vormen de basis voor de stationaire Sobek-modellen waarvan de peilen in het nieuwe Brabantmodel zijn overgenomen.

Figuur 8-16 geeft een voorbeeld voor een meetreeks van waterschap De Dommel. De gemiddeld gemeten afvoer per seizoen is in kleur geplot. Het gemiddelde van deze vier waarden ligt in de buurt van de gemeten voorjaarsafvoer. Deze waarde is vergeleken met de gemiddeld berekende afvoer door het grondwatermodel.



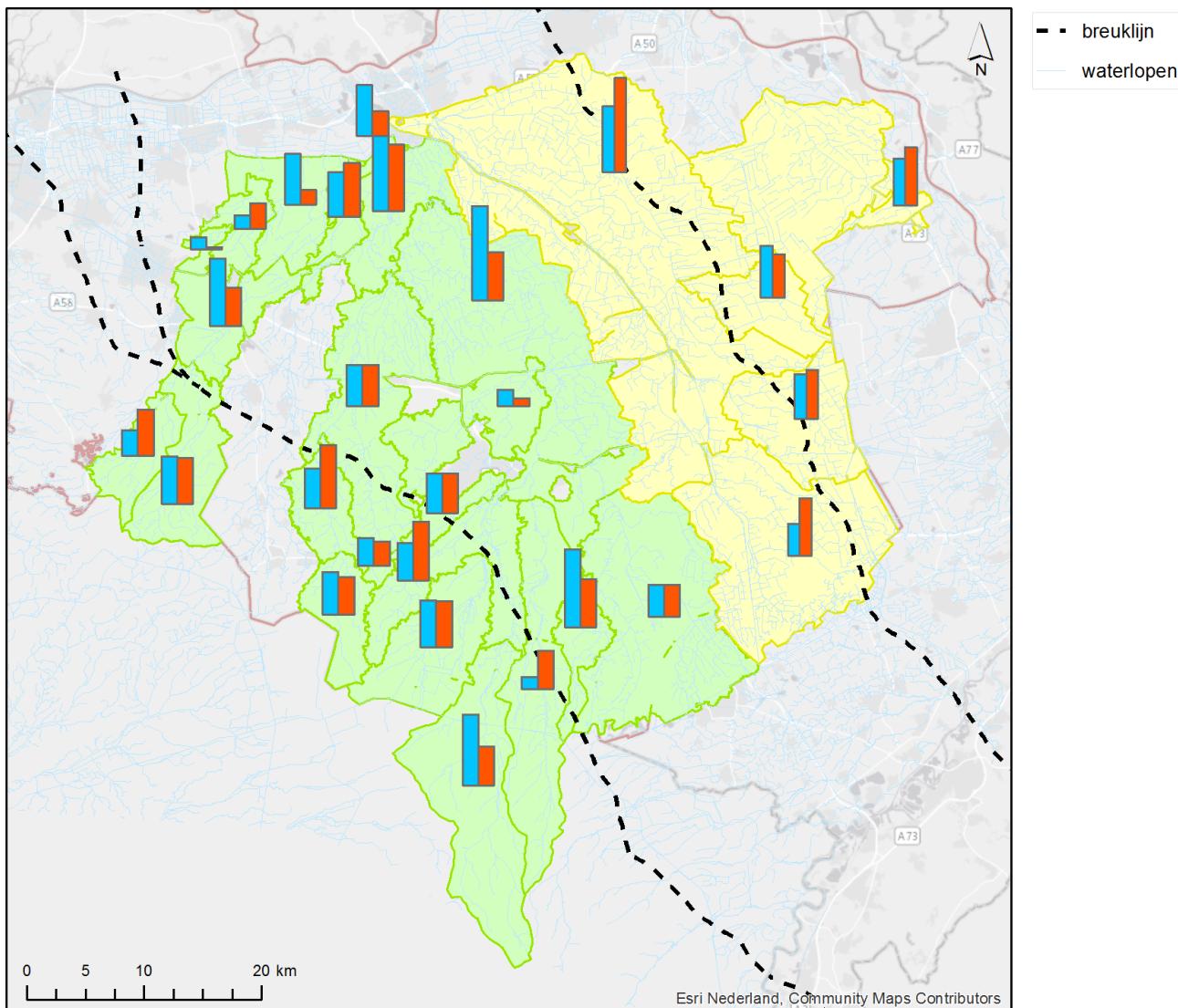
Figuur 8-16: Gemeten afvoer in de Keersop en berekende afvoer door grondwatermodel

Bij de validatie moet rekening worden gehouden dat het grondwatermodel geen rekening houdt met:

- Aanvoer door het bovenstroomse oppervlaktewatersysteem.
- Lozing van effluent door RWZI-installaties.
- Ingrepen in het oppervlaktewatersysteem zoals stuwebeheer.
- Snelle oppervlakkige afvoer over maaiveld.

Daarnaast zitten er in de gemeten debieten on nauwkeurigheden en mogelijk fouten. De vergelijking moet daarom gebruikt worden of de orde van grootte van berekende en gemeten afvoer met elkaar overeenkomen. Voor sommige deelstroomgebieden kloppen de gemeten en berekende debieten precies met elkaar (Figuur 8-17); in andere gevallen kan er een afwijking van een factor twee voorkomen. Er is niet sprake van een systematische afwijking; soms is de berekening hoger dan de meting, maar soms lager dan de meting.

De vergelijking geeft daarom vertrouwen in de modelopzet en de gehanteerde grondwaternaauvulling. Het wil niet zeggen dat het model niet beter gemaakt kan worden. Met nieuwe inzichten in de grondwaternaauvulling en betere en langere meetreeksen kan de analyse in de toekomst opnieuw gemaakt worden. Ook aanpassing van de doorlatendheden en weerstanden van doorsneden pakketten of drainageweerstanden zal tot andere resultaten leiden.

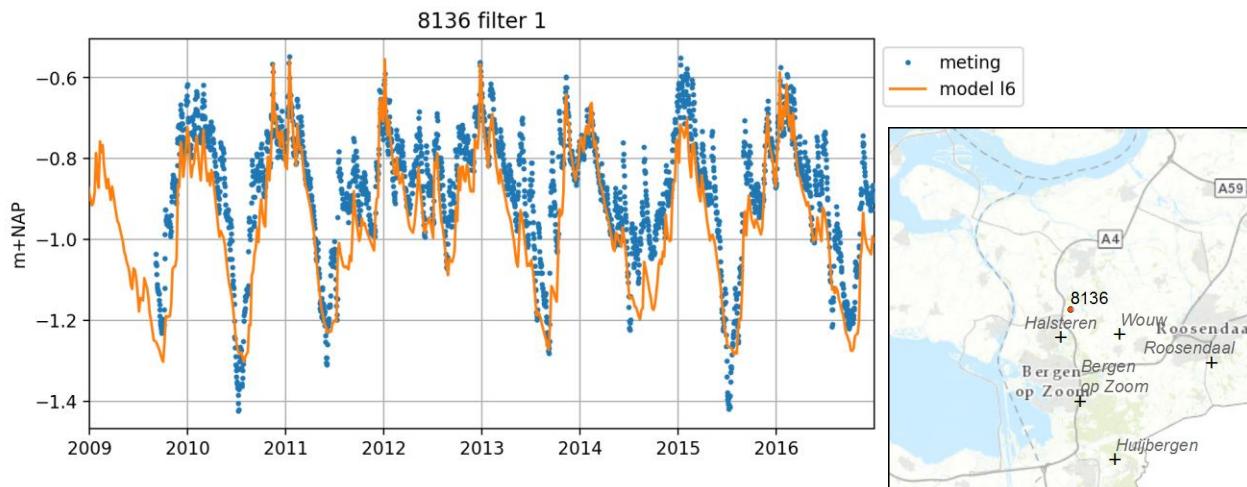


Figuur 8-17: Vergelijking tussen mediane afvoer gemeten (blauw) en stationair berekende afvoer door grondwatermodel (oranje)

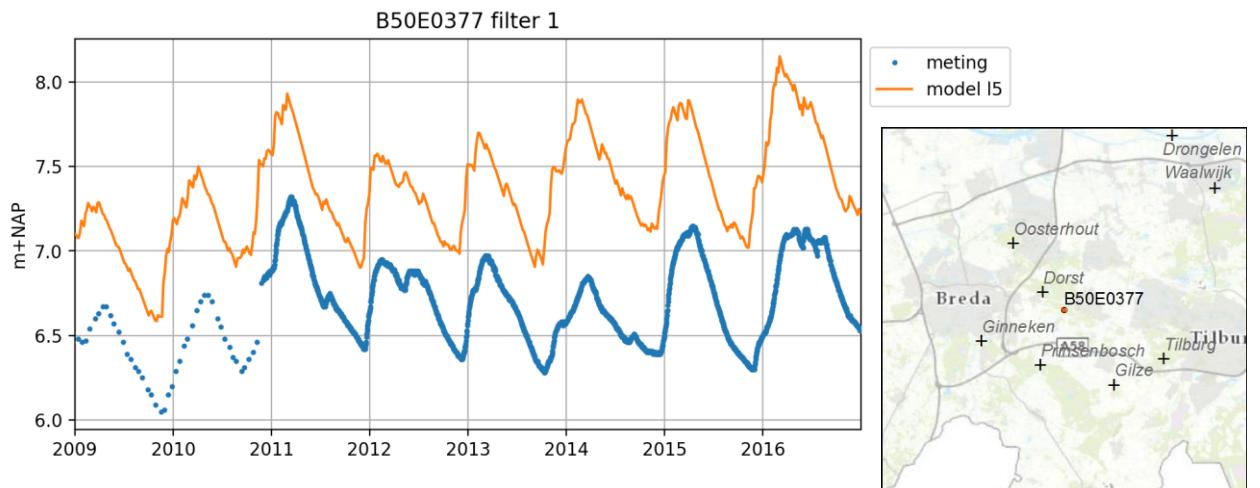
8.6 Tijdreeksen

Er zijn willekeurig vier peilbuizen geselecteerd verdeeld over de deelgebieden West-Brabant, Kempisch plateau en Peelhorst (Figuur 8-18 t/m Figuur 8-21). De voorbeelden zijn niet zo zeer illustratief voor de deelgebieden maar zijn meer voorbeelden voor verschillende type geconstateerde afwijkingen tussen metingen en berekeningen. Andere tijdreeksen zijn beschikbaar op de modellenserver.

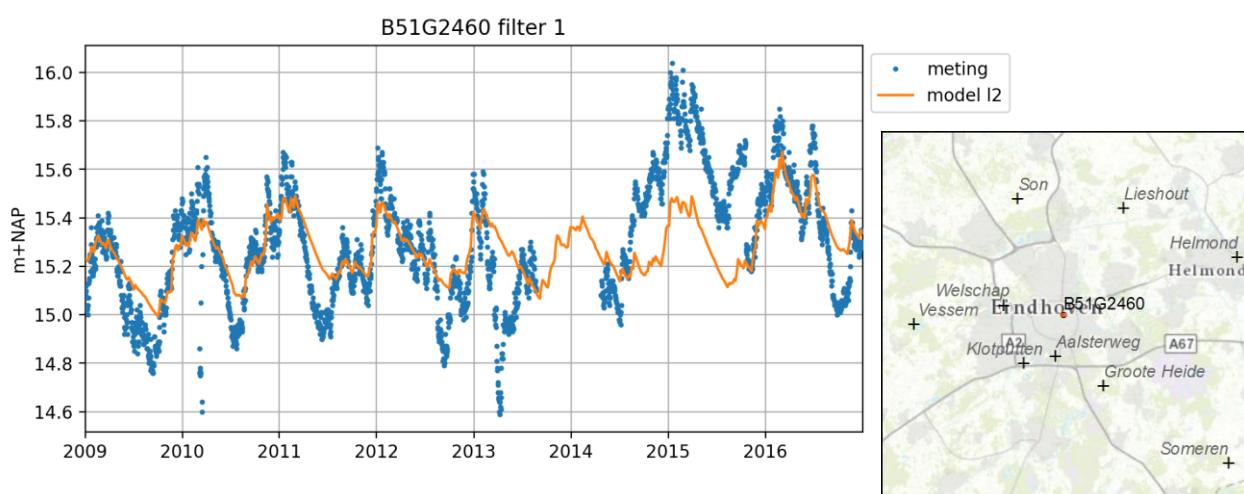
- Bij peilbuis 8136 (Figuur 8-18) in West-Brabant ten noorden van Bergen op Zoom worden de GHG, GLG en de dynamiek goed benaderd.
- Bij peilbuis B50E0377 (Figuur 8-19) tussen Breda en Tilburg worden zowel de GHG als de GLG circa 1 meter overschat. De dynamiek wordt echter goed benaderd. Zowel metingen als model laten zien dat het natter wordt in de tijd.
- Bij peilbuis B51G2460 (Figuur 8-20) bij Eindhoven wordt de dynamiek onderschat, zoals ook het geval is bij een groot aantal ondiepe buizen in dit gebied. De sterke verhoging in grondwaterstand in begin 2015 wordt bijvoorbeeld gemist. Er komen soms scherpe dalingen in grondwaterstand voor die niet worden berekend.
- Bij peilbuis TONG005 (Figuur 8-21) worden de GHG en de GLG goed benaderd. In de zomer van 2012 en 2013 zakt de grondwaterstand minder weg dan wordt berekend. In andere zomers klopt het beeld wel goed.



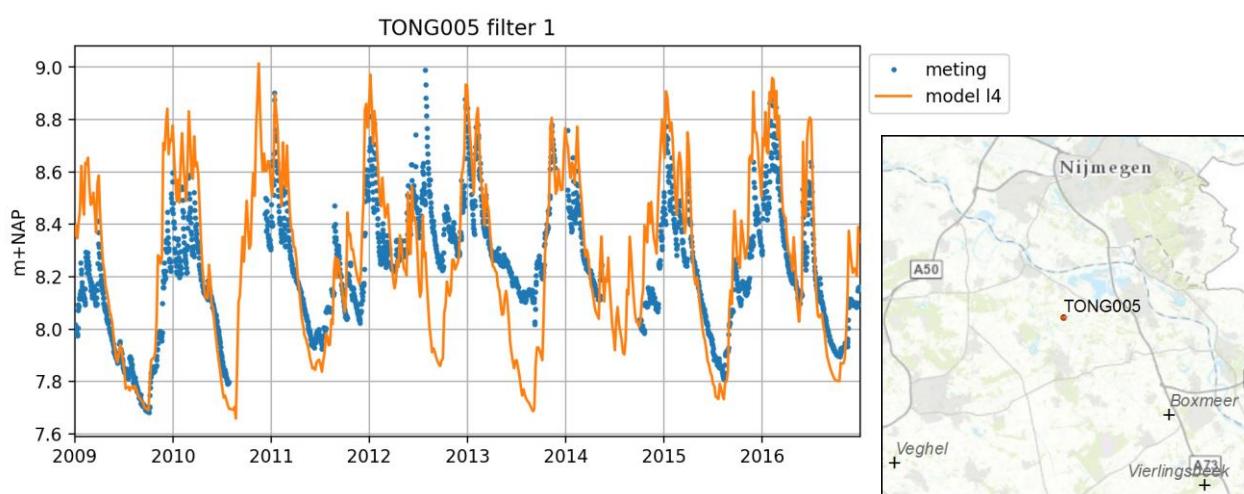
Figuur 8-18: Berekende en gemeten grondwaterstand in peilbuis 8136 filter 1



Figuur 8-19: Berekende en gemeten grondwaterstand in peilbuis B50E0377 filter 1



Figuur 8-20: Berekende en gemeten grondwaterstand in peilbuis B51G2460 filter 1



Figuur 8-21: Berekende en gemeten grondwaterstand in peilbuis TONG005 filter 1

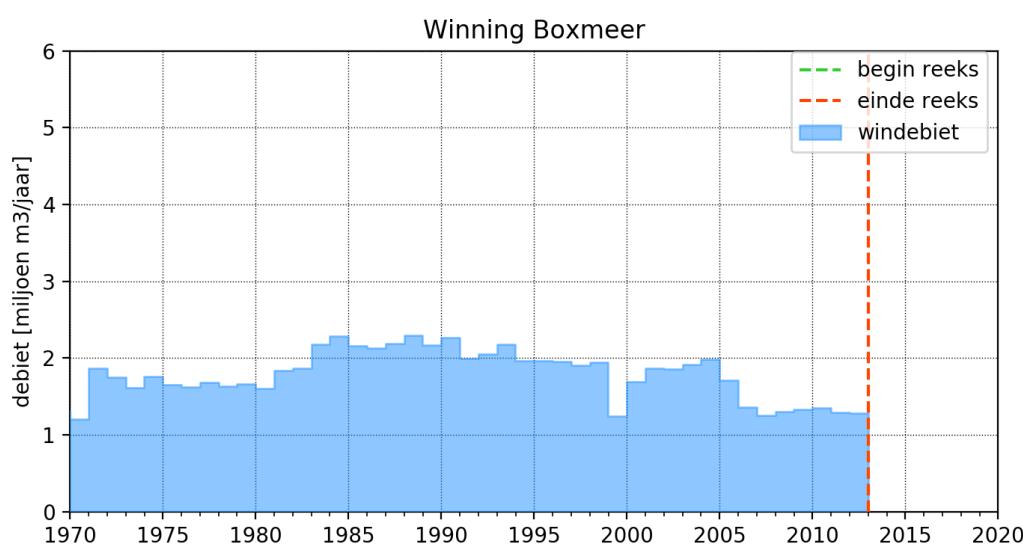
8.7 Grondwaterreeksen rond grondwaterwinningen



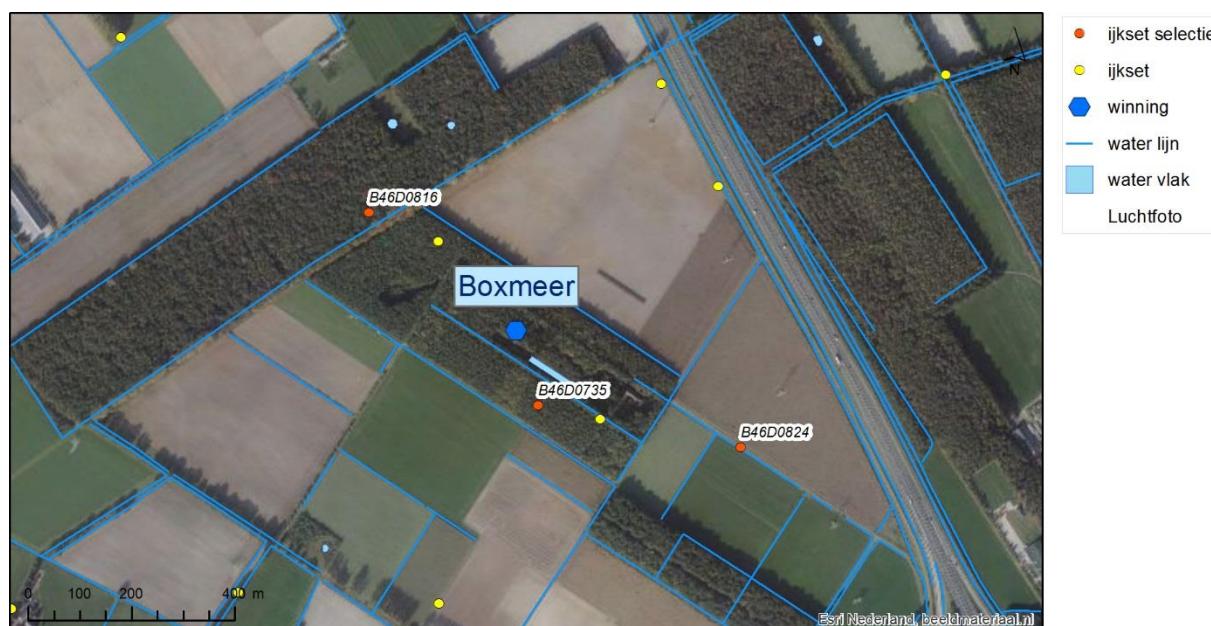
In deze paragraaf zijn vergelijkbaar met paragraaf 8.6 de gemeten grondwaterstanden vergeleken met de gemodelleerde grondwaterstand. Er is beoordeeld hoe veranderingen in windebiet van drie grondwaterwinningen reageren op de grondwaterstand en stijghoogte. De berekeningen en metingen voor de omgeving rond drie winstations zijn met elkaar vergeleken: Boxmeer, Vierlingsbeek en Budel. De eerste twee winningen liggen op de Peelhorst en zijn gestopt. De winning van Budel is verdiept. Om de veranderingen in de tijd te kunnen begrijpen wordt per winning toegelicht waar de peilbuizen staan en hoe de debieten in de tijd veranderd zijn.

Boxmeer

De grondwaterwinning in Boxmeer is eind 2012 stopgezet (Figuur 8-22).



Figuur 8-22: Gemiddeld jaarlijkse hoeveelheid onttrokken grondwater op winlocatie Boxmeer

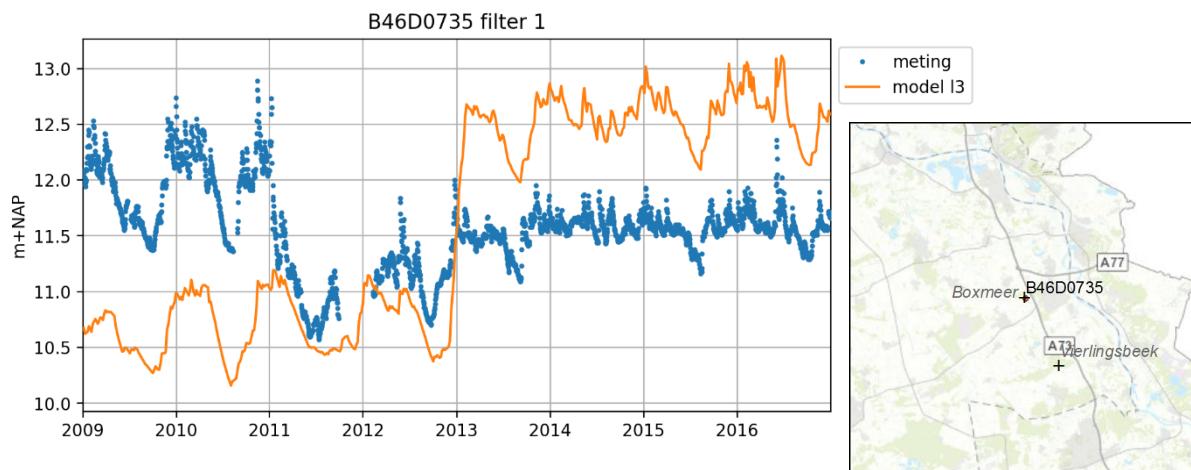


Figuur 8-23: Ligging van de peilbuizen rond winning Boxmeer

Rond de winning Boxmeer liggen verschillende peilbuizen. Voor de validatie zijn drie freatische filters gekozen die op ongeveer 10 meter onder maaiveld geplaatst zijn (Figuur 8-23 en Tabel 8-1). Te zien is dat de peilbuizen relatief dicht in de buurt van oppervlaktewater liggen.

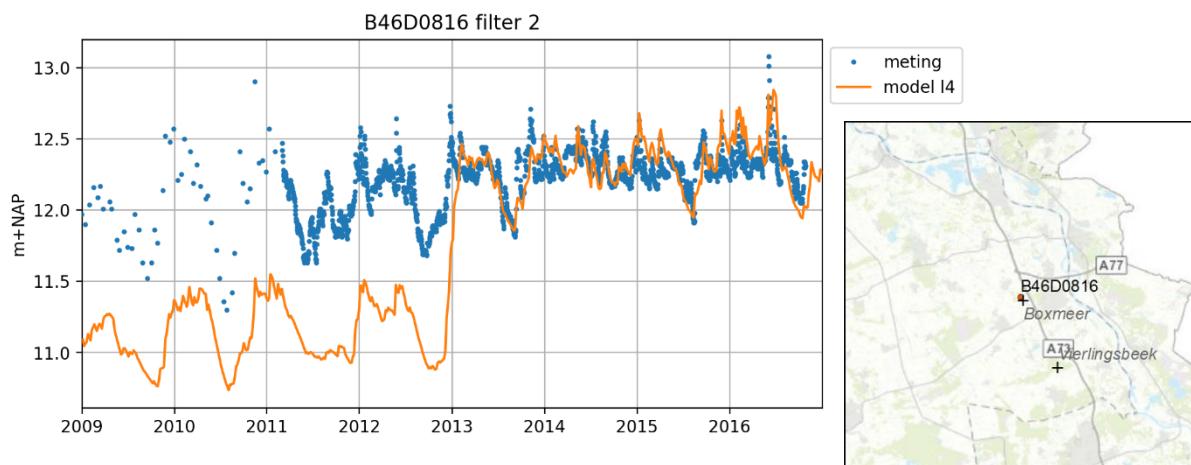
Tabel 8-1: Kenmerken van de peilbuizen gebruikt voor de validatie winning Boxmeer

Naam peilbuis	Filternr.	Maaiveld	Bovenkant Filter [M+Nap]	Onderkant Filter [M+Nap]	Laagnr. [-]
B46D0735	1	13.1	11.1	10.1	3
B46D0816	2	13.1	7.0	6.0	4
B46D0824	1	13.4	11.7	10.7	3



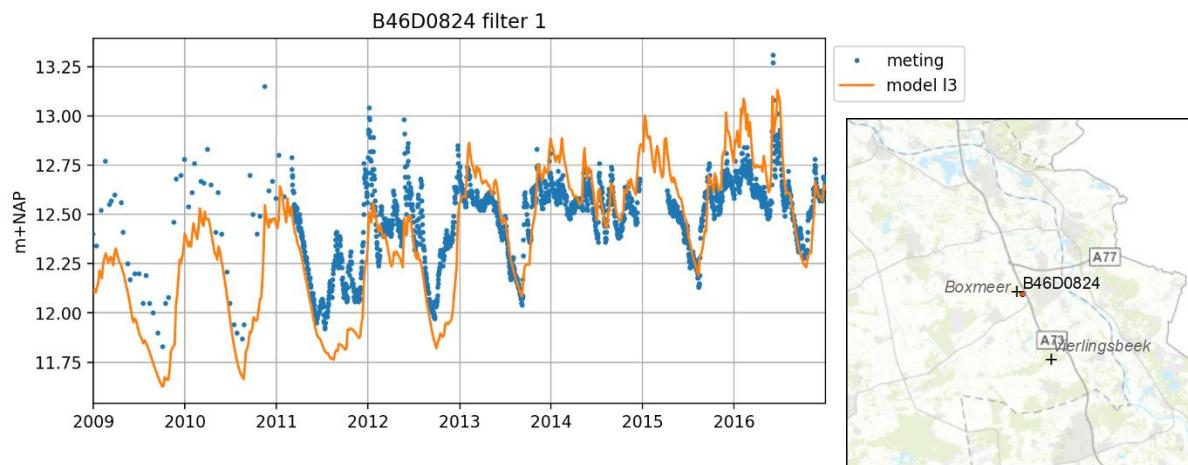
Figuur 8-24: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbuis B46D0735 filter 1 (bij winning Boxmeer)

Voor peilbuis B46D0735 filter 1 (figuur 8.24) wordt een stijging in grondwaterstand berekend van ongeveer 2 meter na het stopzetten van de winning. Uit de metingen blijkt het tegenovergestelde; de grondwaterstand daalt in de jaren voorafgaand van het stopzetten van de winning (2011 en 2012). Mogelijk is dit veroorzaakt door het nemen van maatregelen om vernatting te voorkomen. Deze maatregelen zijn niet opgenomen in het Brabantmodel. Voor dergelijke detailanalyses is dus meer lokale kennis nodig om goed te kunnen begrijpen wat er gebeurt.



Figuur 8-25: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbuis B46D0816 filter 2 (bij winning Boxmeer)

Voor peilbuis B46D0816 filter 2 wordt de grondwaterstand voor het stopzetten van de winning onderschat. Daarna komt de berekende en gemeten grondwaterstand goed overeen (Figuur 8-25). Waarschijnlijk staat het peilbuisfilter niet in contact met het watervoerend pakket, terwijl dit in het model wel wordt verondersteld.

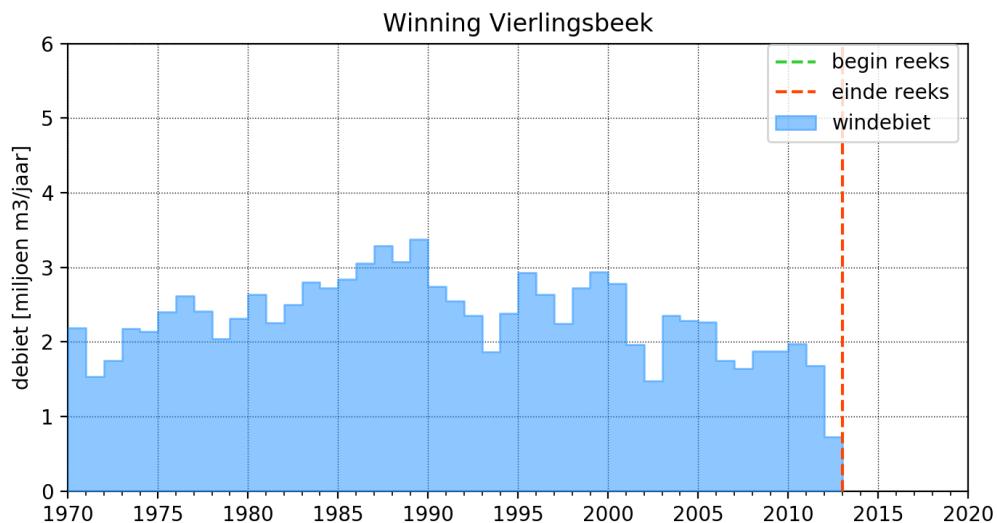


Figuur 8-26: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbuis B46D0824 filter 1 (bij winning Boxmeer)

Voor peilbuis B46D0824 filter 1 komt de berekende en gemeten grondwaterstand goed overeen (Figuur 8-26) in de periode na het stopzetten van de winning. In de periode ervoor worden lagere grondwaterstanden berekend dan gemeten zijn. De gemeten grondwaterstanden worden afgetopt op een niveau van ongeveer NAP +12,7 meter. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door aanleg van drainage die vernatting moet voorkomen. Het maaiveld ligt namelijk 70 centimeter hoger dan dit niveau. Lokale drainagemiddelen zijn niet in het grondwatermodel opgenomen.

Vierlingsbeek

De grondwaterwinning in Vierlingsbeek is eind 2012 stopgezet (Figuur 8-27).



Figuur 8-27: Gemiddeld jaarlijkse hoeveelheid onttrokken grondwater op winlocatie Vierlingsbeek



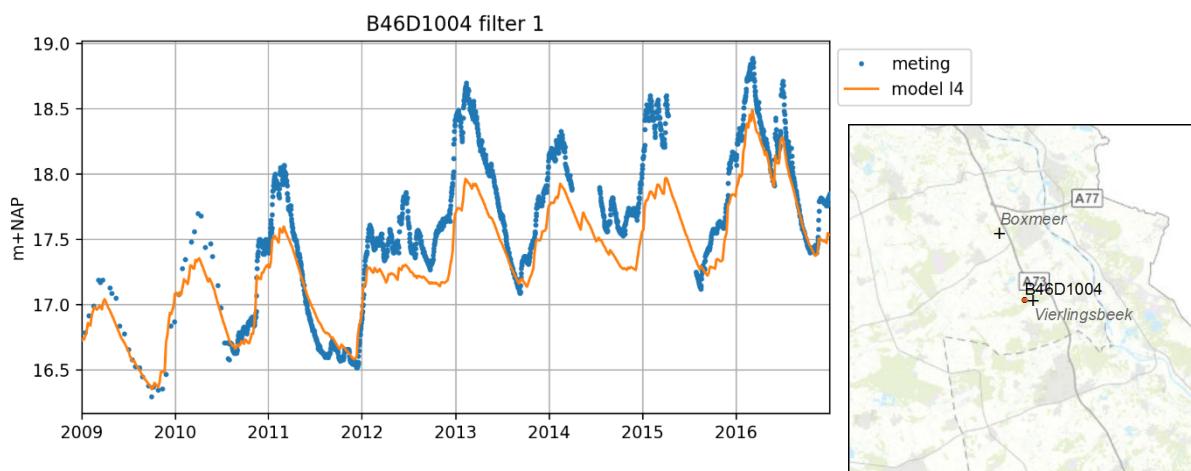
Figuur 8-28: Ligging van de peilbuizen rond winning Vierlingsbeek

Rond de winning Vierlingsbeek liggen verschillende peilbuizen. Voor de validatie zijn drie filters gekozen die op ongeveer 14 meter onder maaiveld geplaatst zijn (Figuur 8-28 en Tabel 8-2). De filters zijn gelegen in de Sterkselzanden.

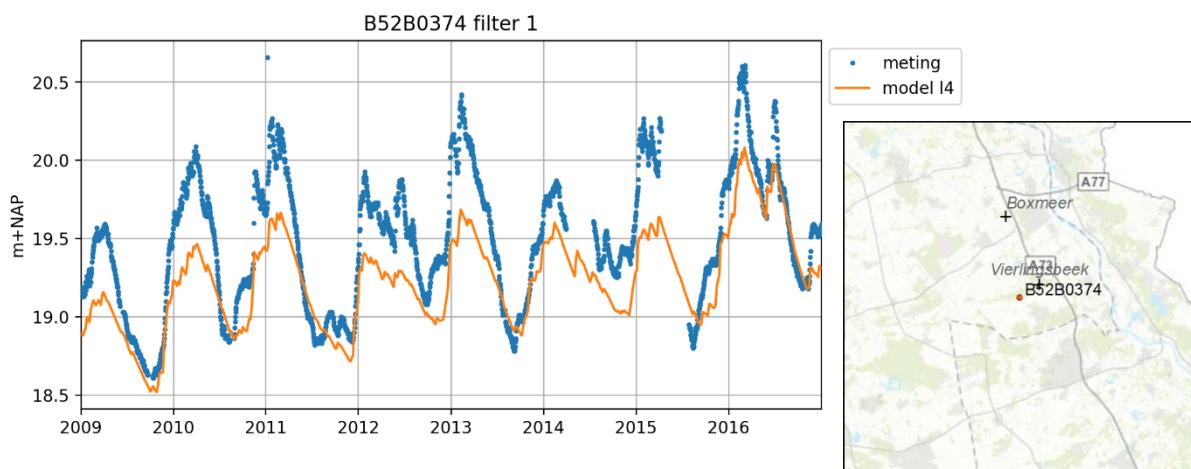
Tabel 8-2: Kenmerken van de peilbuizen gebruikt voor de validatie winning Vierlingsbeek

Peilbuis	Filternr.	Maaiveld [m+nap]	Bovenkant filter [m+nap]	Onderkant filter [m+nap]	Laagnr. [-]
B46D1004	1	19.4	16.0	15.0	4
B52B0374	1	21.4	13.7	12.7	4
B52B0389	1	20.4	14.4	13.4	4

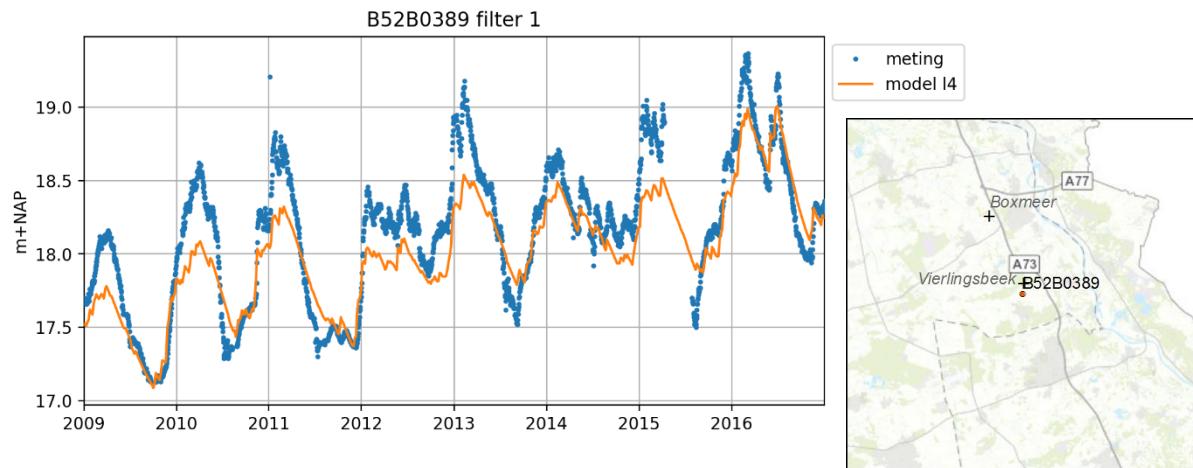
Voor alle drie de peilbuizen geldt dat het model het patroon/trend in stijghoogte goed berekend, maar dat de berekende dynamiek minder groot is dan de gemeten waarden (Figuur 8-29 tot en met Figuur 8-31). Uit de metingen blijkt dat de grondwaterstand wel 1,5 meter binnen een jaar kan variëren; in de berekeningen blijft dit beperkt tot ongeveer 1 meter. De mate van reactie op het stopzetten van de winning is in de berekeningen is ook minder groot dan uit de metingen blijkt.



Figuur 8-29: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbuis B46D1004 filter 1



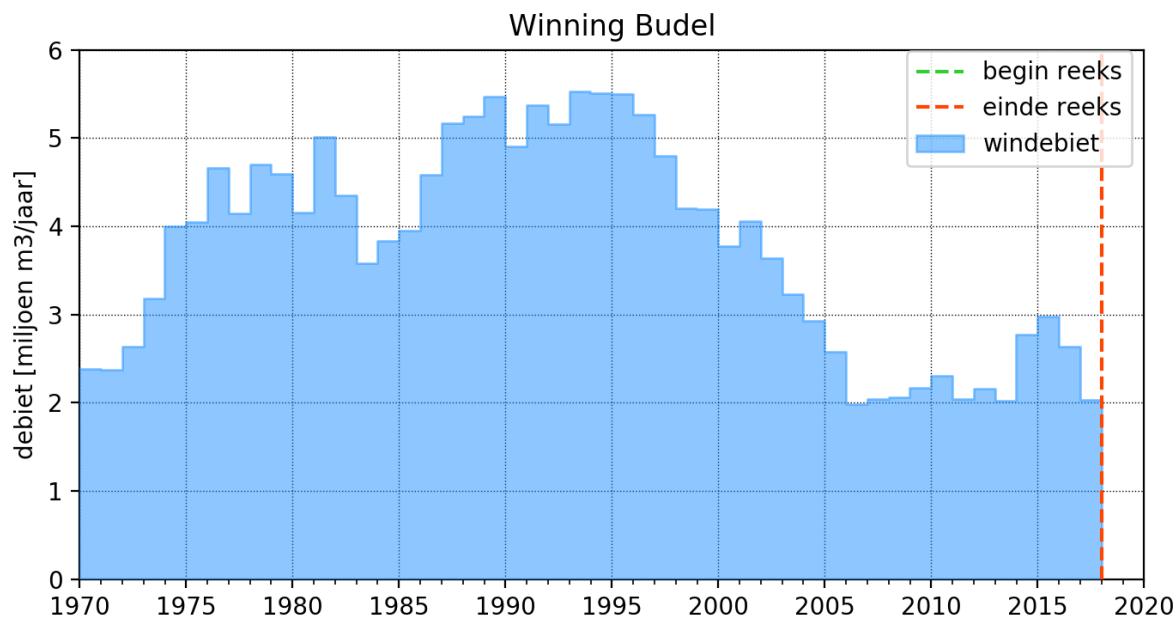
Figuur 8-30: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbuis B52B0374 filter 1



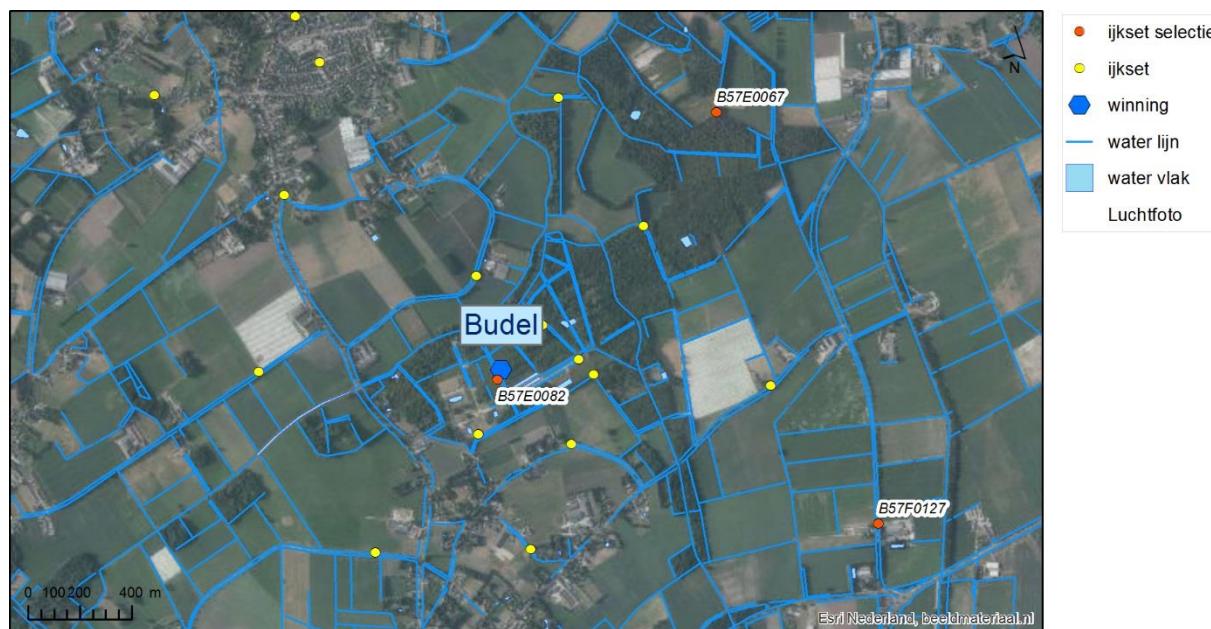
Figuur 8-31: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbuis B52B0389 filter 1

Budel

De grondwaterwinning in Budel is tussen 2012 en 2014 verdiept (Figuur 8-32).



Figuur 8-32: Gemiddeld jaarlijkse hoeveelheid onttrokken ondiep grondwater op winlocatie Budel



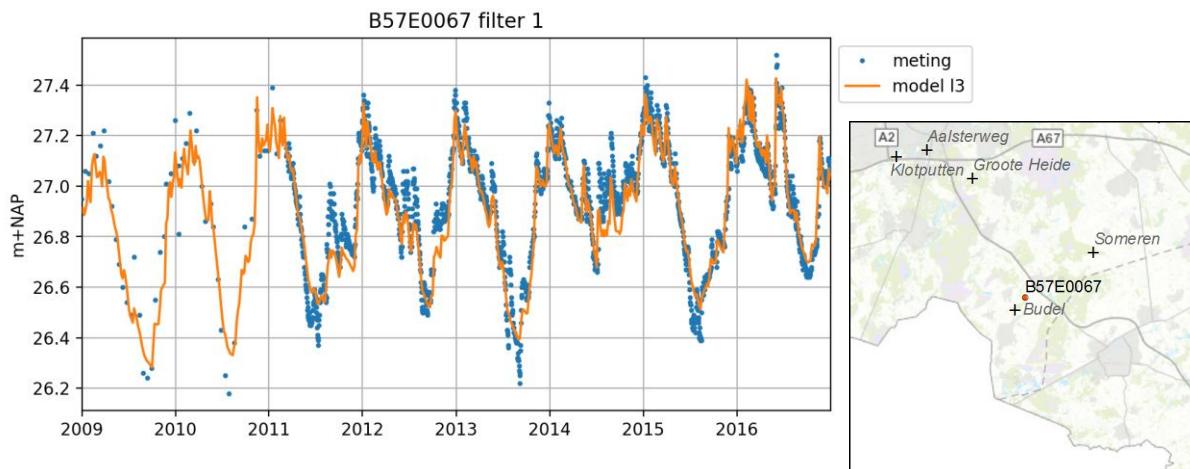
Figuur 8-33: Ligging van de peilbuizen rond winning Budel

Rond de winning Budel liggen verschillende peilbuizen (Figuur 8-33). Voor de validatie zijn vijf peilfilters gekozen. Drie filters liggen ongeveer 5 meter diep en meten de freatische grondwaterstand in de Boxtelzanden. Peilbus B57E0082 heeft meerdere filters; van deze peilbus zijn ook twee diepere filters geselecteerd (meer dan 125 meter diep) die de stijghoogte meten op de diepte van onttrekking van het diepe grondwater (Tabel 8-3). Deze peilbus ligt vlak naast de waterwinning. Ten noordoosten van de waterwinning ligt de Buulderbroek, een natte natuurparel, waar maatregelen tegen verdroging werden uitgevoerd.

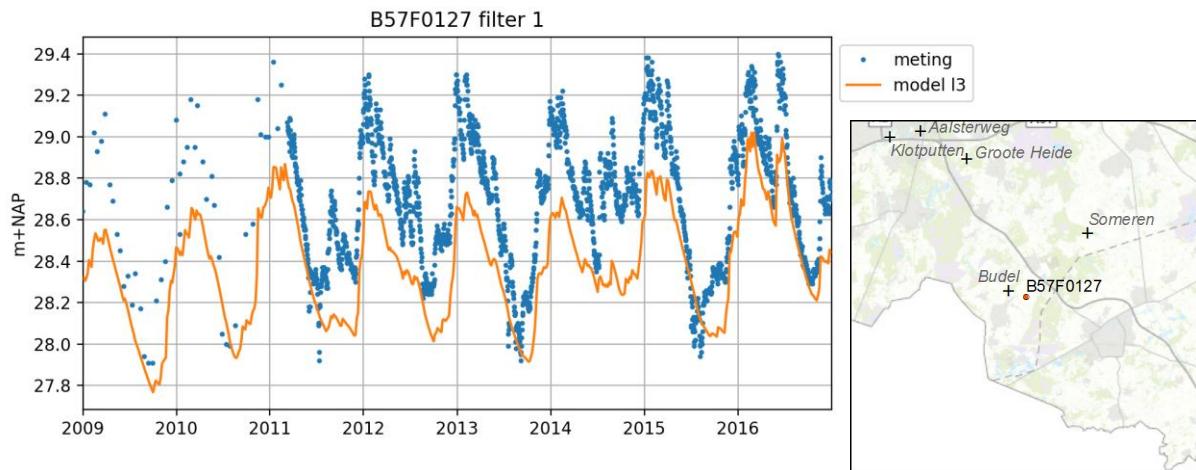
Tabel 8-3: Kenmerken van de peilbuizen gebruikt voor de validatie winning Budel

Peilbus	Filternr.	Maaiveld [m+NAP]	Bovenkant filter [m+NAP]	Onderkant filter [m+NAP]	Laagnr. [-]
B57E0067	1	28.2	24.1	23.1	3
B57E0082	1	28.0	22.0	21.0	3
B57E0082	4	28.0	-100.7	-102.7	8
B57E0082	5	28.0	-163.0	-165.0	15
B57F0127	1	30.3	26.2	24.2	3

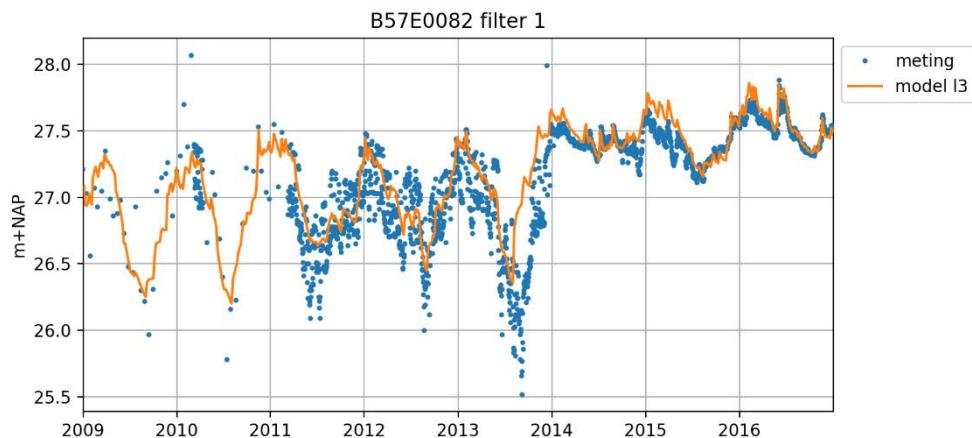
Door het verdiepen van de winning Budel wordt minder grondwater ondiep onttrokken en zal de grondwaterstand stijgen. Dit effect is echter maar beperkt en moeilijk zichtbaar in de metingen verder af van de winning (Figuur 8-34 tot en met Figuur 8-35). De berekende waarden volgen goed het patroon van de gemeten waarden in peilbus B57E0067 (Figuur 8-34). In B57F0127 (Figuur 8-35), ten oosten van de winning, wordt de dynamiek onderschat. In beide filters is een licht stijgende trend zichtbaar. Het freatische filter in de directe omgeving van de winning (Figuur 8-36) reageert duidelijk op het stopzetten van de winning. De stijging die het model berekent komt goed overeen met de metingen.



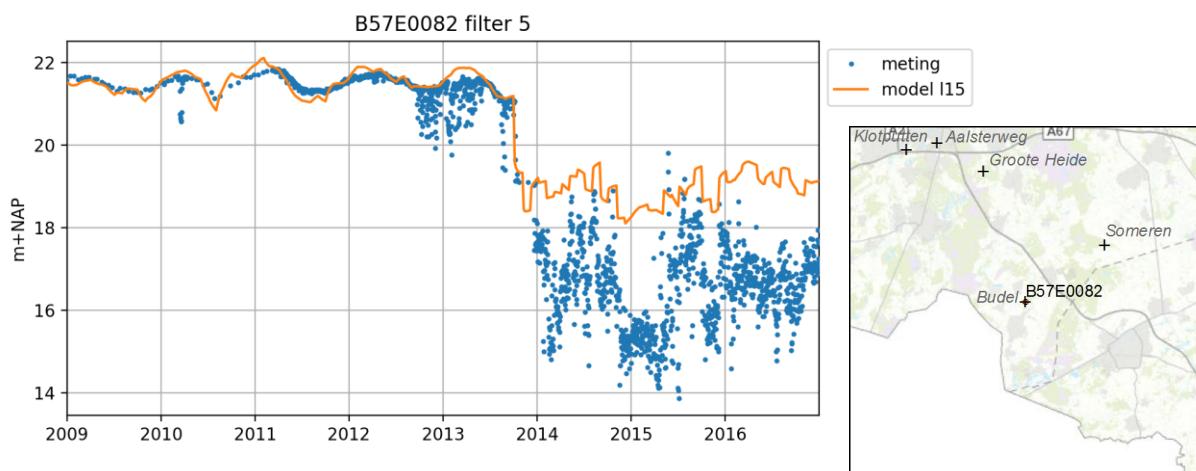
Figuur 8-34: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbus B57E0067 filter 1



Figuur 8-35: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbuis B57F0127 filter 1

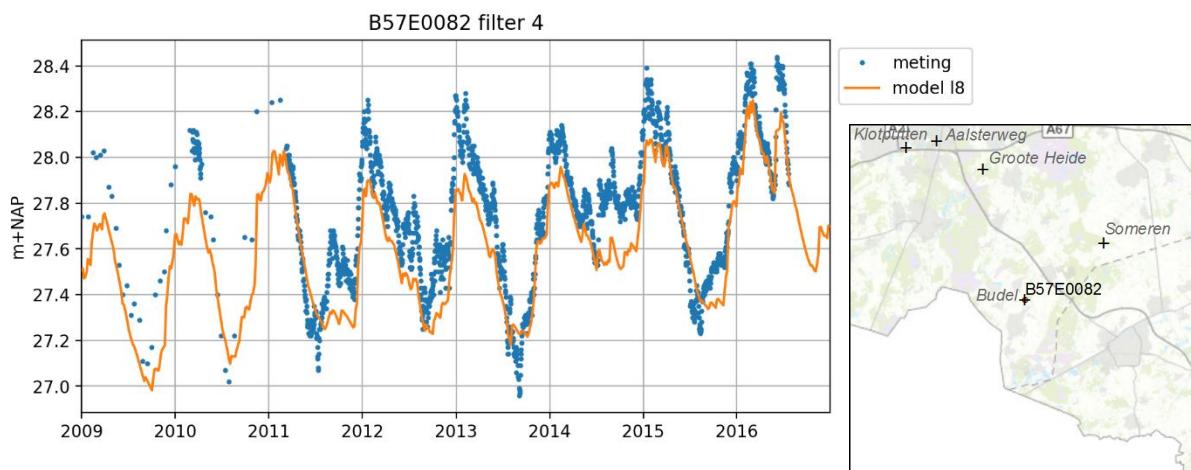


Figuur 8-36: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbuis B57E0082 filter 1



Figuur 8-37: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbuis B57E0082 filter 5

De winning Budel is verdiept tot in het diepe pakket (modellaag 15) van de Kiezeloöliet Formatie. Het meetfilter B57E0082 filter 5 bevindt zich vlakbij een pompput die vanaf eind 2013 actief is. De berekende stijghoogte past voor 2013 goed op de gemeten waarden (Figuur 8-36). Daarna is de berekende verlaging kleiner dan de gemeten verlaging. Deze afwijking kan veroorzaakt zijn door de schaalgroottes van het model. Met een modelgrid van 250 meter is het niet mogelijk om de afpompingskegel nauwkeurig te berekenen. Het model rekent met een gemiddeld debiet per maand. Zoals te zien in de metingen varieert het pompdebiet binnen de maand aanzienlijk.



Figuur 8-38: Berekende en gemeten grondwaterstand van peilbuis B57E0082 filter 4

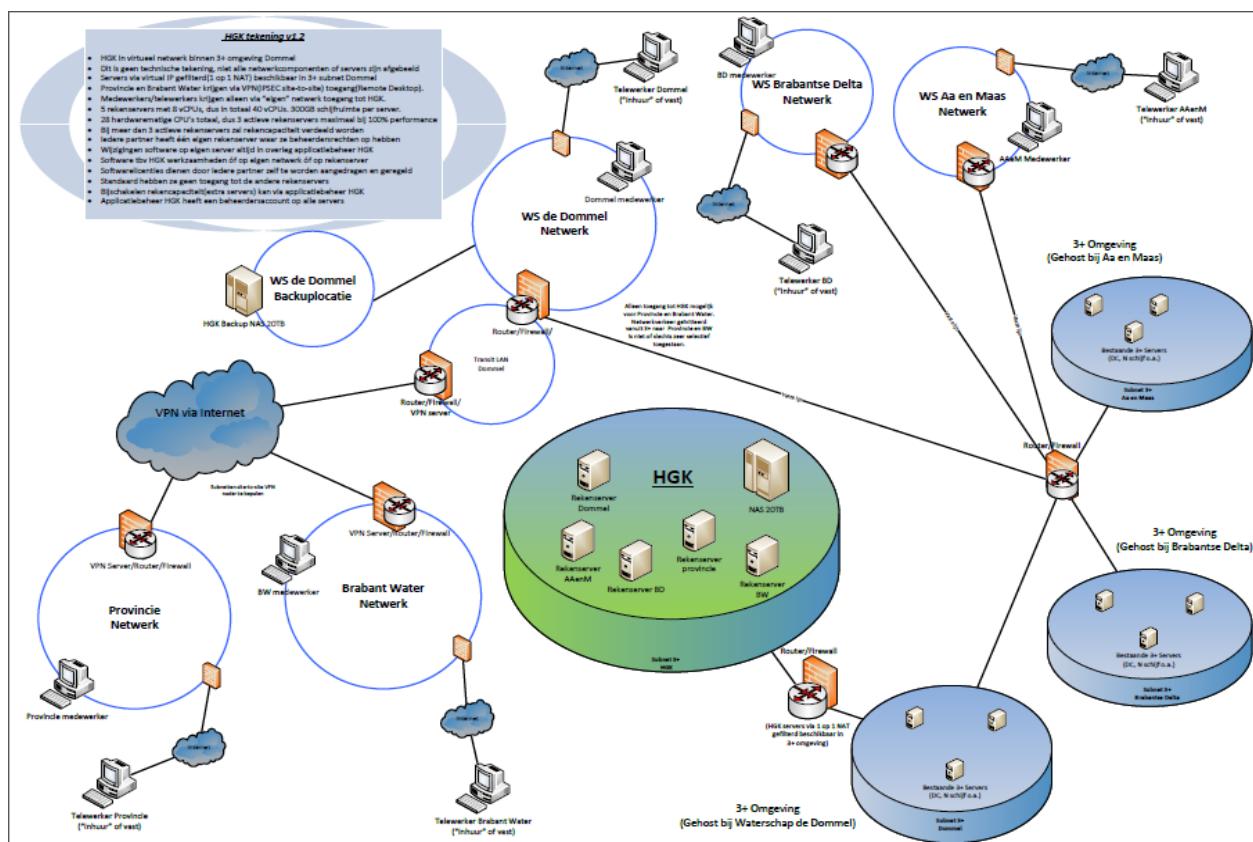
Peilbuis B57E0082 filter 4 bevindt zich boven Waalre klei 1 in de Waalrezanden. Te zien is (Figuur 8-38) dat er veel minder reactie is in berekende en gemeten stijghoogten ten gevolge van de verdiepte winning. De gemeten dynamiek wordt door het model onderschat.

9 Ontsluiting

Dit hoofdstuk beschrijft hoe het model de achterliggende data toegankelijk is gemaakt op de HGK-server (paragraaf 9.1), wat de toepassingsmogelijkheden en onmogelijkheden van het model zijn (paragraaf 9.2) en wat de ruimtelijke en temporele verschillen zijn waar rekening mee moet worden gehouden (paragraaf 9.3).

9.1 Opzet, toegang en werkwijze van de HGK-server

Het BrabantModel2018 is ontsloten op de HGK-server, die wordt gehost op het kantoor van waterschap De Dommel in Boxtel. De vijf eigenaren van het Brabantmodel (provincie Noord-Brabant, Brabant Water en de waterschappen Aa en Maas, De Dommel en Brabantse Delta hebben toegang tot deze server (Figuur 9-1). Ook andere partijen, zoals adviesbureaus, kunnen toegang krijgen tot deze server via een inlognaam en wachtwoord van één van de aangesloten waterpartners.



Figuur 9-1: Plaats van de HGK-server en verbinding met de netwerken van de HGK-partners

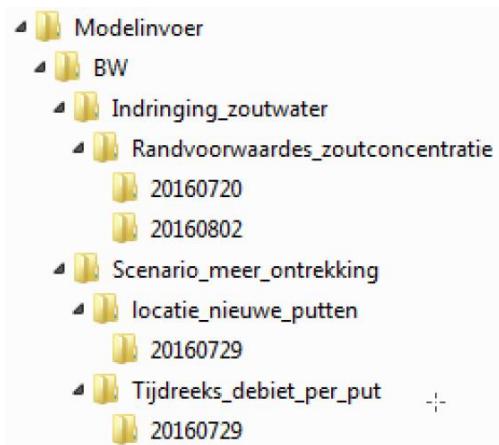
Deze omgeving is zo ingericht om gezamenlijk toegang te hebben tot dezelfde data en modellen. De HGK-server biedt de mogelijkheid aan de 5 partijen om grondwatermodelberekeningen uit te voeren met het BrabantModel2018 en afgeleiden daarvan.

De volgende gegevens zijn ontsloten op de HGK-server:

- BrabantModel2018 (voor de gehele provincie). Deze map heeft alleen leesrechten en mag niet aangepast worden.
- Brondaten voor het BrabantModel2018. Dit is data die per aangeleverde datum wordt opgeslagen. Brondaten mogen niet aangepast worden.
- Meetdata van debieten, grondwaterstanden, stijghoogten waarop het model gejikt en gevalideerd is.

- Bewerkte (bron)data voor het BrabantModel2018. Per gebruiker is er een map die voor de eigen modellen wordt gebruikt. Deze mappen worden per datum opgeslagen.
- (Python)scripts voor het bewerken en opbouwen van het BrabantModel2018.
- Modelresultaat. In deze map staat per gebruiker het berekeningsresultaat uitgesplitst naar grondwater en oppervlaktewater. Er is een aparte map voor het gehele Brabantmodel.

De server is aangesloten op een externe harde schijf (18 TB) voorzien van een netwerkfunctionaliteit. Dit wordt de NAS (Network Attached Storage) genoemd. Op deze NAS staan de bovengenoemde gegevens. De vijf partijen kunnen hun eigen modelinvoer en modeluitvoer op de server zetten. De gegevens worden volgens een vaste structuur opgeslagen (Figuur 9-2).



Figuur 9-2: Voorbeeld van mappenstructuur per gebruiker

Om ervoor te zorgen dat de HGK een beheersbaar en onderhoudbaar platform blijft, gelden er gebruiksregels, gebruiksrechten en afspraken. Hieronder staat een aantal belangrijke afspraken:

- Elke partij heeft een 'eigen server' waarop onafhankelijk van de andere vier partijen gewerkt kan worden.
- De benodigde software kan en mag naar eigen inzicht worden geïnstalleerd op de HGK-server.
- Backups van de 'eigen server' worden één keer per week gemaakt. De backups worden maximaal twee maanden bewaard.
- Backups van de externe harde schijf worden elke dag gemaakt. De verwachting is dat er gemakkelijk twee maanden terug kan worden gegaan. Dit is echter afhankelijk van de hoeveelheid aanpassingen aan de inhoud van de externe harde schijf.

Elke eerste woensdag van de maand worden de Windows-updates op de server geïnstalleerd. De server wordt dan opnieuw opgestart. Lopende berekeningen worden dan afgebroken. Hiermee dient rekening gehouden te worden. Wanneer tijdig wordt aangegeven dat het wenselijk is om de updates uit te stellen kan dit worden aangegeven bij de functioneel beheerder van de server. Deze persoon geeft dit dan door aan de betreffende medewerker bij ICT. De huidige (d.d. 29 oktober 2018) functioneel beheerder van de HGK-server is Gosro Karimlou (werkzaam bij waterschap De Dommel).

De formele samenwerking tussen de vijf HGK partijen zijn vastgelegd in de Samenwerkingsovereenkomst beheer en onderhoud Hydrologische Gereedschapskist Brabant (30 mei 2016).

9.2 Toepassingsmogelijkheden

IJking van het model

Het grondwatermodel is geijkt op gemeten grondwaterstanden en stijghoogten in de periode 2009 – 2016. Het model is geijkt op de schaal van de provincie Noord-Brabant. Het is aan te raden om vooraf bij studies in specifieke gebieden eerst te beoordelen in hoeverre berekeningen en metingen in dit gebied met elkaar overeenkomen, en in hoeverre de regionaal relevante informatie vervangbaar is door betere detailinformatie op een geschikt schaalniveau voor het specifieke project.

Schaal van het model

Het Brabantmodel is opgezet met cellen van 250 * 250 meter. Het model is daarom geschikt voor berekeningen voor de gehele provincie of regionale schaal. Voor het maken van detailstudies zoals GGOR-modellen of studies rond grondwaterwinningen moet ingezoomd worden. De achterliggende data zoals het topsysteem of het landgebruik zijn als basisdata in de originele resolutie opgeslagen. Zo kan met deze data een verfijnd model worden gemaakt, indien er voldoende detailinformatie beschikbaar is. Het zal nog steeds nodig zijn om locatie specifieke informatie toe te voegen. Bijvoorbeeld informatie over exacte ligging van drainage, bronbemalingen, WKO-systeem, verharding in stedelijk gebied, of afvoer van water over maaiveld ontbreekt.

Ruimtelijke afbakening

Het Brabantmodel is opgezet voor de provincie Noord-Brabant. Om de grondwaterstroming goed te kunnen simuleren is een groot gebied om de provincie heen meegenomen in het model. Dit zijn de omliggende Nederlandse provincies en een groot deel van Oost-Vlaanderen. Het model is in deze gebieden echter niet gevalideerd of geijkt, en zodoende is het model niet bedoeld om in deze gebieden (effect)berekeningen uit te voeren. De ingevoerde informatie is minder gedetailleerd in vergelijking met Noord-Brabant en mogelijk liggen deze gebieden te dicht tegen de modelrand aan.

Effecten op de rand

De modelranden liggen ruim om de provincie heen. Dit heeft als doel dat de modelrand een minimale invloed heeft op de modeluitkomsten. De invloed is echter afhankelijk van de geologische eigenschappen en de grootte van de door te rekenen ingreep. Een grote ingreep, bijvoorbeeld het effect van alle drinkwateronttrekkingen in de provincie Noord-Brabant, zal zich ver uitstrekken. Dit is vooral het geval in de Centrale Slenk en de Roerdalslenk omdat de watervoerende pakketten een grote transmissiviteit hebben en er grote weerstanden voorkomen in de ondergrond boven de winningen. Bij het doorrekenen van dergelijke scenario's is het nodig om vooraf te controleren wat de effecten van de modelrand op de berekende resultaten zullen zijn. Dit is moeilijk met het Brabantmodel zelf uit te voeren omdat de effecten altijd gelijk aan nul zijn op de rand. Wel kan het patroon in verlaging bestudeerd worden. Of er kan een berekening met een analytische formule of met een apart sterk vereenvoudigd model worden uitgevoerd. Indien de effecten zich naar verwachting uitstrekken over de modelrand is geen betrouwbare berekening mogelijk. Een oplossing is het toepassen van een groter versimpeld model waarmee de effecten op de modelrand worden berekend. Dit is eerder toegepast voor de studie Draagkracht grondwater Noord-Brabant (Royal HaskoningDHV, 2017c).

Andere jaren doorrekenen

Met het grondwatermodel kunnen de jaren 1970 tot en met 2016 worden doorgerekend. Voor meer recente jaren moet FLUZO opnieuw gedraaid worden en zo kan de reeks aangevuld worden. De bijbehorende grondwaternaamvulling is eerder doorgerekend met FLUZO en beschikbaar gesteld op de modelserver (zie paragraaf 9.1). In de berekening moet rekening worden gehouden met een inloopijd van minimaal twee jaar. Binnen deze tijd kan de berekende grondwaterstand zich instellen van het startjaar tot de werkelijk verwachte grondwaterstand in de jaren daarna. De grondwaternaamvulling is in ieder jaar gebaseerd op het landgebruik van 2007/2008 uit het LGN6. Voor een verandering van landgebruik door de jaren heen moet de grondwaternaamvulling opnieuw berekend worden.

Landgebruik

Het grondwatermodel is gebaseerd op het landgebruik van LGN6. Het landgebruik kan aangepast worden door een andere versie van de landgebruikskaart te gebruiken of door deze kaart aan te passen. Het landgebruik heeft effect op de grondwaternaamvulling. Aangezien het model gebruik maakt van tevoren doorgerekende reeksen met grondwaternaamvulling hoeft deze niet opnieuw berekend te worden.

Tijdsafhankelijke ontrekkingen

In het model zijn de debieten gevarieerd in de tijd voor de Brabantse drinkwaterwinningen (per maand) en de grote Brabantse industriële ontrekkingen (per kwartaal). Indien voor meer winningen het debiet gevarieerd wordt in de tijd (met de tool IPF2ADO, zie paragraaf 5.10.6) moet het modelgrid en modeltijd gedefinieerd zijn. Een nieuwe winning wordt aan de IPF toegevoegd; een verandering in rekentijd wordt aangepast in het parameterbestand van IPF2ADO.

Beregeningstool

De beregening is doorgerekend voor de jaren 2009-2016. De beregeningstool kan ingezet worden voor die jaren waarvoor een beregeningsrendement is bepaald middels vergelijking tussen berekende en geregistreerde beregeningshoeveelheden van die betreffende jaren. Dit zijn de jaren 1997 – 2017. Voor jaren daarvoor moet het rendement bepaald worden met behulp van het vochttekort van de betreffende jaren. Er moet wel rekening gehouden worden met het feit dat het aantal beregeningsputten geleidelijk is toegenomen met de jaren. De beregening zal daarom overschat worden als deze tool wordt gebruikt voor een periode voor 1997.

9.3 Ruimtelijke en temporele verschillen in invoer

Ruimtelijke verdeling

Voor de invoer van het Brabant model is veel gebruik gemaakt van landelijke of provinciale bestanden. Dit geldt voor het landgebruik, de meteorologie en de geologische opbouw. Voor de schematisatie van het topsysteem is gebruik gemaakt van oppervlaktewatermodellen voor het gebied van Aa en Maas en De Dommel. Voor het gebied van Brabantse Delta is een dergelijk model niet beschikbaar en zijn de ingevoerde parameters dus wezenlijk verschillend ten opzichte van de andere twee beheergebieden.

Brabantse Wal en schijnspiegelsystemen

Het grondwatersysteem van de Brabantse Wal is een complex hydrologisch systeem (zie paragraaf 5.8). Leemlagen in de ondiepe ondergrond vertragen de wegwijziging en zorgen voor natte plekken en schijngondwaterspiegels. Met een regionaal model is dit systeem niet goed te modelleren. Voor dit gebied zal daarom altijd een gedetailleerd model gebruikt moeten worden waarbij de werking van schijngondwaterspiegelsysteem wordt gemodelleerd.

Temporele verdeling

Het niet stationaire model rekent met tijdstappen van 5 dagen. Binnen deze periode varieert de grondwaternaamvulling op basis van de geregistreerde neerslag en verdamping en de waterstand in de grote rivieren (Maas en Waal). De volgende invoerparameters variëren bovendien in de tijd:

- De ontrekingshoeveelheid van de winningen van Brabant Water (varieert per maand).
- De ontrekingshoeveelheid van de winningen van de grote industriële ontrekkingen in Brabant (varieert per kwartaal).

Het waterpeil in de waterlopen van de waterlopen van de waterschappen in Brabant, Limburg en Rivierenland (seizoenpeil of zomer/winterpeil).

10 Mogelijke verbeterpunten



10.1 Modelinvoer / Basisdata

Weerstand van de breuken

Over de weerstand van de breuken is nog betrekkelijk weinig bekend. Er zijn onzekerheden over de precieze ligging, de doorwerking in de diepte, de weerstand van de breuk en de mogelijke kortsluiting van lagen. Met de komst van H3O zijn de onzekerheden verkleind en zijn de meest recente inzichten uit seismisch onderzoek verwerkt. Nieuw onderzoek aan de VU Amsterdam levert mogelijk aanvullende informatie op. In de modelkalibratie is geanalyseerd (paragraaf) waar een sprong in grondwaterstand of stijghoogte voorkomt. Als dat het geval is, is er voldoende reden om weerstand aan te nemen voor de breuk. Mogelijk kan met lokale kennis zoals opgedaan in GGOR-studies, regionale modelleringen of de analyse van effecten van onttrekkingen meer detailkennis over de breuken worden ingebracht.

Verbetering van het lagenmodel

Het lagenmodel is ingrijpend aangepast en verbeterd ten opzichte van het vorige grondwatermodel door het gebruik van nieuwe ondergrondmodellen. In de toekomst zijn verdere verbeteringen mogelijk, wanneer nieuwe versies van GeoTOP, REGIS en H3O gereedkomen. Belangrijkste verbeterpunt is het opnemen van H3O-noordwest dat in 2019 gereedkomt. Met deze versie kan de overgang van de Formatie van Breda van Vlaanderen naar Nederland beter plaatsvinden in West-Brabant. In H3O-Noordwest wordt de Formatie van Breda verder gekarakteriseerd en worden nieuwe laagpakketten voorgesteld voor de overgang van Formatie van Oosterhout naar Formatie van Breda. Naar verwachting komt in 2019 een nieuwe versie van GeoTOP gereed waarmee de ondiepe ondergrond in meer detail is geschematiseerd. De huidige schematisatie van de Boxtelklei op basis van boringen zou dan vervangen kunnen worden door GeoTOP. Wat betreft REGISII v2.2 zitten er nog foutjes in de schematisering van de regio Rijen. Dit heeft geen groot effect op het grondwatermodel van Noord-Brabant, maar het is wel netjes om deze fout er op termijn uit te halen.

Actualisatie van Sobek-modellen en HYDAMO

De schematisatie van het oppervlaktewatersysteem (peilen, bodemhoogte en natte omtrek) is deels gebaseerd op bestaande oppervlaktewatermodellen ontwikkeld door de waterschappen. Wanneer deze modellen worden verbeterd kan het grondwatermodel ook weer verbeterd worden. Bij het maken van het grondwatermodel zijn foutjes geconstateerd in het waterpeil. Deze fouten zijn in de dataset voor het Brabantmodel verbeterd en nog niet in de achterliggende modellen. Voor waterschap Brabantse Delta ontbreekt nog een oppervlaktewatermodel.

Er kan aangesloten worden op het landelijke standaard datamodel voor oppervlaktewater: HYDAMO. Dit is een aanpassing van de gegevensstandaard DAMO waaraan sturingsinformatie is toegevoegd. Het hanteren van deze standaard die ook in NHI module oppervlaktewater wordt gebruikt helpt bij het gestructureerd en snel opzetten van modelinvoer voor het Brabantmodel.

Wateraanvoer

Voor waterschap Aa en Maas en het rivierengebied is in het model opgenomen waar water vanuit het oppervlaktewatersysteem naar het grondwater kan infiltreren (zie paragraaf 6.5). Dit is het gebied waar water aangevoerd kan worden vanuit het Peelkanaal en het peilbeheerde gebied langs de grote rivieren. Buiten deze waterlopen is nu geen infiltratie mogelijk naar het grondwater. Er zijn echter nog wel gebieden aan te wijzen waar aanvoer van water en infiltratie naar het grondwater plaats vindt. Een voorbeeld is het stroomgebied van de Beekloop van waterschap de Dommel in de buurt van Bergeijk. Water wordt hier vanuit het Kempisch Kanaal in België ingelaten. Een kaart met de trajecten waarop infiltratie kan plaats vinden helpt bij het verbeteren van het model. In het stroomgebied van Aa en Maas zal in de toekomst meer water worden ingelaten vanuit de Noordervaart, waardoor oppervlaktewater dieper in het watersysteem van Aa en Maas

aangevoerd kan worden. Voor deze nieuwe situatie moet het oppervlaktewatermodel aangepast worden (zie hierboven) waarna ook het Brabantmodel aangepast kan worden.

Landgebruikskaart

In het Brabantmodel is de landgebruikskaart LGN6 gebruikt. Er bestaat een meer actuele versie LGN7, maar er was geen licentie beschikbaar voor geheel Noord-Brabant. Nadeel van het LGN6 is dat dit de situatie weergeeft van 2007/2008 en dus niet de periode van de modellering dekt (2009-2016). Aanpassing van een nieuwe landgebruikskaart is betrekkelijk eenvoudig omdat LGN6 en LGN7 van dezelfde landgebruikstypen gebruik maken; alleen de ruimtelijke verdeling verschilt. Daarom hoeft FLUZO niet opnieuw gedraaid te worden omdat alle mogelijke combinaties tussen landgebruik, grondwaterstand en bodemtype al zijn doorgerekend. Met deze combinaties kan de grondwaternaanvulling opnieuw berekend worden. Naar verwachting heeft dit niet een groot verschil in modelresultaat tot gevolg. Er komt waarschijnlijk geen nieuw LGN8. Jaarlijkse veranderingen in landgebruik worden vastgelegd via de Basisregistratie Percelen. Dit heeft het voordeel dat veranderingen in landgebruik, bijvoorbeeld vanwege gewasrotatie, in veel meer detail meegenomen kunnen worden. Dit zal een veel groter effect hebben op de berekende grondwaternaanvulling in vergelijking met het verschil tussen LGN6 en LGN7. In de Basisregistratie Percelen zit geen informatie over stedelijk- of natuurgebied. Hier zal dan een oplossing voor moeten worden gevonden. Het stedelijk gebied zit sterk geschematiseerd in het grondwatermodel. Voor elke stad wordt dezelfde graad van verharding aangenomen op basis van het LGN6. Er is geen gedetailleerde informatie opgenomen over drainage, afkoppeling van het rioolstelsel of drainerende werking van de riolen. Wanneer deze informatie beschikbaar komt, kan dit in het Brabantmodel worden opgenomen. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met het schaalniveau van het Brabantmodel.

Invoerformaat van de ontrekkingen

In het Brabantmodel zijn alle gegevens van de ontrekkingen zo verwerkt dat ze in een eenduidig formaat het Brabantmodel kunnen voeden. De gegevens zijn echter aangeleverd in diverse formaten. Dit maakt het invoeren en eventueel later aanpassen van de modelinvoer zeer tijdrovend. Het heeft de voorkeur om de gegevens op te slaan en aan te leveren in een uniform formaat. Door KWR (2017) is het Hydromonitor formaat opgesteld dat voor het NHI gebruikt wordt. Brabant Water heeft de gegevens in dit formaat aangeleverd. Het heeft de voorkeur dat alle partijen op dit formaat aansluiten.

Ontrekkingen in Vlaanderen

Door de VMM zijn gegevens aangeleverd over ontrekkingen in Vlaanderen ten behoeve van de drinkwatervoorziening of de industrie. In het bestand ontbreken gegevens voor sommige winningen voor bepaalde jaren. Het is nodig om de gegevens te controleren, aan te vullen en eventueel te verbeteren. De provincie Noord-Brabant voert overleg met de Vlaamse overheid hierover.



10.2 Modelconcept

Hulpvlakken

Het lagenmodel is opgebouwd langs logische geologische overgangen. De bodem van een waterloop kan tot in verschillende lagen doorsnijden afhankelijk van de dimensie van de watergang en de gekozen schematisatie van het lagenmodel. Dit maakt het lastig om stroombaanberekeningen te doen vanaf een standaard diepte zoals de bodemhoogte van de leggerwatergangen of 1 meter onder het maaiveld. Door het aanpassen van het lagenmodel en het toevoegen van hulpvlakken zou dit opgelost kunnen worden. Dit is echter bewerkelijk en niet eenvoudig omdat het lagenmodel anders opgezet moet worden met waarschijnlijk meer lagen.

Drainage

In het Brabantmodel wordt de drainageweerstand bepaald op basis van de intreeweerstand naar de waterloop en de slootafstand. Naast de intreeweerstand is er ook sprake van een horizontale, verticale en radiale weerstand naar de waterloop. De drainageweerstand is afhankelijk van de modeldiscretisatie. In een kleine modelcel (ten opzichte van de waterloop) hebben deze drie componenten weinig invloed. Maar in het Brabantmodel met cellen van 250 meter maakt dit wel uit. De weerstand wordt vooral in slechtdoorlatende ondergrond (klei) groter.

Definities voedingsweerstand en drainageweerstand

- De voedingsweerstand is de weerstand tussen de drainagemiddelen en waterlopen en de top van het bovenste regionale watervoerend pakket. De voedingsweerstand is gelijk aan som van de freatische lekweerstand en de weerstand tegen verticale stroming door de scheidende laag onder het freatisch pakket.
- De freatische lekweerstand is de weerstand die het freatische grondwater binnen een cel ondervindt bij stroming naar alle oppervlakteswateren. De weerstand is afhankelijk van de celgrootte en de veldeigenschappen binnen de cel. De resiproke van deze waarde is "de conductance".
- De drainageweerstand is de weerstand die de grondwaternaavulling ondervindt binnen het topsysteem vanaf het freatisch vlak tot aan de waterlopen.

Door De Lange (1997) is een formule opgesteld voor de freatische lekweerstand die rekening houdt met alle vier de weerstandscomponenten. Door Adviesinwater (2018) is met het model van Aa en Maas uitgezocht wat het verschil is in berekende drainageweerstand wanneer deze formule gebruikt wordt. Hieruit blijkt dat de weerstand met de formule van De Lange relatief veel groter wordt in gebieden met een dun freatisch pakket. Berekende grondwaterstanden in kwelgebieden zijn hoger met de formule van De Lange; in infiltratie gebieden zijn de grondwaterstanden lager. Het inbouwen van de Formule van de Lange binnen het Brabantmodel is complex. Een alternatief is om de drainageweerstanden apart te berekenen met de Formule van de Lange en beschikbaar te maken binnen de gereedschapskist. Dit zou voor een verschillende celgrootte gedaan kunnen worden. In de provincie Friesland heeft Royal HaskoningDHV een methode toegepast waarbij met een model van 25*25 meter berekeningen zijn gedaan per type waterloop. Na het opschalen van de uitkomsten (debiet en peil) kan eenvoudig een effectieve drainageweerstand afgeleid worden. Er wordt hierbij optimaal gebruik gemaakt van de ruimtelijke variatie van de parameters en alle modellagen doen naar verhouding mee.

Insnijdingsconcept

In het Brabantmodel 2018 is een nieuw insnijdingsconcept gekozen. Er is een nadere analyse van de werking en gevoeligheid nodig van dit concept ten aanzien van berekende grondwaterstanden in de beekdalen. Mogelijk is er een beter concept mogelijk. Een alternatief is de natte omtrek proportioneel te verdelen op basis van de transmissiviteit van de doorsneden pakketten. Maar dit heeft ook nadelen. Als bijvoorbeeld de freatische laag erg dun is krijgt deze een gering aandeel in de conductance en het slechts ten dele doorsneden onderste pakket krijgt een te groot aandeel van de conductance.

Grondwaternaavulling

De grondwaternaavulling is in het Brabantmodel bepaald met aangepaste bodemconstants en een andere bodemkaart. De berekende grondwaternaavulling blijkt erg gevoelig te zijn voor aanpassing van deze parameters. De grondwaternaavulling verschilt aanmerkelijk van de berekende grondwaternaavulling in 2014 en geeft daarom ook andere berekende grondwaterstanden. De nu berekende grondwaternaavulling is lager dan berekend in 2014 en ligt ook dichter in de buurt van de grondwaternaavulling berekend door Metaswap dat is gebruikt voor het Aa en Maas model. Dit betekent echter nog niet dat de berekende grondwaternaavulling ook dichter in de buurt van de werkelijkheid ligt. De mate van grondwaternaavulling en indirect de verdamping zijn namelijk moeilijk te meten en op te schalen naar het grondgebied van Noord-Brabant. De validatie op afvoeren (zie paragraaf 8.5) laat zien dat de gemiddeld berekende basisafvoeren redelijk in de buurt liggen van de gemeten afvoeren. Aangezien de grondwaternaavulling een groot effect heeft op het modelresultaat is het belangrijk om meer gevoel en vertrouwen te krijgen in de juiste hoeveelheid hiervan. Het gaat om de

absolute hoeveelheid maar ook om de verdeling tussen de jaren. We raden aan om deze inspanning gezamenlijk op te pakken in Nederland. De laatste jaren is er meer aandacht voor onderzoek naar het meten en modelleren van verdamping. Bestaande kennis over verdamping (NHV, 2015) en nieuwe inzichten uit onderzoek uit lysimeters en ‘remote-sensing’ kunnen samen leiden tot betere modelinvoer van landelijk en regionale grondwatermodellen. Kennis van instituten zoals KWR, Deltares en de WeR moeten hiervoor ingezet worden.

Oppervlakkige afstroming

Er is voor het landelijk gebied geen rekening gehouden met oppervlakkige afstroming. Dit is neerslag die via het maaiveld in het oppervlaktewatersysteem terecht komt. Het is wel mogelijk om hier rekening mee te houden door gebruik te maken van een neerslag-afvoer module, zoals NACHO.

Detailinformatie

Het model kan verbeterd worden door ook meer lokale informatie of specifieke hydrologische processen in het model op te nemen. Een voorbeeld is de modellering van de Brabantse Wal met het schijnspiegelsysteem. Hiervoor zijn tools beschikbaar, maar deze zijn (nog) niet opgenomen in de HGK. Een ander voorbeeld is de werking van de kleinere breuken, bijvoorbeeld in de buurt van de Peelhorst of bij Vessem. Met detailinformatie over de lokale situatie kan het model mogelijk verbeterd worden.



10.3 IJking / validatie

Bepaling / IJking van Boxtelklei

De weerstand van de Boxtelklei is bepaald op basis van de diktes van leem en kleilagen die voorkomen in de boorbeschrijving. Door ijking kan de weerstand gevarieerd worden. Er is geen rekening gehouden met de kwaliteit van de uitgevoerde boring en de type afzetting. Wanneer deze informatie wordt meegenomen, indien bekend, kan de weerstand beter bepaald worden. Hiervoor kan het project retourstroom van TNO gebruikt worden.

Zones met weinig weerstand

Het model is geïjkt door gebruik te maken van ijkfactoren. De weerstand of doorlatendheid van een laag wordt met deze factor vermenigvuldigd. Hierbij maakt het niet uit of er sprake is van weinig of van veel weerstand. Door deze aanpak kan de weerstand erg hoog worden in gebieden waar de initiële weerstand al hoog is. Door gebruik te maken van verschillende ijkfactoren voor gebieden met lage en hoge weerstanden kan dit worden voorkomen.

Afwijkingen rond grondwaterwinningen

Rond de grondwaterwinningen zijn meer meetpunten beschikbaar. Door het onttrekken van grondwater wordt de stijghoogte en grondwaterstand verlaagd. Samen geeft dit invoer voor een aanvullende analyse. Per winning kan beoordeeld worden of de gemeten en berekende verlagingen met elkaar overeenkomen en of er een relatie is tot de afstand van de winningen.

Valideren van de ijkset

De huidige ijkset bevat een aantal reeksen met onverklaarbare uitschieters en sprongen. Deze hebben effect op de berekende gemiddelde grondwaterstand en de GXG's. Ook zorgt dit voor ruis op de gerapporteerde nauwkeurigheid van het model. Met behulp van tijdreeksanalyse kunnen slecht verklaarbare reeksen gefilterd worden. Deze reeksen kunnen dan een minder groot gewicht in de ijking krijgen.

Vervolg retourstroom met TNO

Het project retourstroom van TNO heeft tot doel om kennis opgedaan in modelleerprojecten terug te laten komen in REGIS. Het Brabantmodel heeft als voorbeeld gefungeerd voor de onderdelen Boxtelklei en Waalreklei. Deze kleilagen hebben andere parameterwaarden gekregen dan in REGIS opgenomen. Met TNO is bediscussieerd wat de uitgangspunten voor de parameterwaarden in REGIS zijn en wat de overwegingen geweest zijn om hiervan af te wijken. TNO kan deze kennis gebruiken voor een nieuwe versie van REGIS. Aan de andere kant kan de kennis over geologie van TNO teruggestrakt worden in het Brabantmodel.

11 Literatuur

Actueel Hoogtebestand Nederland, 2013. Kwaliteitsdocument AHN2. Versie 1.3. 14 mei 2013.

Adviesinwater, 2018. Memo stroming naar een waterloop in een modelcel. 9 april 2018

Anoniem, zonder datum. FLUZO beschrijving (Engelstalig document)

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

Binnenvaart, 2009. Website www.binnenvaart.be/nl/waterwegen/kaart_sluizen.html. Bezocht op 30 okt. 2009

Boleij, J., 2012. Vergelijking FLUZO – SWAP – MetaSWAP. Modelvergelijking van drie onverzadigde zone modellen. WUR / Royal HaskoningDHV afstudeerrapport.

Bot, 2011. Grondwaterzakboekje. Bram Bot. ISBN-EAN: 978-90-817869-0-4.

Brolsma R., J.Hunink & J.Hoogewoud, 2017. Rapportage AHN Filtering. 1220750-000.

Custers, J. Verificatie van de onverzadigde zone module Fluzo en verdere ontwikkeling van de retardatie en dempingfunctie in Fluzo. Afstudeerverslag aan de Wageningen universiteit. April 2005.

Deckers, J., R.Vernes, W. Dabekaussen, M. Den Dulk, H. Doornenbal, M. Dusar, J.Hummelman, J. Matthijs, A. Menkovic, R. Reindersma, J. Walstra, W. Westerhoff, N Witmans. Geologisch en hydrogeologisch 3D model van het Cenozoïcum van de Roerdalslenk in Zuidoost-Nederland en Vlaanderen. (H3O – Roerdalslenk). Juni 2014

Hydronet, 2009. Website bezocht op 30 okt. 2009

De Lange, W.J., 1997a. Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of freatische lekweerstand in de randvoorwaarde van een grondwater model, deel 1: De basis van het modelconcept, Stromingen 3(2)

De Lange, W.J., 1997b. Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of freatische lekweerstand in de randvoorwaarde van een grondwater model, deel 2: Het gebruik van de randvoorwaarde, Stromingen 3(3)

De Lange, W.J., 1997c. Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of freatische lekweerstand in de randvoorwaarde van een grondwater model, deel 3: De parametrisering van de randvoorwaarde, Stromingen 3(4)

Deltares, 2011. NHI 2.2; beschrijving van de veranderingen en toetsing in NHI 2.2. Rapport 1204179-000.

Deltares, 2013. Toetsingsrapportage NHI 3.0. Rapportnr 1206107-000-BGS-0011

Deltares en Alterra, 2015. Actualisatie en Kalibratie IBRAHYM. Beschrijving van activiteiten t.b.v. IBRAHYM v2.0.

Deltares, 2016, ISG voor de rivieren in het MORIAmodel. Beschrijving en modelvergelijking. Rapportnr 1230351-000

Deltares, 2017. IMOD User Manual version 4.0.1, Revision: 51670, 8 September 2017

Feddes, RA., 1987. Crop factors in relation to Makkink reference crop evapotranspiration; in: J.C. Hooghart (red) Verslagen en Mededelingen nr 39, Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, Den Haag, pag 3345.

Gehrels, J.C., 1999. Groundwater level fluctuations. Separation of natural from anthropogenic influences and determination of groundwater recharge in the Veluwe area, the Netherlands. Academisch proefschrift Vrije Universiteit Amsterdam.

G.W. Hazeu, C. Schuiling, G.J. Dorland, G.J. Roerink, H.S.D. Naeff & R.A. Smidt, juli 2014. Land Grondgebruiksbestand Nederland versie 7. Vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik. Wageningen, Alterra Rapport 2548.

Haskoning, 2011. Oppervlaktewaterkwantiteitsmodellering Antitankgracht.

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

IWACO, 1995. TRIWACO, a package for the simulation of groundwater flow based on the finite element method. Rotterdam.

Karimlou, G., 1 december 2017. Memo vergelijking drainage analyse Deltares versus inmetingen. Waterschap de Dommel.

KWR, 2017. HydroMonitor - open data exchange format (toelichting en definitie) KWR 2016.062.

Laat, P.J.M. de, 1985. MUST- a simulation model for unsaturated flow. Report series no.16. International Institute for hydraulic and environmental engineering. Delft.

Makkink, G.F. 1957. Testing the Penman-formula by means of lysimeters. Journal Int. Wat. Eng. London, 11, 277-288.

Massop, H.Th.L. en C. Schuiling, 2016. Buisdrainagekaart 2015; Update landelijke buisdrainagekaart op basis van de landbouwmeetingen van 2012. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research Centre), Alterra-rapport 2700.

Massop, H.Th.L. en C. Schuiling, 2017. Toelichting update buisdrainagekaart 2017. Notitie

NHV, 2015. Verdamping in de hydrologie. Nederlandse Hydrologische Vereniging Werkgroep Verdamping ISBN 9789080356504(pbk)

Royal Haskoning 2006. Aanvullende modellering en berekening van infiltratiescenario's in de omgeving van de Groote Meer. Conceptrapport. Referentie 9R6300/R00003/500914/DenB. 26 juni 2006

Royal Haskoning 2009, Effect van winningen en lokale maatregelen op Groote Meer.
9V3333/R00001/500914/BW/DenB. Conceptrapport. 4 juni 2009

Royal Haskoning, 2010. Hydrogeologie België - Noord-Brabant. Regionaal grondwatermodel Brabant Water. Projectnummer 9T6178. 5 januari 2010

Royal Haskoning DHV, 2017a. Documentatie NHI lagentool. Tutorial. Project WATBE4057-104-100R001F1.0. Versie 1.0. 2 oktober 2017

Royal Haskoning DHV, 2017b. Grondwatermodel Kapellen. Conceptrapport I&BFP1802R002D0.2. 15 september 2017.

Royal HaskoningDHV, 2017c. Draagkracht grondwater Noord-Brabant. Deelrapport methodiek. BF3125_R002. 21 december 2017

Royal Haskoning DHV, 2018. Zoekgebieden grondwaterwinningen. Verkenning strategische grondwatervoorraad in het grensgebied van provincies Gelderland, Utrecht en Zuid-Holland. Definitief rapport WATBF8017R001F01WM. 28 juni 2018

Schaap, M. G., M. Th Van Genuchten, 2005. A modified Mualem–van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. Vadose Zone Journal 5:27–34.

Vernes, R.W., J. Deckers, M.A.J. Bakker, F. Bogemans, M. De Ceukelaire, J.C. Doornenbal, M. den Dulk, M. Dusar, T.F.M. Van Haren, V.M.A. Heyvaert, P. Kiden, A.F. Kruisselbrink, T. Lanckacker A. Menkovic, B. Meyvis, D.K. Munsterman, R. Reindersma, B. Rombaut, J.H. ten Veen, T.J.M. van de Ven, J. Walstra, N. Witmans. Geologisch en hydrogeologisch 3D model van het Cenozoïcum van de Belgisch - Nederlandse grensstreek van Midden - Brabant / De Kempen (H3O – De Kempen). GDNTNO 2017 R11261 / VITO 2017/RMA/R/1348. Juni 2018

VMM, 2006. Grondwaterbeheer in Vlaanderen: het onzichtbare water doorgrond. Vlaamse Milieumaatschappij. Aalst. 150 p. Depotnummer: D/2006/6871/0342013.

F. de Vries, W.J.M. de Groot, T.Hoogland, J. Denneboom, 2003. De Bodemkaart van Nederland digitaal. Toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionele informatie. Wageningen, Alterra rapport 811.

Waternet, 2013. Grondwater in stedelijk gebied; Kruisbestuiving met de afdeling riolering. Presentatie Jacqueline Flink. 29 mei 2013

Wosten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte, 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 153. 86 blz. 3 fig.; 10 tab.; 20 ref.

Wosten, Henk, Folkert de Vries, Tom Hoogland, Harry Massop, Ab Veldhuizen, Henk Vroon, Jan Wesseling, Joost Heijkers en Almer Bolman (2013). BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. 88 pp. Alterra-rapport 2387.

Zaadnoordijk, W.J, 2009. Simulating Piecewise-Linear Surface Water and Ground Water Interactions with MODFLOW. Vol. 47, No. 5-GROUND WATER-September-October 2009 (pages 723–726).

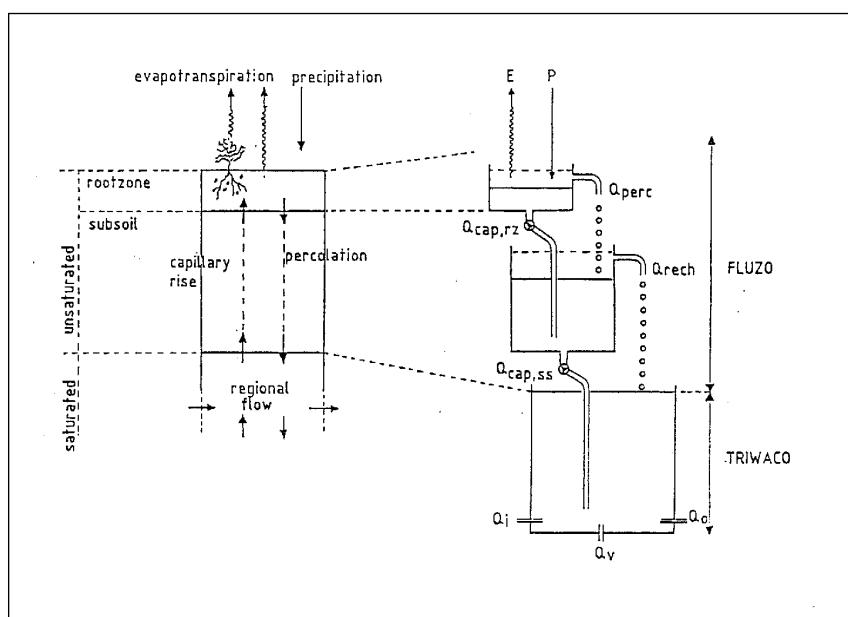
Bijlage 1: Beschrijving FLUZO

Deze beschrijving is gebaseerd op de handleidingen over Fluzo (IWACO, 1992 en IWACO, 2000). Fluzo is een onderdeel van het grondwaterstromingsmodel Triwaco. Fluzo is een bakjesmodel, dat de grondwaternaavulling vanuit de onverzadigde zone berekent. Het model bestaat uit 2 reservoirs voor de onverzadigde zone: de wortelzone en de ondergrond. De reservoiropzet van Fluzo wordt ook weergegeven in Figuur 11-1.

Het eerste reservoir is de wortelzone. Deze laag heeft een constante dikte, die afhankelijk is van het gewas dat er opgroeit. Alleen als het grondwater tot in de wortelzone komt, is de effectieve hoogte van de wortelzone kleiner. Het vochtgehalte in de wortelzone varieert, afhankelijk van de in en uitgaande fluxen. De ingaande fluxen zijn de effectieve neerslag en capillaire opstijging vanuit de ondergrond. De uitgaande fluxen zijn de actuele evapotranspiratie en de percolatie naar de ondergrond. In de wortelzone wordt verticaal transport van vocht niet expliciet meegenomen.

Het tweede reservoir is de ondergrond, dit is de laag tussen de ondergrens van de wortelzone en de grondwaterstand. Ook het vochtgehalte in deze laag is afhankelijk van de inkomende en uitgaande fluxen. De inkomende fluxen zijn de percolatie vanuit de wortelzone en capillaire opstijging vanuit het grondwater. De uitgaande fluxen zijn de capillaire opstijging naar de wortelzone en aanvulling naar de verzadigde zone. De onderkant van dit reservoir, de grondwaterstand is de onderrandvoorraarde in Fluzo.

Voor de berekening van de actuele evapotranspiratie wordt in Fluzo rekening gehouden met de evaporatie, transpiratie en de interceptie. Deze worden bepaald uit specifieke gewasdata voor de verschillende landgebruiken. Capillaire opstijging naar de wortelzone en de ondergrond wordt berekend met de bodemfysische functies. Percolatie naar de wortelzone en aanvulling vanuit de ondergrond resulteert uit een waterbalans voor deze zones. De hoeveelheid water dat over het evenwichtsvochtgehalte heen komt, stroomt door naar het volgende reservoir. De grondwaternaavulling is het verschil tussen de percolatie van de ondergrond en capillaire opstijging naar de ondergrond. De berekening van al deze termen zal nu uitgebreid beschreven worden.



Figuur 11-1: Reservoir opzet van het model Fluzo (IWACO, 1992)

A1.1 Interceptie en de potentiele evapotranspiratie

De effectieve neerslag wordt hier gedefinieerd als dat deel van de neerslag dat de bodem indringt. Dit is de neerslag min de interceptieverdamping. De interceptieverdamping is het water dat direct door de bladeren wordt opgevangen en zal verdampen. Vervolgens kan nog transpiratie en evaporatie plaats vinden. De transpiratie is het deel dat door de wortels van de bomen wordt opgenomen uit de bodem en alsnog via de bladeren zal verdampen. Evaporatie is de verdamping van de bodem zelf aan het aardoppervlak.

Om de interceptie te berekenen is voor elk gewas een interceptiereservoir met een maximale capaciteit bepaald. Het interceptiereservoir wordt gedurende de dag leger door evaporatie. De werkelijke interceptiecapaciteit en de effectieve neerslag worden berekend door de bedekkingsgraad van het gewas mee te nemen in de berekening.

De werkelijke interceptiecapaciteit is: $I_{c,i} = S_{c,i} I_{\max,i}$

De werkelijke interceptiecapaciteit wordt per dag berekend. Deze hoeveelheid wordt van de dag neerslag afgetrokken. Dit is de effectieve neerslag die per dag de bodem indringt en is 0 als de interceptie groter is dan de neerslag. Voor berekening van de effectieve neerslag voor een tijdstap van meerdere dagen wordt de effectieve neerslag voor de verschillende dagen opgeteld. De effectieve neerslag voor een tijdstap van n dagen is:

$$P_{e,i,k} = \sum_{j=1}^n (P_j - S_{c,i,k} I_{\max,i}; 0) \quad (1)$$

$I_{c,i}$ De werkelijke interceptie capaciteit voor gewas i (m)

$I_{\max,i}$ De maximale interceptiecapaciteit voor gewas i (m)

$P_{e,i,k}$ De effectieve neerslag voor gewas i en tijdstap k (m)

P_j De neerslag voor dag j (m)

$S_{c,i,k}$ De fractie bodembedekking voor gewas i en tijdstap k (-)

Voor de effectieve neerslag die per tijdstap overblijft, wordt de hoeveelheid transpiratie en evaporatie berekend.

De maximale evapotranspiratie bestaat uit de som van de interceptieverdamping van gewas i , de potentiële evaporatie en de potentiële (droge) gewastrapspiratie voor gewas i . Als het gewasoppervlak en het bodem oppervlak nat zijn, is de maximale evapotranspiratie:

$$E_{\max,i}^T = E_{in,i} + E_{p,i} + T_{p,i} \quad (2)$$

$E_{\max,i}^T$ kan berekend worden met de Penman open water verdamping en een gewasfactor:

$$E_{\max,i}^T = g_i E_o \quad (3)$$

Deze kan tevens berekend worden met de Makkink referentieverdamping:

$$E_{\max,i}^T = f_i E_m \quad (4)$$

De gewasfactor f en g bepalen voor verschillende gewassen de specifieke verdamping. In deze factor is de groei van een gewas meegenomen.

$E_{\max,i}^T$	De maximale evapotranspiratie voor gewas i (m/dag)
E_o	De open water verdamping (Penman-verdamping) (m/dag)
E_m	De gewas referentie verdamping volgens Makkink (m/dag)
$E_{in,i}$	De interceptieverdamping van gewas i (m/dag)
$E_{p,i}$	De potentiele bodemevaporatie (m/dag)
$T_{p,i}$	De potentiele (droge) gewas transpiratie voor gewas i (m/dag)
g_i	Gewasfactor in relatie met de open water verdamping voor gewas i (-)
f_i	Gewas factor in relatie met de gewas referentie verdamping voor gewas i (-)

Om de actuele evapotranspiratie te berekenen moeten de verschillende onderdelen gesplitst worden. Als eerste wordt de werkelijke interceptie van de maximale evapotranspiratie afgetrokken. De interceptieverdamping wordt voor elke tijdstap k berekend met: $E_{in,i,k} = P_k - P_{e,i,k}$ (5)

De maximale evapotranspiratie min de interceptieverdamping is: $E_{max,i,k}' = E_{max,i,k}^T - E_{in,i,k}$ (6)

Wanneer de interceptie-evaporatie groter is dan de maximum (Makkink of Penman) evapotranspiratie, is de maximale evapotranspiratie 0. De interceptieverdamping kan niet groter worden dan de maximale Makkink of Penman evapotranspiratie.

$E_{in,i,k}$	De interceptie verdamping voor gewas i , gedurende tijdstap k (m)
P_k	De neerslag gedurende tijdstap k (m)
$P_{e,i,k}$	De effectieve neerslag voor gewas i , gedurende tijdstap k (m)

A1.2 Actuele transpiratie

De actuele transpiratie hangt af van de wateropname van de wortels van de verschillende gewassen. Deze wateropname kan beschreven worden door de Sink-term: $S(h) = \alpha(h) \cdot \frac{T_p}{D_{rz}}$ (7)

$S(h)$	Drukhoogte afhankelijke sink-term (d^{-1})
$\alpha(h)$	Drukhoogte afhankelijke reductiefactor (-)
T_p	De potentiele transpiratie ($m \cdot d^{-1}$)
D_{rz}	De diepte van de wortelzone (m)

De parameter $\alpha(h)$ geeft aan dat de wateropname van planten stopt in oververzadigde condities (h_1), omdat zuurstoftekort optreedt en op een maximum blijft tot een limiterende potentiaal bereikt wordt, waarbij de

bodem te droog is. De parameter α is 0 bij verzwaring en bij een drukhoogte groter dan het wiltingpoint. Bij maximale wateropname heeft α de waarde 1. Dit is in Figuur 11-2 tussen $|h_2|$ en $|h_3|$. $|h_3|$ is afhankelijk van de potentiële transpiratie. $\alpha(h)$ neemt lineair toe tussen $|h_1|$ en $|h_2|$ en lineair af tussen $|h_3|$ en $|h_4|$ (wilting point).

De actuele transpiratie hangt af van de wateropname van de wortels van de verschillende gewassen. Deze

$$\text{wateropname kan beschreven worden door de Sink-term: } S(h) = \alpha(h) \cdot \frac{T_p}{D_{rz}} \quad (7)$$

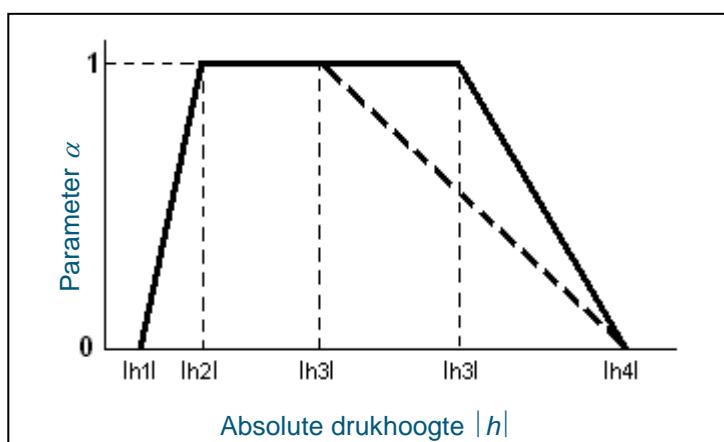
 $S(h)$ Drukhoogte afhankelijke sink-term (d^{-1}) $\alpha(h)$

Drukhoogte afhankelijke reductiefactor (-)

 T_p De potentiële transpiratie ($m \cdot d^{-1}$) D_{rz}

De diepte van de wortelzone (m)

De parameter $\alpha(h)$ geeft aan dat de wateropname van planten stopt in oververzwigde condities (h_1), omdat zuurstoftekort optreedt en op een maximum blijft tot een limiterende potentiaal bereikt wordt, waarbij de bodem te droog is. De parameter α is 0 bij verzwaring en bij een drukhoogte groter dan het wiltingpoint. Bij maximale wateropname heeft α de waarde 1. Dit is in Figuur 11-2 tussen $|h_2|$ en $|h_3|$. $|h_3|$ is afhankelijk van de potentiële transpiratie. $\alpha(h)$ neemt lineair toe tussen $|h_1|$ en $|h_2|$ en lineair af tussen $|h_3|$ en $|h_4|$ (wilting point).



Figuur 11-2: Sinkterm reductiefactor α als functie van de absolute drukhoogte $|h|$

Om de actuele transpiratie te kunnen berekenen zijn de twee volgende aannamen gedaan:

Eén gemiddelde drukhoogte h vertegenwoordigt de hele wortelzone

De verdeling tussen de transpiratie van een droog gewas en de bodemevaporatie hangt af van de bedekkingsgraad van het gewas, S_c .

Door deze aannamen worden de potentiële transpiratie en evaporatie:

$$T_p = S_c E_{\max}^T \quad (8)$$

$$E_p = (1 - S_c) E_{\max}^{T'} \quad (9)$$

De actuele transpiratie van gewas i kan vervolgens berekend worden met de volgende formule:

$$T_{a,i} = S_{c,i} \cdot \alpha_i(h_r) \cdot E_{\max,i}^{T'} \quad (10)$$

In de Fluzo database is de $h_{3\min}$ en de $h_{3\max}$ voor elk gewas gegeven. Hiermee wordt berekend tot welke drukhoogte parameter α de waarde 1 heeft. De parameters h_1, h_2 en h_4 zijn in de code verwerkt, met $h_1 = -0.1$, $h_2 = -0.2511$ en $h_4 = -158.5$ meter. Voor de gewassen is er in Fluzo geen verschil in gevoeligheid voor natte condities.

Bij welke drukhoogte (h_3) de parameter α weer afneemt, is afhankelijk van de potentiële transpiratie. Als de potentiële transpiratie groter is dan 0.005 m d^{-1} , is h_3 gelijk aan $h_{3\min}$. Als de potentiële transpiratie kleiner is dan 0.001 , dan is $h_3 = h_{3\max}$. Wanneer de potentiële transpiratie ertussenin zit, wordt h_3 lineair tussen $h_{3\min}$ en $h_{3\max}$ genomen.

A1.3 Actuele bodem evaporatie

De relatie tussen het bodemvochtgehalte en de evaporatie is anders dan die tussen het bodemvochtgehalte en de transpiratie. De evaporatie is maximaal bij verzadiging, als $h = 0$. Voor $|h| > 0$ vindt reductie van de evaporatie plaats. De Evaporatie stopt als de drukhoogte een maximum bereikt, als $(|h| = |h_{\max}|)$. Een voorbeeld van $|h_{\max}| = 10^6 \text{ m}$. De actuele evaporatie kan worden uitgedrukt met:

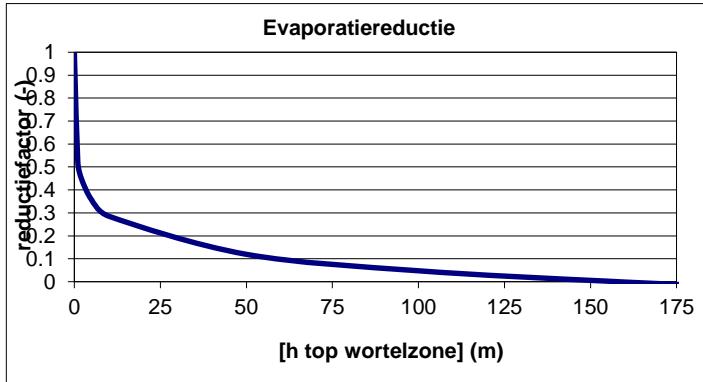
$$E_{a,i} = (1 - S_{c,i}) \cdot E_{\max,i}^{T'} e^{-\frac{|h_r|}{|h_{\max}| - |h_r|}} \quad (11)$$

Empirische data geven een vergelijkbaar resultaat als vergelijking 11 (De Laat 1985). In de empirische relatie en vergelijking 11 wordt de gemiddelde drukhoogte (h_r (m)) in de wortelzone gebruikt. Omdat de evaporatie vooral afhankelijk is van de bovenste laag van de bodem, en snel naar 0 gaat als de bodem bovenin uitdroogt, wordt in Fluzo de drukhoogte van de top van de wortelzone gebruikt. De vergelijking van De Laat aangepast met de drukhoogte van de top van de wortelzone is:

$$E_{a,i} = (1 - S_{c,i}) \cdot E_{\max,i}^{T'} \cdot \left(1 - \frac{\log(1 + 100|h_{trz}|)}{4.2} \right) \quad (12)$$

Bij het actuele vochtgehalte van de wortelzone is de drukhoogte bepaald met de bodemvochtkarakteristiek. Deze drukhoogte geldt voor het midden van de wortelzone. Ook is een evenwichtsvochtgehalte voor de top van de wortelzone bepaald met de bodemvochtkarakteristiek (vochtgehalte bij de drukhoogte die gelijk is aan de afstand van de top van de wortelzone tot de grondwaterstand). Deze wordt gecorrigeerd voor een eventueel vochttekort. Voor dit actuele vochtgehalte voor de top van de wortelzone wordt met de bodemvochtkarakteristiek de actuele drukhoogte voor de top van de wortelzone bepaald.

De reductiefactor als functie van h in de top van de wortelzone is weergegeven in Figuur 11-3. Omdat de reductiefactor bij een grotere h negatief wordt, wordt de actuele evaporatie in de code op 0 gezet wanneer h groter of gelijk is aan 154.7m.



Figuur 11-3: Reductiefactor voor de actuele evaporatie als functie van de drukhoogte in de top van de wortelzone

A1.4 Vochtgehalte van de wortelzone

Het vochtgehalte van de wortelzone aan het eind van een gegeven tijdstap is gedefinieerd door het vochtgehalte aan het eind van de vorige tijdstap, de inkomende fluxen (effectieve neerslag en capillaire opstijging van de ondergrond) en de uitgaande fluxen (evapotranspiratie en percolatie naar de ondergrond). Het volumetrisch vochtgehalte aan het einde van een tijdstap is:

$$V_{rz,t+\Delta t} = V_{rz,t} + P_e - E_a^T + q_{rz} \cdot \Delta t \quad (13)$$

$V_{rz,t+\Delta t}$ De vochtberging van de wortelzone aan het einde van de tijdstap (m)

$V_{rz,t}$ De vochtberging van de wortelzone aan het begin van de tijdstap (is aan het eind van de vorige tijdstap) (m)

$V_{rz,eq}$ Evenwichtsvochtberging (m)

Δt Lengte van de tijdstap (d)

P_e Effectieve neerslag (m)

E_a^T Actuele evapotranspiratie (m)

q_{rz} Capillaire opstijging van de ondergrond ($q_{rz} > 0$)
of percolatie naar de ondergrond ($q_{rz} < 0$) (m.d⁻¹)

Neergaande fluxen (richting grondwaterstand) worden altijd negatief genomen en opgaande fluxen (richting maaiveld) worden altijd positief genomen.

De percolatie wordt gesimuleerd met een simpele overloop van het reservoir en wordt alleen berekend als het vochtgehalte aan het einde van de tijdstap groter is dan het evenwichtsvochtgehalte. Het evenwichtsvochtgehalte is de hoeveelheid vocht onder condities waarbij hydrostatisch evenwicht is. Voor berekening van het evenwichtsvochtgehalte wordt voor drukhoogtes met een afstand van de grondwaterstand tot verschillende punten in de wortelzone het vochtgehalte bepaald. Deze vochtgehaltes worden gemiddeld voor het evenwichtsvochtgehalte. Dit wordt gedaan met de bodemfysische functies van de Staringreeks.

$$\text{De percolatie wordt berekend met: } q_{rz} \cdot \Delta t = V_{rz,t+\Delta t} - V_{rz,eq} \quad (14)$$

Als vochttekort optreedt, wordt $q_{rz} \cdot \Delta t$ op een andere manier berekend, zie paragraaf A1.7 en A1.8.

A1.5 Vochtgehalte aan de ondergrond

Het vochtgehalte van de ondergrond wordt berekend uit de volgende waterbalans:

$$V_{ss,t+\Delta t} = V_{ss,t} - (q_{rz} - q_{phr}) \cdot \Delta t \quad (15)$$

$V_{ss,t+\Delta t}$ De vochtberging van de ondergrond aan het einde van de tijdstap (m)

$V_{ss,t}$ De vochtberging van de ondergrond aan het begin van de tijdstap (is aan het eind van de vorige tijdstap) (m)

$V_{ss,eq}$ Evenwichtsvochtberging van de ondergrond (m)

q_{rz} Capillaire opstijging van de ondergrond ($q_{rz} > 0$) of percolatie naar de ondergrond ($q_{rz} < 0$) (m.d⁻¹)

q_{phr} Capillaire opstijging van verzadigde zone ($q_{phr} > 0$) of percolatie naar de verzadigde zone ($q_{phr} < 0$) (m.d⁻¹)

Percolatie naar de verzadigde zone wordt op dezelfde manier berekend als percolatie naar de ondergrond. Als $V_{ss,t+\Delta t} > V_{ss,eq}$, dan: $q_{phr} \cdot \Delta t = V_{ss,t+\Delta t} - V_{ss,eq}$ (16)

A1.6 Vochttekortverdeling

De opwaartse, capillaire fluxen tussen de reservoirs zijn berekend door de actuele drukken op de gegeven locaties in de reservoirs te gebruiken. Deze drukken worden bepaald met de bodemfysische relaties. Het actuele vochttekort voor de ondergrond wordt berekend uit het evenwicht en actuele vochtgehalte ($\Delta V_{ss} = V_{ss,eq} - V_{ss,t+\Delta t}$), zie ook Figuur 11-4. De verdeling van het vochtgehalte tekort wordt berekend met:

$$\Delta\theta(z) = d \cdot (e^{b(z-C)} - 1) \quad (17)$$

$\Delta\theta(z)$ Vochtgehalte tekort als functie van de verticale coördinaat (-)

b Vormfactor van het evenwichtsvochtgehalte (-)
 d Integratieparameter (-)

$$\text{De vormfactor } b \text{ is gedefinieerd als: } b = \frac{\theta_{ss,sat} - \theta_{ss,t,eq}}{V_{ss,eq}} \quad (18)$$

En de integratieparameter: $d = \frac{\Delta V_{ss}}{\frac{1}{b} \left(e^{b(H_{ss} - C)} - 1 \right) - H_{ss} + C}$ (19)

H_{ss} Dikte van de ondergrond (m)

C Positie in de ondergrond waar het tekort plaats vindt (m)

$V_{ss,eq}$ Het volumetrisch vochtgehalte van de ondergrond voor het evenwichtsvochtprofiel (m)

$\theta_{ss,sat}$ Verzadigd vochtgehalte van de ondergrond (gelijk aan porositeit) (-)

$\theta_{ss,t,eq}$ Vochtgehalte in de top van de ondergrond voor evenwichtscondities. (-)

Aangenomen wordt dat de parameter C afhankelijk is van de dikte van de ondergrond en de inverse van de van Genuchten parameter α . Het verloop van C als functie van H is weergegeven in Figuur 11-4, en volgt uit de volgende relaties:

$C=0$ voor $0 \leq H_{ss} < \beta$

$C=0.25(H_{ss}-\beta)$ voor $\beta \leq H_{ss} < 2\beta$

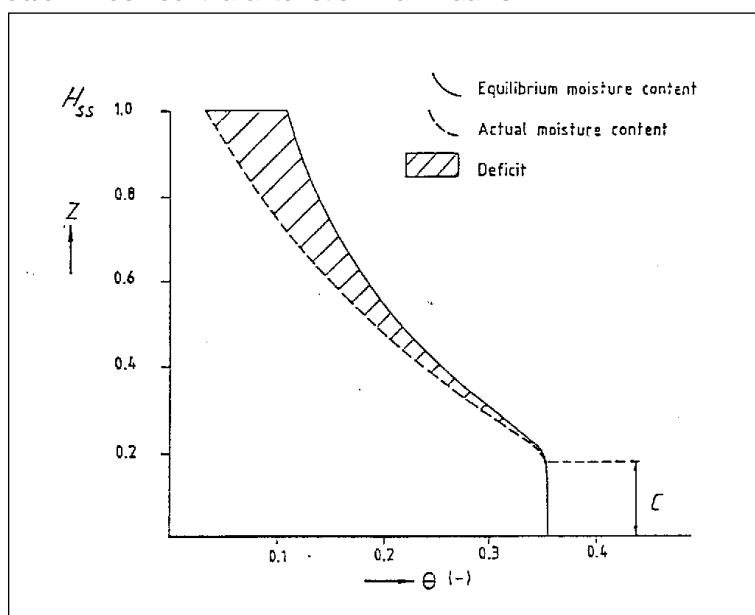
$C=\beta-\gamma \cdot e^{-\eta H_{ss}}$ voor $H_{ss} \geq 2\beta$

(20)

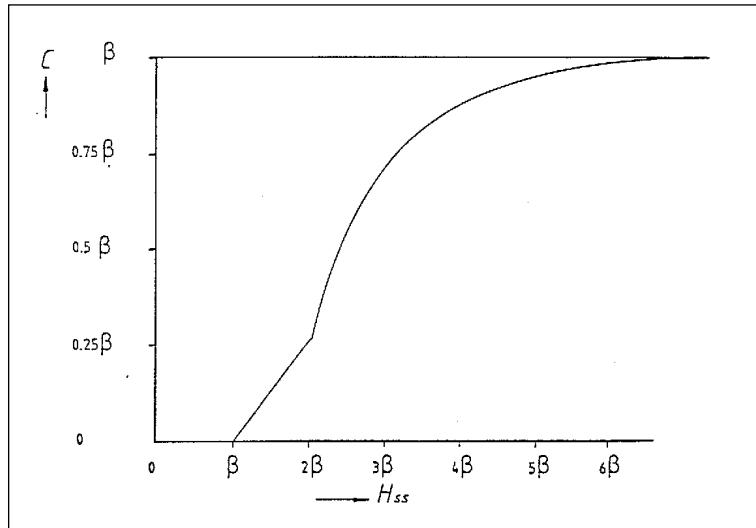
waarin:

$$\gamma = 0.01 \beta e^{3\eta}; \quad \eta = \frac{4.3175}{3-2\beta} \quad \text{en} \quad \beta = \frac{0.01}{\alpha}$$

De van Genuchtenparameter α (m^{-1}) komt ongeveer overeen met de inverse van de drukhoogte h waar $d\theta/dh$ in de vochtcharakteristiek maximaal is.



Figuur 11-4: Vochtgehalteverdeling berekend met de bodemfysische eigenschappen (IWACO, 1992)



Figuur 11-5: De factor C (m) uitgezet tegen de dikte van de ondergrond in meters (IWACO, 1992)

A1.7 Berekening van de capillaire opstijging

De capillaire opstijging naar de wortelzone is berekend met:

$$q_{rz} = K_{H_{ss}} \left(\frac{-h_{brz,a}}{H_{ss}} - 1 \right) \quad (21)$$

$h_{brz,a}$ Actuele drukhoogte aan de onderkant van de wortelzone en aangenomen aan het einde van de tijdstap (m)

H_{ss} Top van de ondergrond, gelijk aan onderkant van de wortelzone (verticale coördinaat ten opzichte van de verzagde zone) (m)

$K_{H_{ss}}$ Doorlatendheid in de top van de ondergrond, aangenomen aan het eind van de tijdstap ($m \cdot d^{-1}$)

De waarde van $K_{H_{ss}}$ wordt verkregen door het actuele relatieve vochtgehalte aan de top van de ondergrond

te berekenen ($\theta_{H_{ss},a} = \theta_{H_{ss},eq} - \Delta\theta_{H_{ss}}$) en de Van Genuchten relaties toe te passen. Het stijghoogteverschil voor de Darcy vergelijking is hier het gemiddelde stijghoogteverschil over de hele ondergrond. Eigenlijk moet het stijghoogteverschil rond de top van de ondergrond genomen worden, omdat de doorlatendheid van de top van de ondergrond wordt gebruikt. In Fluzo wordt de aannname gedaan dat het stijghoogteverschil rond de top van de ondergrond gelijk is als het gemiddelde stijghoogteverschil van de ondergrond. In werkelijkheid is het verloop van het stijghoogte verschil niet lineair en wordt de stijghoogte gradiënt dichter bij maaiveld groter. De berekening van de capillaire opstijging met behulp van bodemfysische eigenschappen kan daarom een fout in de berekening veroorzaken. Het gebruik van de Richardsvergelijking, waarmee de werkelijke stroming door de bodem berekend wordt is nauwkeuriger. Het gebruik van de Richardsvergelijking is niet onderzocht, omdat het simpele concept van het bakjesmodel dan verdwijnt. Ook is bij het ontwikkelen van Fluzo, het model met andere onverzagde zone modellen getest, wat goede resultaten gaf.

De capillaire opstijging van de verzagde zone naar de ondergrond wordt op vergelijkbare wijze berekend

als de capillaire opstijging van de ondergrond naar de wortelzone: $q_{phr} = K_{0.75H_{ss}} \left(\frac{-h_{H_{ss},a}}{H_{ss}} - 1 \right)$

(22)

De waarde van $K_{0.75H_{ss}}$ wordt verkregen door het actuele relatieve vochtgehalte op drie kwart van de hoogte van de ondergrond te berekenen ($\theta_{0.75H_{ss},a} = \theta_{0.75H_{ss},eq} - \Delta\theta_{0.75H_{ss}}$) en de bodemfysische relaties toe te passen.

 $h_{H_{ss},a}$

Actuele drukhoogte aan de top van de ondergrond, aangenomen aan het einde van de tijdstap (m)

 H_{ss}

Top van de ondergrond, gelijk aan onderkant van de wortelzone (verticale coördinaat ten opzichte van de verzagde zone) (m)

 $K_{0.75H_{ss}}$

Doorlatendheid op driekwart van de hoogte van de ondergrond, aangenomen aan het eind van de tijdstap (m.d⁻¹)

A1.8 Algemene werking programma

In Fluzo zitten databestanden voor bodem en gewas. Daarnaast moeten extra parameters worden ingevoerd. Eerst zullen de extra parameters behandeld worden en daarna de databestanden.

A1.8.1 Ingevoerde parameters

De parameters die zelf ingevoerd moeten worden zijn in Tabel 11-1 opgenomen. De neerslag en verdamping worden als een tijdsreeks opgegeven. Voor de bodemtypes en het landgebruik kan uit 18 verschillende soorten worden gekozen en moet voor alle knooppunten worden opgegeven. De landgebruiken bestaan uit landbougewassen, bomen, kale grond, open water en bebouwing. De bodemtypes bestaan uit de bodems van de Staringreeks.

Ook moet de grondwaterstand onder maaiveld opgegeven worden, deze vormt de onderrandvoorwaarde van het model. De grondwaterstand kan op drie verschillende manieren berekend worden. Er kan per knooppunt een vaste grondwaterstand ten opzichte van maaiveld ingevoerd worden. De tweede mogelijkheid is om de grondwaterstand uit de tijdsafhankelijke Triwaco berekening in Fluzo in te voeren. De laatste mogelijkheid is om Fluzo de grondwaterstand zelf te laten berekenen. Hiervoor moet een begingrondwaterstand berekend worden. Aan de hand van de hoeveelheid grondwateraanvulling of capillaire opstijging gaat de grondwaterstand omhoog of omlaag.

Tabel 11-1: Verschillende invoer parameters voor Fluzo

Soort parameter	Parameternaam	Opmerkingen
Neerslag	PR	Tijdsafhankelijk
Verdamping	EV	Tijdsafhankelijk
Bodemtype van de wortelzone	RZ	Keuze uit 18 bodemsoorten
Bodemtype van de ondergrond	SS	Keuze uit 18 bodemsoorten
Landgebruik	LU	Keuze uit 18 landgebruiken
Diepte grondwaterstand onder maaiveld	GW	Onderrandvoorwaarde
Hoogte Maaiveld	GL	

A1.8.2 Databestanden

Tabel 11-2: Databestanden in Fluzo

Soort data	Databestand
Bodemdata	Soil.dat
Gewasfactoren Makkink	Cropf-m.dat
Gewasfactoren Penman	Cropf-p.dat
Bedekkingsgraad	Soilcov.dat
Sink term α , dikte wortelzone	Sink.dat
Maximale interceptiecapaciteit	Intcap.dat

Bijlage 2: Update onverzadigde zone modellering

Inleiding

Deze bijlage geeft een overzicht van de actualisatie van het onverzadigde zonemodel FLUZO en een beoordeling van de resultaten.

Methode

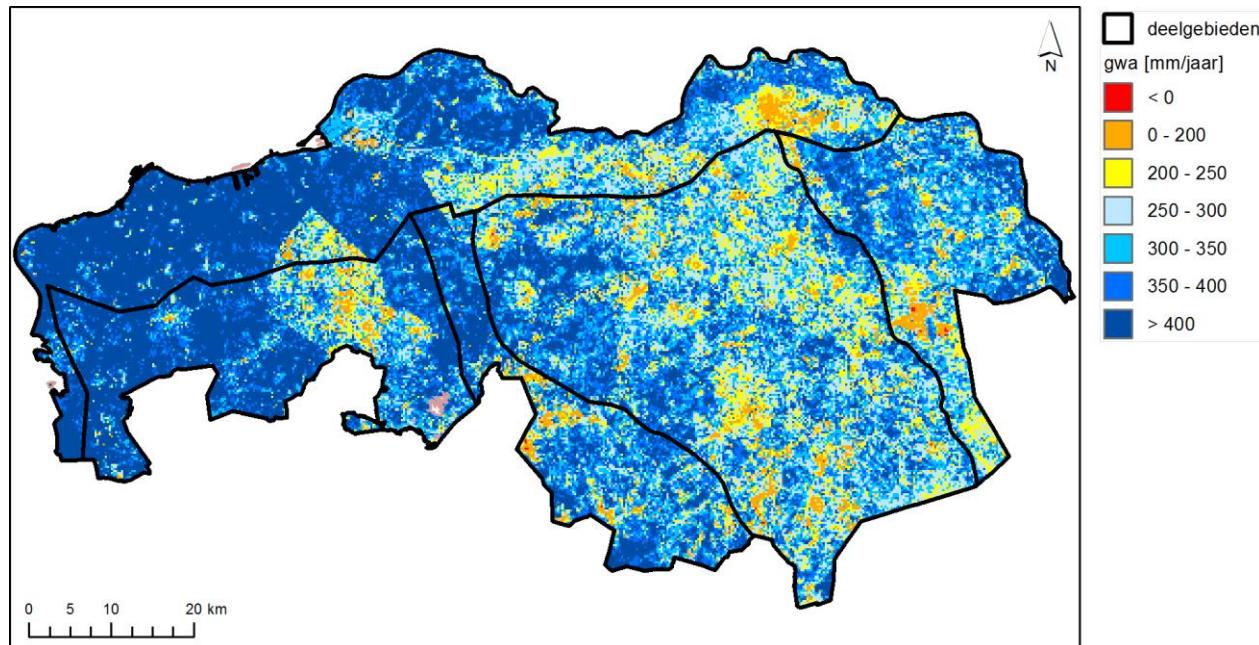
Voor HGK zijn de volgende aanpassingen overwogen:

1. Update Staring bodemparameters.
2. Van PAWN naar BOFEK bodemkaart en bodemeenheden.
3. Grawasfactoren op basis van Metaswap.

Om het effect van deze aanpassingen te bepalen is gebruik gemaakt van het Brabantmodel versie 2017 toegepast in de Draagkracht studie (Royal Haskoning, 2017c) en dus niet met het uiteindelijke model dat in het hoofdrapport is beschreven. Het 2017 model wordt als referentie gebruikt. Met de drie bovengenoemde aanpassingen is een tijdsafhankelijke berekening gedaan van de periode 1997 t/m 1999. Het jaar 1998 was zeer nat. Hierdoor valt de gemiddelde grondwateraanvulling over de rekenperiode hoger uit dan het langjarig gemiddelde. De periode 1997 – 1999 is gebruikt omdat dit aan het begin van de rekenperiode zit en dit de meest praktische werkwijze was. De berekende grondwateraanvulling is ruimtelijk en temporeel vergeleken met het referentiemodel. Deze vergelijking is gemaakt met een tussenversie van het grondwatermodel. De beregeningsmodule is bijvoorbeeld niet aangezet. We verwachten dat de uitkomsten van de vergelijking gepresenteerd in deze bijlage op hoofdlijnen niet verandert.

Referentie

Met het referentiemodel wordt een gemiddeld grondwateraanvulling van circa 360 mm/jaar berekend (zie Tabel 11-3 voor de berekende grondwateraanvulling per deelgebied). De resultaten kunnen goed gebruikt worden om het effect van de drie aanpassingen te beoordelen. De resultaten moeten niet als een gemiddeld jaar of effect beoordeeld worden.



Figuur 11-6: Gemiddelde grondwateraanvulling 1997 – 1999

Tabel 11-3: Gemiddelde grondwateraanvulling 1997 – 1999 per variant

Deelgebied	Referentie [mm/jaar]	Staring 2001 [mm/jaar]	Bofek2012* [mm/jaar]	Metaswap gewasfactoren [mm/jaar]
West-Brabant	400	416	373	435
Kempisch Plateau	361	381	340	393
Centrale Slenk	322	341	308	367
Peelhorst	328	345	310	374
Peilgestuurd	398	399	355	434
gemiddeld	359	372	334	399

Bodemparameters Staringreeks 2001

FLUZO maakt gebruik van de Mualem-Van Genuchten relaties tussen drukhoogte en bodemvochtgehalte en drukhoogte en onverzadigde doorlatendheid (Schaap et al., 2005). Deze relaties bepalen het bodemvochtprofiel in functie van de dikte van de onverzadigde zone en de aanvulling. De Staringreeks legt de koppeling tussen de Van Genuchten relaties en de bodemkaart en bevat gemiddelde parameterwaarden voor de 36 belangrijkste Nederlandse textuurklassen (Wosten et al., 2001). Deze textuurklassen bestaan uit 18 boven- en 18 ondergronden, ook wel bodemfysische bouwstenen genoemd. De gemiddelde parameterwaarden uit de Staringreeks zijn gebaseerd op gemeten bodemfysische karakteristieken. De Staringreeks is in 1987 voor het eerst uitgebracht en daarna tweemaal geactualiseerd op basis van een groter aantal gemeten bodemkarakteristieken. De volgende versies zijn beschikbaar:

- 1987 (273 karakteristieken).
- 1994 (620 karakteristieken).
- 2001 (832 karakteristieken).

Het referentiegrondwatermodel gebruikt de oorspronkelijke Staringreeks uit 1987. We hebben de oorspronkelijke Staringreeks vervangen door de meest recente versie uit 2001. Er zijn grote verschillen tussen Staringreeks 1987 en Staringreeks 2001 in de verzadigde doorlatendheid Ksat (Tabel 11-4 en Tabel 11-5). In de Staringreeks 2001 zijn de doorlatenheden gebaseerd op meer recente kennis.

Tabel 11-4: Staringreeks voor de bovengronden afgeleid in 1987 en in 2001

1987						2001					
Type	teta(sat) [-]	K(sat) [cm/d]	alfa [1/cm]	n [-]	I [-]	teta(sat) [-]	K(sat) [cm/d]	alfa [1/cm]	n [-]	I [-]	
B1	0,37	33,34	0,0208	1,646	0,571	0,43	23,41	0,0234	1,801	0	
B2	0,43	32,21	0,0224	1,436	-0,304	0,42	12,52	0,0276	1,491	-1,06	
B3	0,45	17,81	0,0152	1,412	-0,213	0,46	15,42	0,0144	1,534	-0,215	
B4	0,42	54,8	0,0163	1,559	0,177	0,46	29,22	0,0156	1,406	0	
B5	0,33	223	0,0524	1,912	0,873	0,36	52,91	0,0452	1,933	-0,359	
B6	0,41	5,48	0,0291	1,152	-6,864	0,38	100,69	0,0222	1,238	-1,747	
B7	0,4	25,1	0,0158	1,287	0,248	0,4	14,07	0,0194	1,25	-0,802	
B8	0,4	22,9	0,0313	1,2	-3,578	0,43	2,36	0,0099	1,288	-2,244	
B9	0,44	25,6	0,0231	1,212	-2,22	0,43	1,54	0,0065	1,325	-2,161	
B10	0,44	31,1	0,0519	1,126	-6,552	0,43	0,7	0,0064	1,21	-3,884	
B11	0,51	63,6	0,1562	1,099	-8,067	0,59	4,53	0,0195	1,109	-5,901	
B12	0,57	98,2	0,1689	1,068	-10,286	0,54	5,37	0,0239	1,094	-5,681	
B13	0	0	0	0	0	0,42	12,98	0,0084	1,441	-1,497	
B14	0,43	57,42	0,0207	1,224	-2,077	0,42	0,8	0,0051	1,305	0	
B15	0,4	25,1	0,0158	1,287	0,248	0,53	81,28	0,0242	1,28	-1,476	
B16	0,73	13,44	0,0134	1,32	0,534	0,8	6,79	0,0176	1,293	-2,259	
B17	0,71	34,8	0,0284	1,141	1,086	0,72	4,46	0,018	1,14	-0,35	
B18	0,71	34,8	0,0284	1,141	1,086	0,77	6,67	0,0197	1,154	-1,845	

Tabel 11-5: Staringreeks voor de ondergronden afgeleid in 1987 en in 2001

1987						2001					
Type	teta(sat) [-]	K(sat) [cm/d]	alfa [1/cm]	n [-]	I [-]	teta(sat) [-]	K(sat) [cm/d]	alfa [1/cm]	n [-]	I [-]	
O1	0,35	99,7	0,022	2,186	0,796	0,36	15,22	0,0224	2,286	0	
O2	0,38	63,9	0,0182	1,87	0,911	0,38	12,68	0,0213	1,951	0,168	
O3	0,34	44,6	0,0265	1,543	-0,333	0,34	10,87	0,017	1,717	0	
O4	0,36	53,1	0,0216	1,54	-0,52	0,35	9,86	0,0155	1,525	0	
O5	0,33	223	0,0524	1,912	0,873	0,32	25	0,0521	2,374	0	
O6	0,41	5,48	0,0291	1,152	-6,864	0,33	33,92	0,0162	1,311	-1,33	
O7	0,4	25,1	0,0158	1,287	0,248	0,51	39,1	0,0123	1,152	-2,023	
O8	0,42	26,4	0,0248	1,321	-0,622	0,47	9,08	0,0136	1,342	-0,803	
O9	0,41	24	0,028	1,283	-1,559	0,46	2,23	0,0094	1,4	-1,382	
O10	0,44	25,6	0,0231	1,212	-2,22	0,48	2,12	0,0097	1,257	-1,879	
O11	0,42	61	0,042	1,125	-3,706	0,42	13,79	0,0191	1,152	-1,384	
O12	0,49	10,8	0,0384	1,113	-6,743	0,56	1,02	0,0095	1,158	-4,295	
O13	0,58	38	0,1122	1,063	-12,538	0,57	4,37	0,0194	1,089	-5,955	
O14	0,43	57,42	0,0207	1,224	-2,077	0,38	1,51	0,003	1,728	-0,292	
O15	0,43	57,42	0,0207	1,224	-2,077	0,41	3,7	0,0071	1,298	0,912	
O16	0,87	14,66	0,0179	1,275	0,539	0,89	1,07	0,0103	1,376	-1,411	
O17	0,89	30,45	0,0145	1,252	1,019	0,86	2,93	0,0123	1,276	-1,592	
O18	0,71	34,8	0,0284	1,141	1,086	0,57	34,45	0,0138	1,323	-1,204	

De vereenvoudigde eenheden van de PAWN bodemkaart zijn met een koppeltabel verbonden met de boven- en ondergronden van de Staringreeks (Tabel 11-6). De koppeltabel bevat 18 unieke combinaties van boven- en ondergrond. De koppeling is tot stand gekomen op basis van expertkennis door te zoeken naar de bodemtypes die het meest met elkaar overeenkomen.

Tabel 11-6: Koppeltabel tussen PAWN codes en Staringreeks

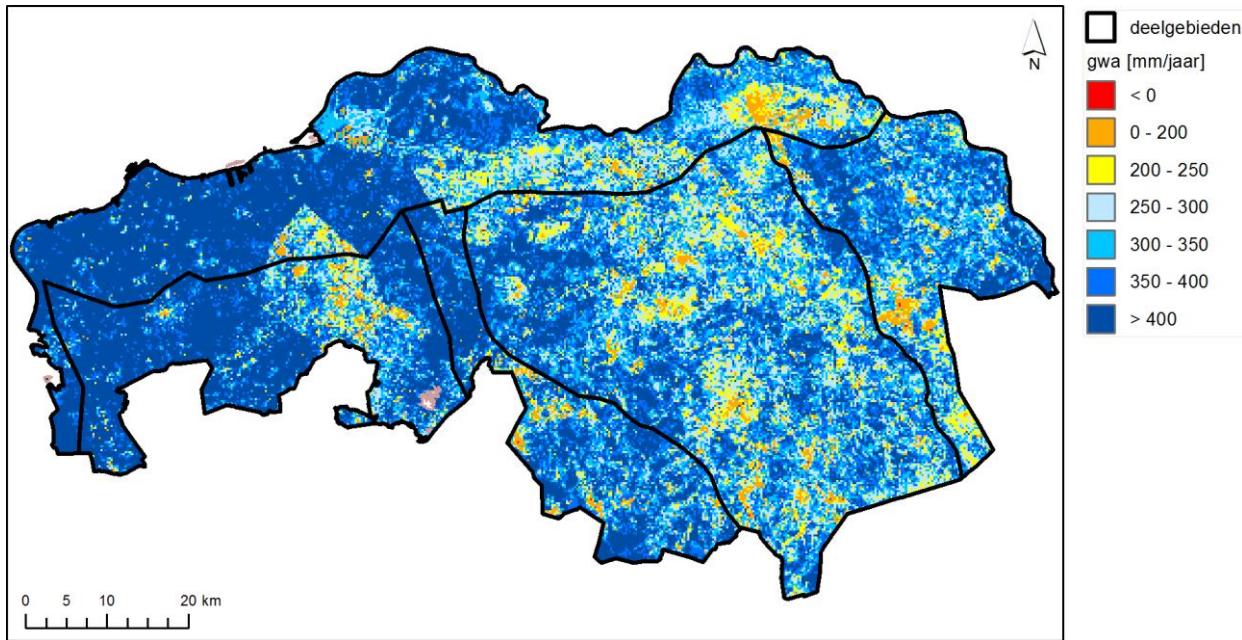
PAWN	Staring 2001		PAWN	Staring 2001	
code	bovengrond	code	bovengrond	code	
1	18	17	13	3	3
2	16	2	14	1	5
3	11	17	15	8	9
4	18	2	16	10	10
5	16	2	17	12	13
6	18	12	18	12	17
7	1	1	19	8	2
8	1	1	20	8	5
9	2	2	21	14	15
10	2	5	22	1	1
11	3	6	23	1	1
12	2	2	12	2	2

De Staringreeks 2001 is verwerkt in een parameterbestand van FLUZO voor een tijdsafhankelijke berekening. De berekende grondwaternauvulling en verschillen ten opzichte van het referentiemodel zijn weergegeven in Tabel 11-7, Figuur 11-7, Figuur 11-8 en Figuur 11-9. Aanpassing van de nieuwe bodemparameters geeft:

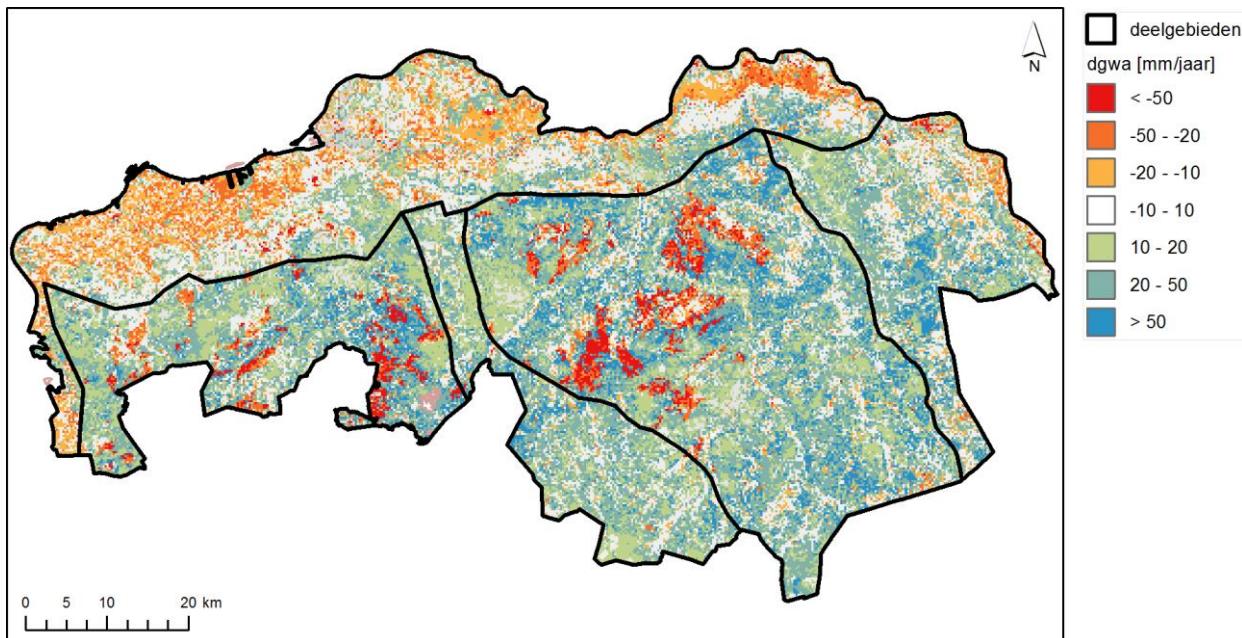
- een toename van de grondwaternauvulling op de hoger gelegen zandige gronden;
- een afname van de grondwaternauvulling op lemige gronden;
- een afname van de grondwaternauvulling op de kleigronden in het peilgestuurde gebied;
- weinig verandering in de beekdalen.

Uit nadere analyse blijkt onder meer dat met Staringreeks 2001 op zwak lemige zandgronden minder capillaire nalevering wordt berekend. Hierdoor wordt verdamping in de zomer beperkt, waardoor de jaarlijkse grondwaternauvulling toeneemt. Andersom wordt voor sterk lemig zand op (kei-)leem meer capillaire nalevering en dus meer verdamping berekend, zodat de grondwaternauvulling afneemt. Dit is te zien in de maandelijkse grondwaternauvulling weergegeven in Figuur 11-10 en Figuur 11-11. Het referentiemodel berekent meer capillaire nalevering op zwak lemige zandgronden dan op sterk lemig zand. Dit is niet waarschijnlijk, omdat meer capillaire werking wordt verwacht van sterk lemig zand omdat leem meer water kan vasthouden. Met de Staringreeks 2001 is de verhouding wel zoals verwacht. Op klei, veen en zavel wordt met Staringreeks 2001 minder nauvulling berekend, omdat de berekende zomerse verdamping groter is.

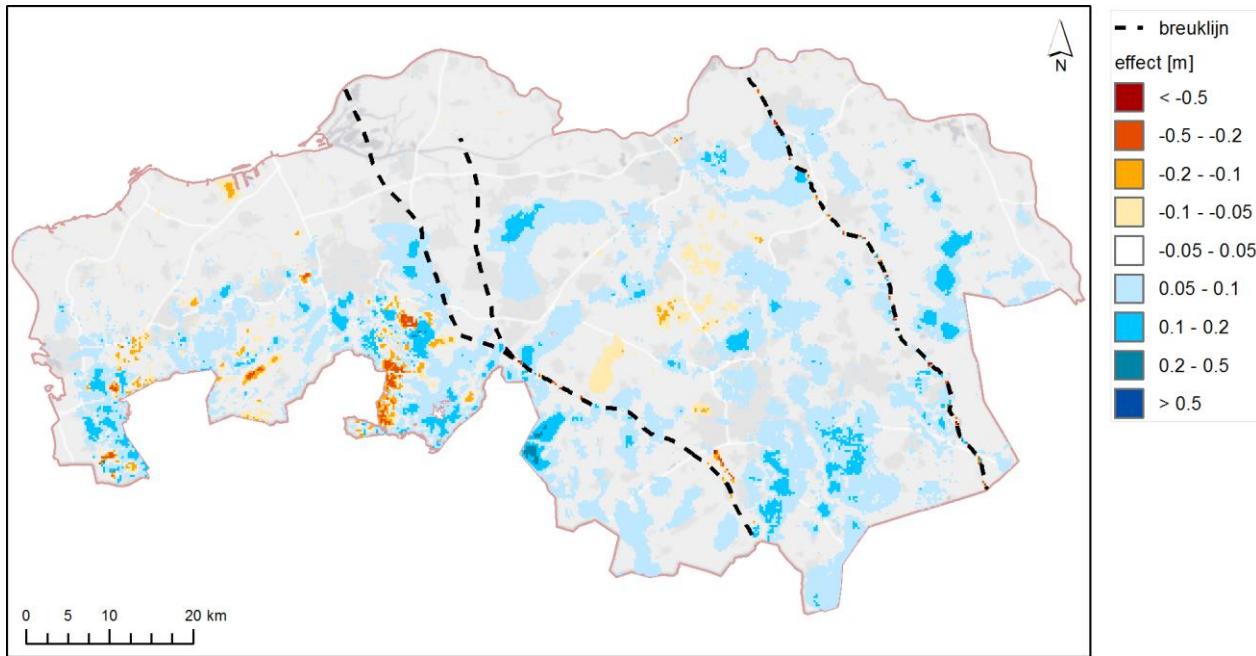
Gemiddeld is er een hogere grondwaternauvulling per deelgebied, behalve in het peilgestuurde gebied. Hier blijft de grondwaternauvulling gelijk. Gemiddeld over de hele provincie bedraagt de grondwaternauvulling 372 mm/jaar.



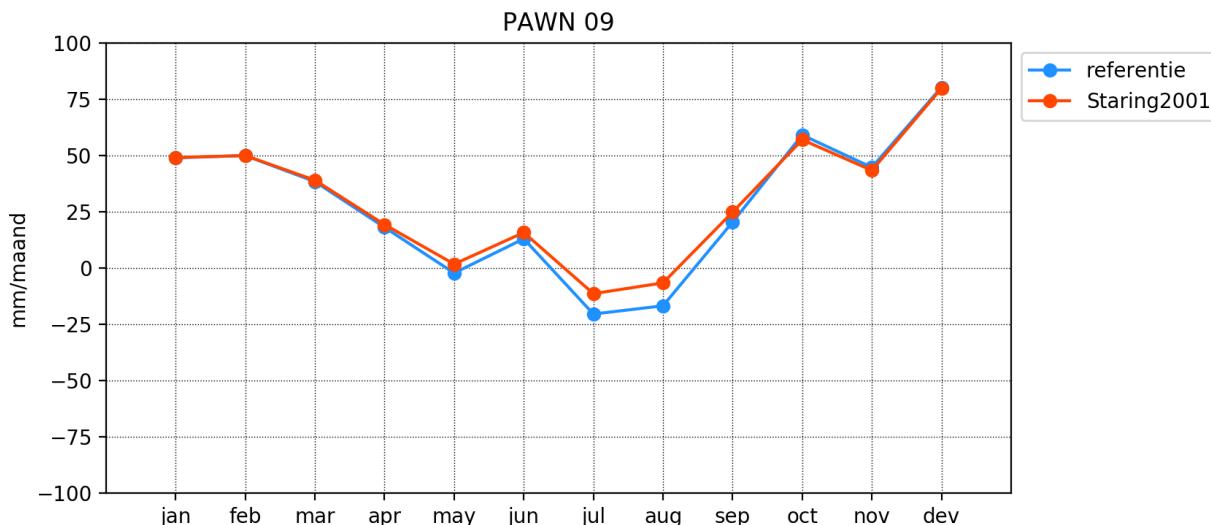
Figuur 11-7: Gemiddelde grondwaternaavulling 1997 – 1999, variant Staring 2001



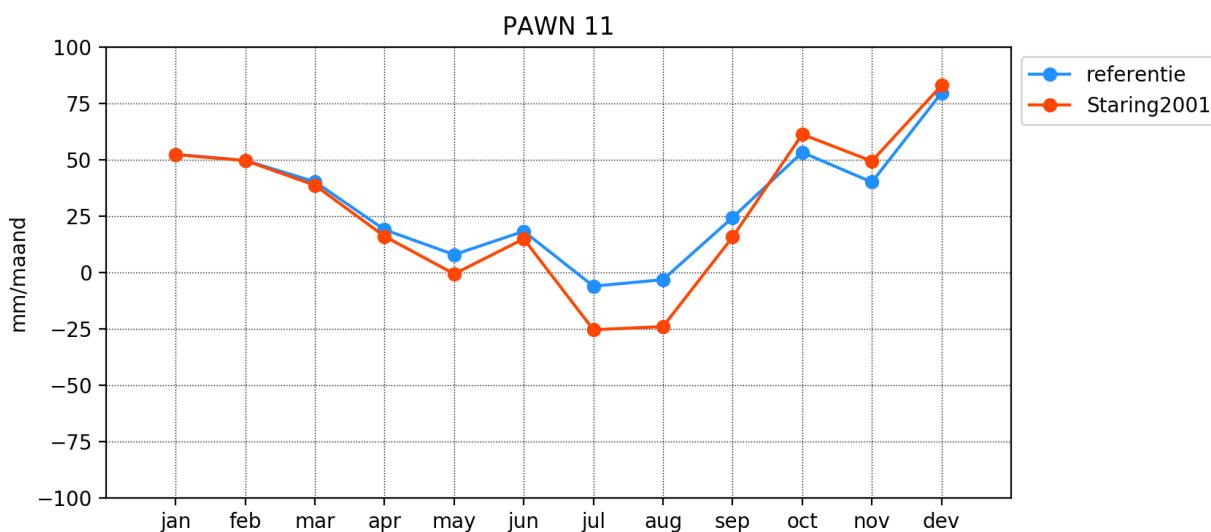
Figuur 11-8: Effect grondwaternaavulling 1997 – 1999, variant Staring 2001 t.o.v. referentie



Figuur 11-9: Effect grondstand 1997 – 1999, variant Staring 2001 t.o.v. referentie



Figuur 11-10: Grondwaternaavulling per maand (1997-1999) voor bodemtype PAWN 9 (zwak lemig fijn zand)



Figuur 11-11: Grondwaternaavulling per maand (1997-1999) voor bodemtype PAWN 11 (sterk lemig fijn zand op (kei-)leem)

Tabel 11-7: Gemiddelde grondwateraanvulling per jaar in de periode 1997 t/m 1999 per PAWN bodemeenheid, variant Staring 2001

PAWN code	PAWN omschrijving	referentie [mm/jaar]	Staring 2001 [mm/jaar]	verschil [mm/jaar]
1	veraarde bovengrond op diep veen	325	324	-1
2	veraarde bovengrond op veen op zand	273	278	5
3	kleidek op veen	371	355	-16
4	kleidek op veen op zand	374	369	-5
5	zanddek op veen op zand	306	310	4
6	veen op ongerijpte klei	337	323	-14
7	stuifzand	357	382	25
8	leemarm zand	329	350	22
9	zwaklemig fijn zand	332	360	28
10	zwaklemig fijn zand op grof zand	363	383	21
11	sterk lemig fijn zand op (kei-)leem	374	329	-45
12	enkeerdgronden	360	386	26
13	sterk lemig fijn zand	364	369	5
14	grob zand	372	391	20
15	zavel met homogeen profiel	386	373	-13
16	lichte klei met homogeen profiel	390	381	-9
17	klei met zware tussenlaag of ondergrond	420	396	-23
18	klei op veen	417	423	6
19	klei op fijn zand	349	354	5
20	klei op grof zand	313	309	-5
21	leem	336	336	0
22	water	309	312	3
23	bebouwing	324	343	19

Bodemkaart BOFEK2012

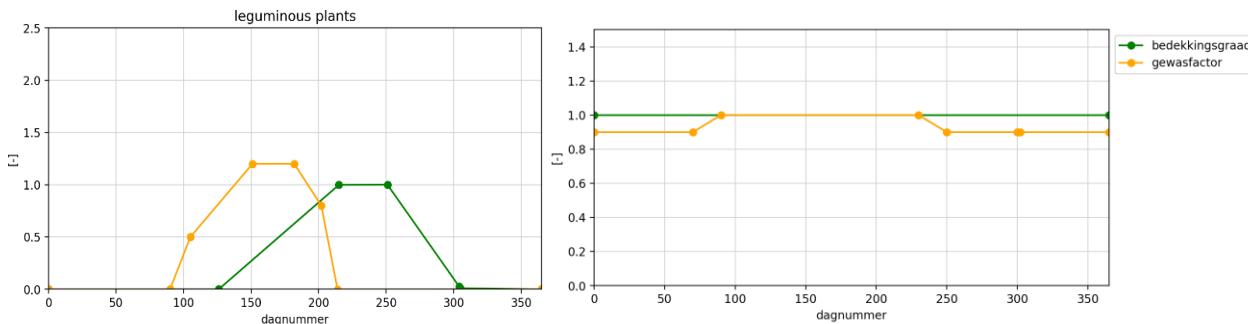
In het referentiemodel worden de bodemfysische parameters van de Staringreeks gekoppeld aan de eenheden van de PAWN bodemkaart (Figuur 11-13). De PAWN bodemkaart bevat 21 bodemfysische eenheden. Alterra heeft in 2012 de opvolger van PAWN uitgebracht, de BOFEK2012 bodemkaart (Figuur 11-4).

Deze bodemkaart bevat 72 bodemfysische eenheden en is ontstaan uit een clustering van 315 bodemeenheden op basis van overeenkomstig hydrologisch gedrag en profielopbouw (Wosten et al., 2013).

De BOFEK2012 is ingevoerd in een variant van het referentiemodel. Hiertoe is een nieuwe koppeltabel samengesteld tussen de eenheden van BOFEK en de bodemfysische bouwstenen van Staringreeks 2001. Deze tabel bevat 37 unieke combinaties van boven- en ondergrond en is opgenomen als Tabel 4-6 in het hoofdrapport. Een koppeltabel tussen BOFEK en de oude Staringreeks, is niet beschikbaar en niet doorgerekend. Ten opzichte van PAWN is het aantal bodemeenheden toegenomen. Hierdoor neemt de rekentijd en de bestandsgrootte toe bij het aanmaken van de FLUZO database.

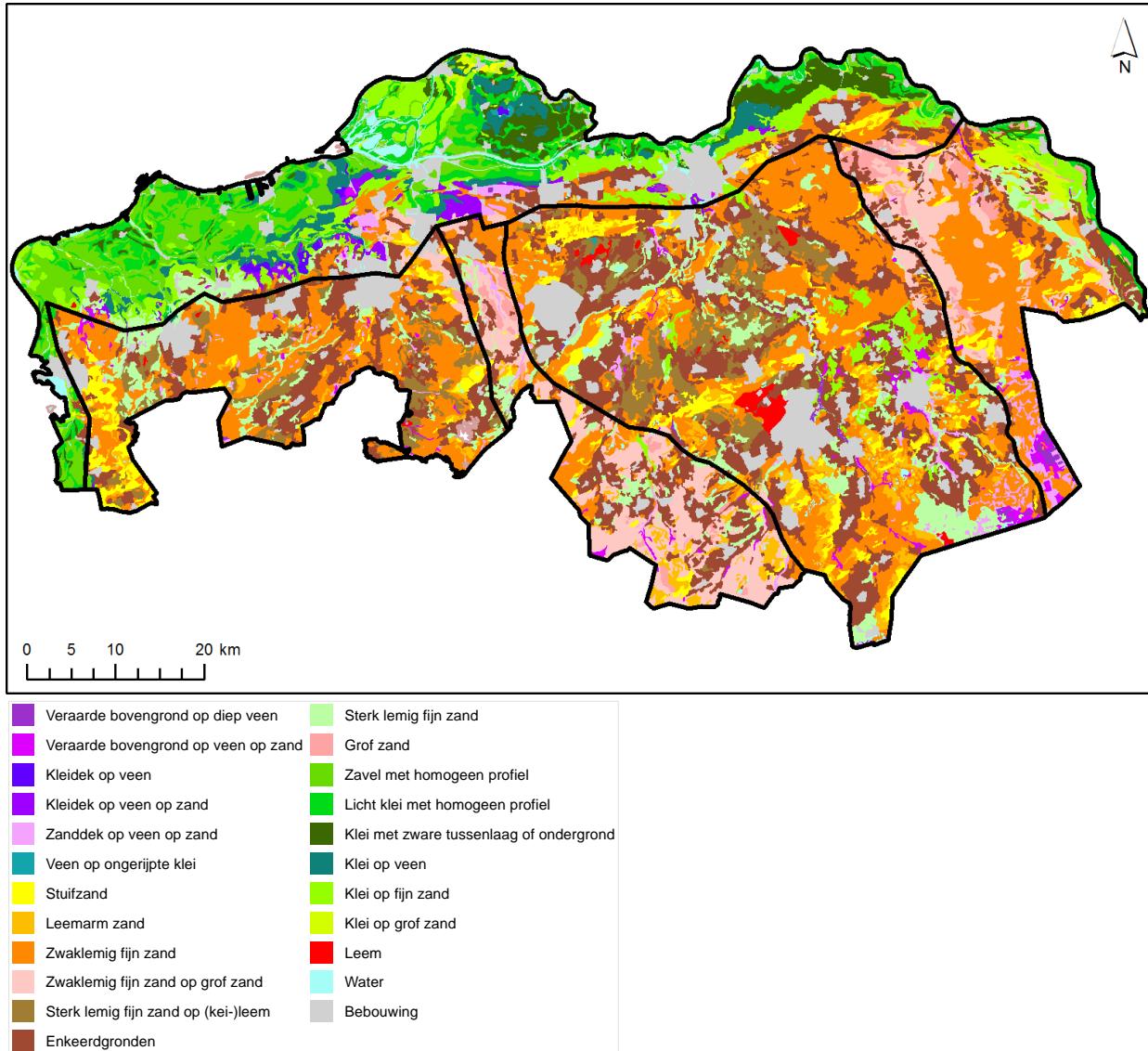
Controle gewasparameters

Bij het opzetten van deze modelvariant is gebleken dat de gewasparameters van het FLUZO grondgebruikstype "leguminous plants" (akkerbouw) niet kloppen. Dit grondgebruikstype wordt gebruikt voor LGN landgebruik overig landbouw (groente). Zoals te zien in Figuur 11-12 is de bodembedekkingsgraad verschoven in de tijd ten opzichte van de gewasfactor. Hierdoor werd voor een groot deel van het jaar gerekend met kale grondverdamping voor dit grondgebruikstype en werd de grondwateraanvulling overschat. Dit is gecorrigeerd door een ander FLUZO grondgebruikstype te kiezen voor overig landbouw ("alfalfa"). In deze modelvariant is dus zowel de bodemkaart als één van de gewassen aangepast.

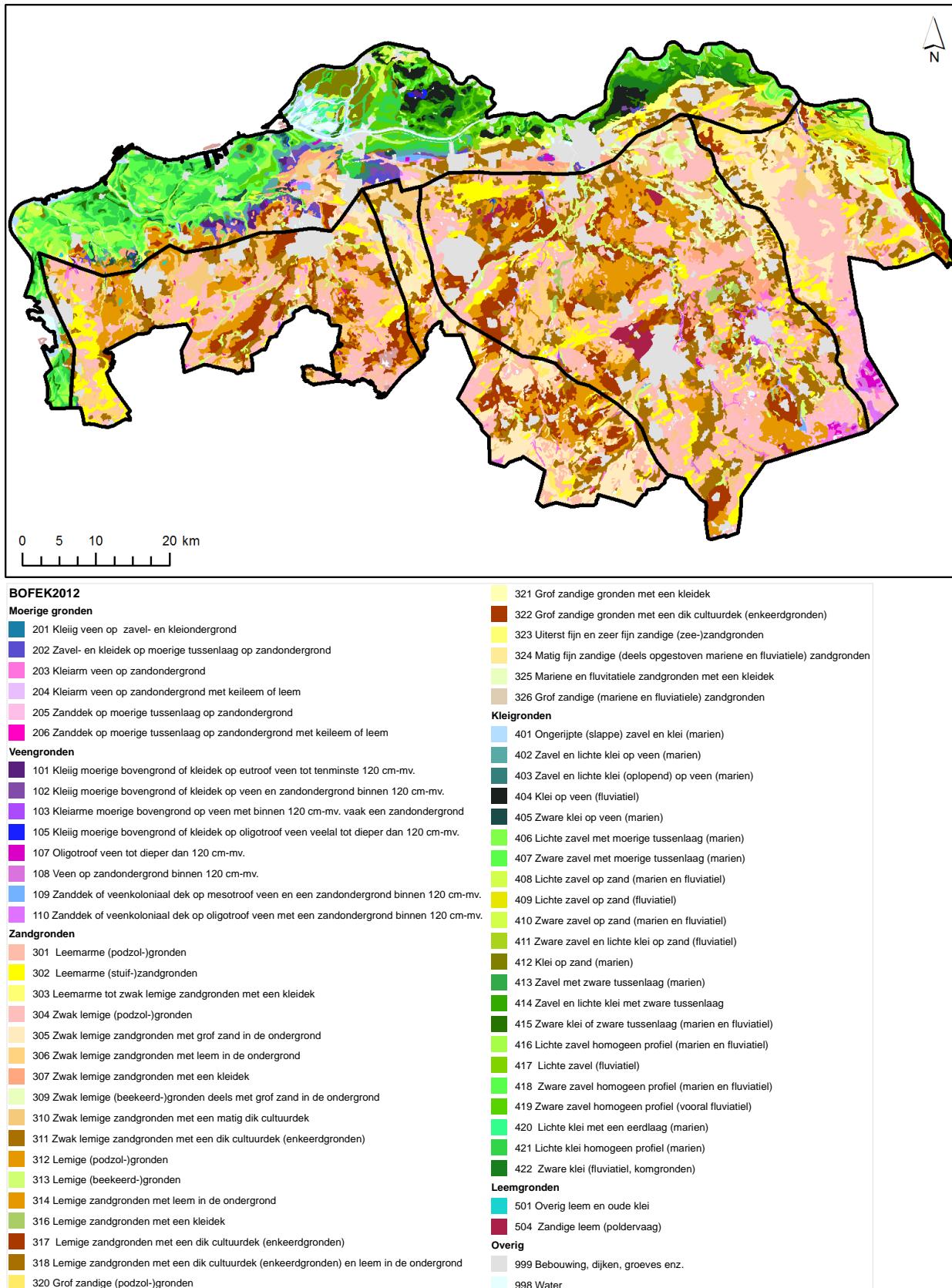


Figuur 11-12: Foutieve gewasfactoren en bodembedekkingsgraad overig akkerbouw ("leguminous plants"). Rechts: Gecorrigeerde grafiek (overgenomen uit "Alfalfa")

De grondwateraanvulling is dus in eerdere grondwatermodellen te hoog berekend voor akkerbouwgebieden. Ruim 5% van het oppervlak in Noord-Brabant is akkerbouw volgens de LGN6kaart. Dit ligt vooral in West-Brabant en het Peilgestuurde Gebied. Gemiddeld voor geheel Noord-Brabant wordt door deze fout 16 mm/jaar te veel grondwateraanvulling berekend.



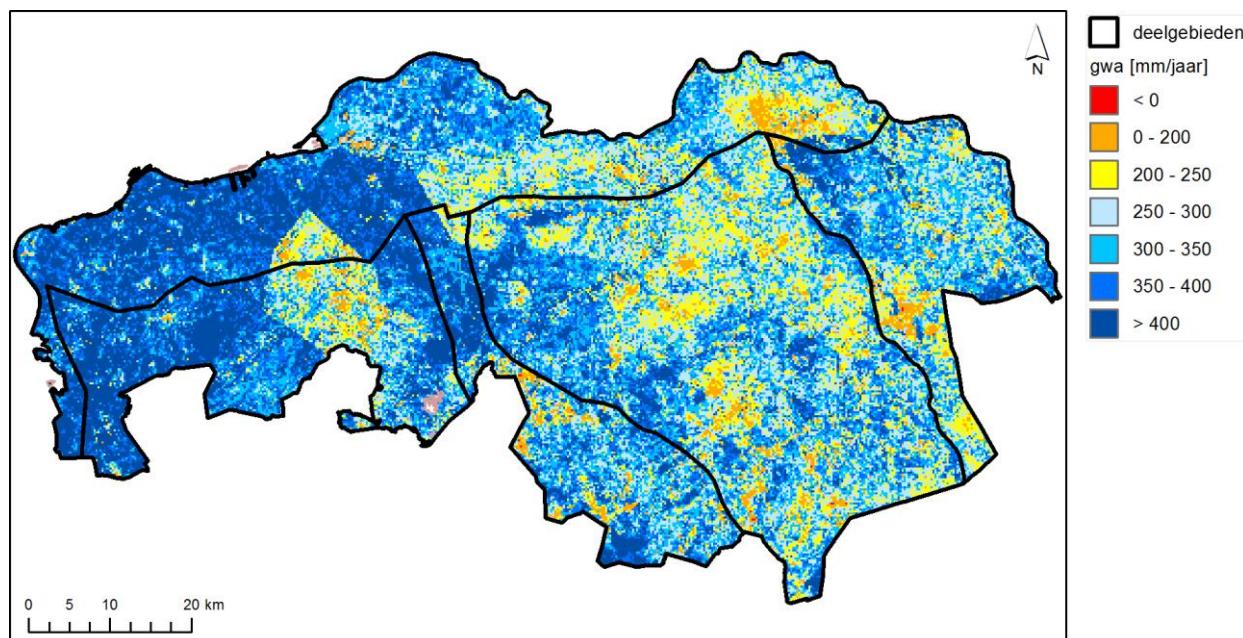
Figuur 11-13: PAWN Bodemkaart



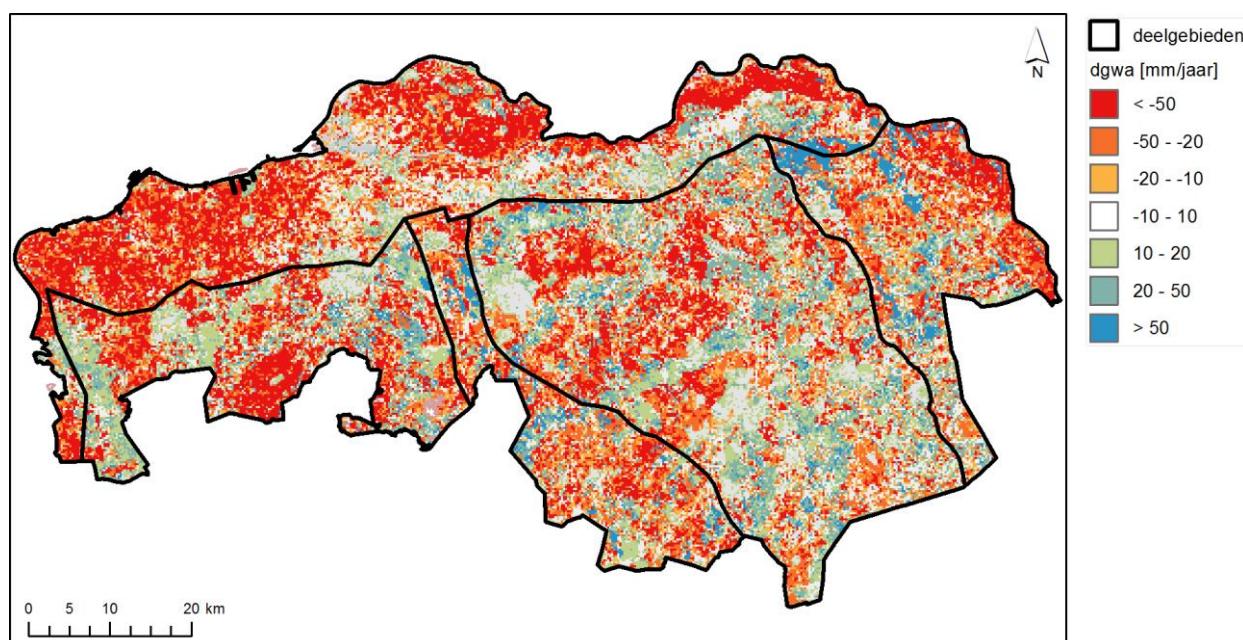
Figuur 11-14: BOFEK2012 bodemkaart

Berekende grondwaternaamvulling na aanpassing bodemkaart, Staringreeks en akkerbouw

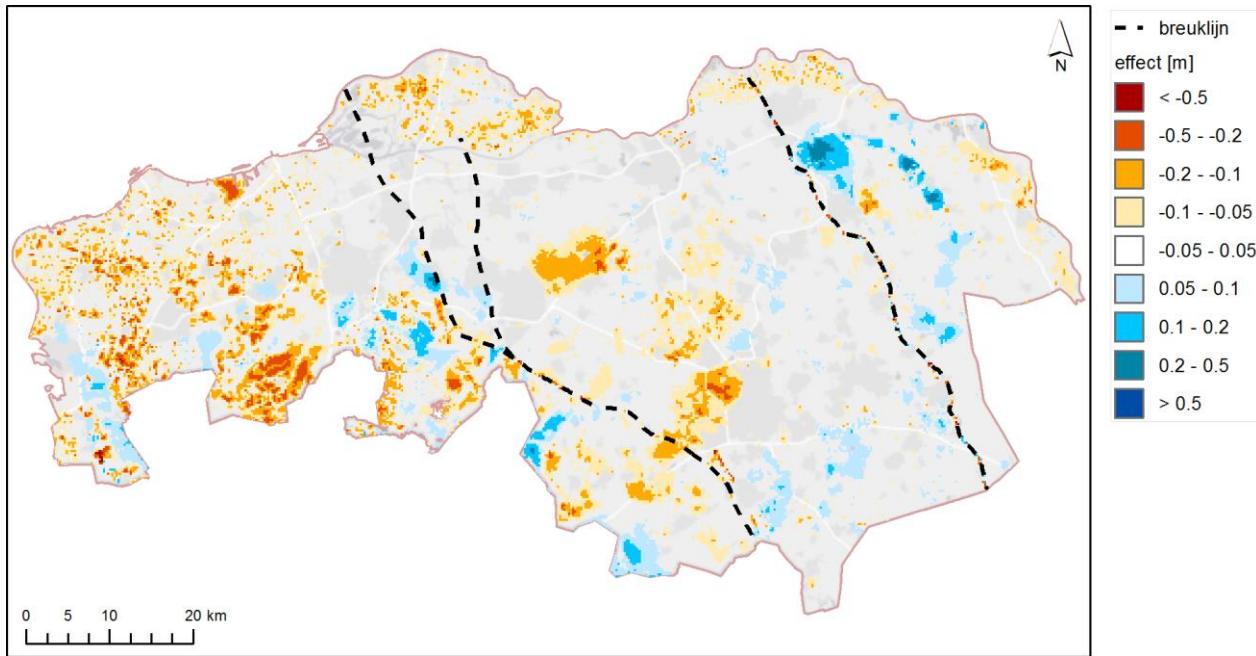
De berekende grondwaternaamvulling voor de periode 1997 t/m 1999 is weergegeven in Tabel 11-3, Tabel 11-8, Figuur 11-15, Figuur 11-16 en Figuur 11-17. De gemiddelde grondwaternaamvulling bedraagt 334 mm/jaar, lager dan het referentiemodel. De effectkaart (Figuur 11-16) en Tabel 11-9 laten zien dat de grondwaternaamvulling vooral afneemt op de kleigronden en de hoger gelegen lemige zand- en enkeerdgronden. De grondwaternaamvulling voor overig akkerbouw is zeer sterk afgangenomen (300 mm/jaar, zie Tabel 11-9). Dit komt door de correctie van de gewasparameters van dit grondgebruik. Door deze aanpassing is het effect van de bodemkaart minder goed zichtbaar.



Figuur 11-15: Gemiddelde grondwaternaamvulling 1997 – 1999, variant Bofek2012



Figuur 11-16: Effect grondwaternaamvulling 1997 – 1999, variant Bofek2012 t.o.v. referentie



Figuur 11-17: Effect grondwaterstand 1997 – 1999, variant Bofek2012 t.o.v. referentie

Tabel 11-8: Grondwateraanvulling 1997 t/m 1999 per PAWN bodemeenheid, variant BOFEK2012

PAWN code	Omschrijving	Referentie [mm/jaar]	BOFEK2012 [mm/jaar]	Verschil [mm/jaar]
1	veraarde bovengrond op diep veen	325	294	-31
2	veraarde bovengrond op veen op zand	273	257	-16
3	kleidek op veen	371	289	-83
4	kleidek op veen op zand	374	330	-44
5	zanddek op veen op zand	306	286	-20
6	veen op ongerijpte klei	337	310	-27
7	stuifzand	357	364	7
8	leemarm zand	329	339	10
9	zwaklemig fijn zand	332	304	-28
10	zwaklemig fijn zand op grof zand	363	303	-60
11	sterk lemig fijn zand op (kei-)leem	374	282	-92
12	enkeerdgronden	360	304	-56
13	sterk lemig fijn zand	364	351	-13
14	grob zand	372	440	68
15	zavel met homogeen profiel	386	289	-97
16	lichte klei met homogeen profiel	390	312	-78
17	klei met zware tussenlaag of ondergrond	420	312	-107
18	klei op veen	417	325	-92
19	klei op fijn zand	349	281	-68
20	klei op grof zand	313	241	-73
21	leem	336	290	-47
22	water	309	309	0
23	bebouwing	324	330	6

Tabel 11-9: Grondwateraanvulling 1997 t/m 1999 per FLUZO grondgebruik, variant BOFEK2012

FLUZO code	Omschrijving Fluzocode	Referentie [mm/jaar]	BOFEK2012 [mm/jaar]	Verschil [mm/jaar]
2	overig akkerbouw ¹³	453	154	-300
3	bollen	345	299	-46
4	agrarisch gras	344	319	-25
5	maïs	370	339	-31
7	bieten	386	332	-54
8	aardappelen	424	394	-29
10	boomgaard, boomkwekerijen, fruitkwekerijen	283	239	-43
11	granen	409	353	-56
12	loofbos	328	325	-3
13	naaldbos	307	327	20
14	natuur - gras	327	321	-5
15	kale grond	533	538	5
16	open water	320	317	-3
17	bebouwing, glastuinbouw	302	285	-17
18	natuur - moeras	354	327	-26
19	gemengd bos	361	382	21

Gewasfactoren Metawap

In het referentiemodel zijn 18 landgebruikstypen gedefinieerd. Het gaat om grasland, verschillende landbouwgewassen (maïs, granen, suikerbieten, aardappels), bebouwd gebied en natuur (loofbos, naaldbos, grasland en moeras). Per landgebruikstype wordt het volgende gedefinieerd:

- Gewasfactor: het verloop van de potentiële gewasverdamping ten opzichte van de Makkink referentieverdamping gedurende het jaar.
- Bodembedekkingsgraad: het verloop van de bodembedekkingsgraad gedurende het jaar. Voor het resterende oppervlak ($1 - \text{bodembedekkingsgraad}$) wordt de verdamping van kale grond berekend.
- De maximale worteldiepte en berging in de wortelzone.
- De interceptiecapaciteit.

De landgebruikstypen worden gekoppeld aan het landgebruik volgens het LGN. Per modelcel wordt de grondwateraanvulling samengesteld op basis van de fractie van ieder landgebruikstype binnen de cel.

¹³ Grote verschil is veroorzaakt door een fout in FLUZO die is gecorrigeerd

Het onverzadigde zonemodel Metaswap wordt o.a. toegepast in het landelijke modelinstrumentarium NHI. Metaswap bevat gewasparameters afkomstig uit SIMGRO. Ten opzichte van de FLUZO parameters in het referentiemodel zijn hierin de volgende verschillen te zien:

- Een lagere potentiële gewasverdamping voor grasland (gewasfactor maximaal 0,8 in Metaswap versus 1 in FLUZO).
- Een hogere potentiële gewasverdamping voor loofbos en naaldbos.
- Minder onderscheid in landbouwgewassen (enkel maïs, bollen en overig akkerbouw).
- Meer onderscheid in natuurtypen (heide, moeras, duinvegetatie).

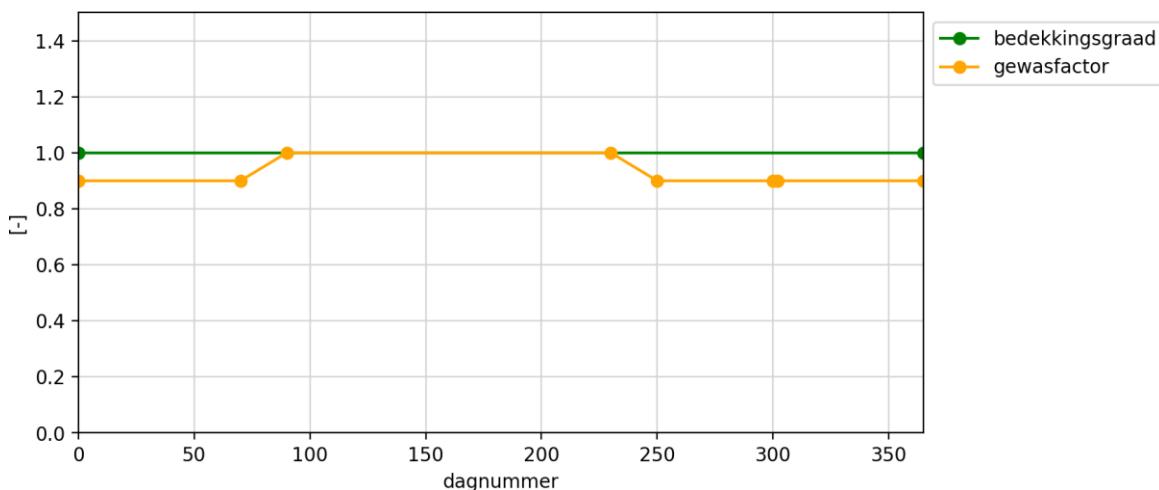
In Metaswap worden 25 landgebruikstypes onderscheiden. De indeling is net wat afwijkend van FLUZO:

1	gras
2	mais
3	aardappelen
4	bieten
5	granen
6	overige landbouwgewassen
7	boomteelt
8	glastuinbouw
9	boomgaard
10	bollen
11	loofbos
12	naaldbos
13	moeras
14	duinvegetatie
15	kale grond
16	water
17	natuurlijk gras
18	stedelijk grasland
19	donker naaldbos
20	heidevegetatie
21	fruitkwekerijen
22	sportvelden
23	onbemest grasland
24	mais met groen
25	aardappelen vroeg

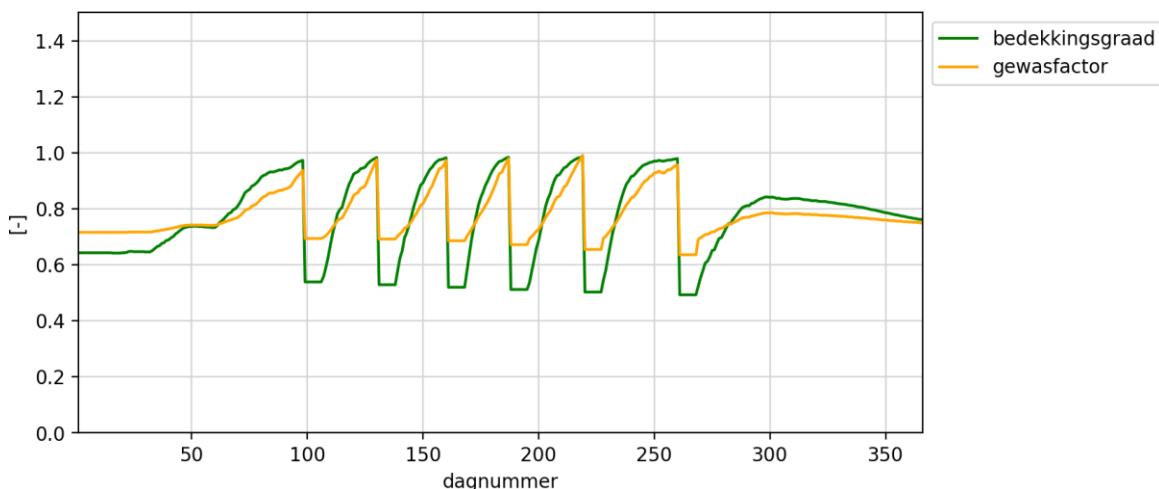
Voor een uitgebreide beschrijving van genoemde parameters en een vergelijking met Metaswap wordt verwezen naar (Boleij, 2012). In deze modelvariant zijn de landgebruikstypen van Metaswap verwerkt in een parameterbestand voor FLUZO. Hierbij zijn de gewasfactoren en de bodembedekkingsgraad van Metaswap overgenomen in FLUZO (uit fact_svat.inp). Ook is de koppeling met de landgebruikskaart gebaseerd op Metaswap. Vervolgens is de periode 1997 t/m 1999 doorgerekend. In FLUZO kunnen de gewasfactor en de bodembedekkingsgraad tijdsafhankelijk worden geschematiseerd met maximaal 7 knikpunten, terwijl deze in Metaswap met een functie van het dagnummer (1 t/m 366) worden gevarieerd. Verder is in FLUZO de worteldiepte constant en in Metaswap tijdsafhankelijk. De gewasfactor en bodembedekkingsgraad zijn vereenvoudigd voor gebruik in FLUZO (Figuur 11-18 t/m Figuur 11-20. Voor agrarisch gras wordt in Metaswap aangenomen dat op zes vaste momenten het gras wordt gemaaid (Figuur B2. Hierdoor verandert de verdamping in het groeiseizoen periodiek. Gemiddeld ligt de gewasfactor in het groeiseizoen rond 0,8.

De berekende grondwateraanvulling is weergegeven in Tabel 11-3, Figuur 11-21 en Figuur 11-22. De gemiddelde grondwateraanvulling bedraagt 399 mm/jaar, fors meer dan het referentiemodel. Dit komt voornamelijk door de lagere potentiële gewasverdamping voor grasland, hierdoor valt de jaarlijkse grondwateraanvulling voor grasland veel hoger uit. De toename bedraagt gemiddeld 67 mm/jaar voor de periode 1997 t/m 1999 (Tabel 11-10). Ook voor andere landbouwgewassen wordt een hogere aanvulling berekend. Voor bosgebieden wordt juist meer verdamping en een lagere aanvulling berekend.

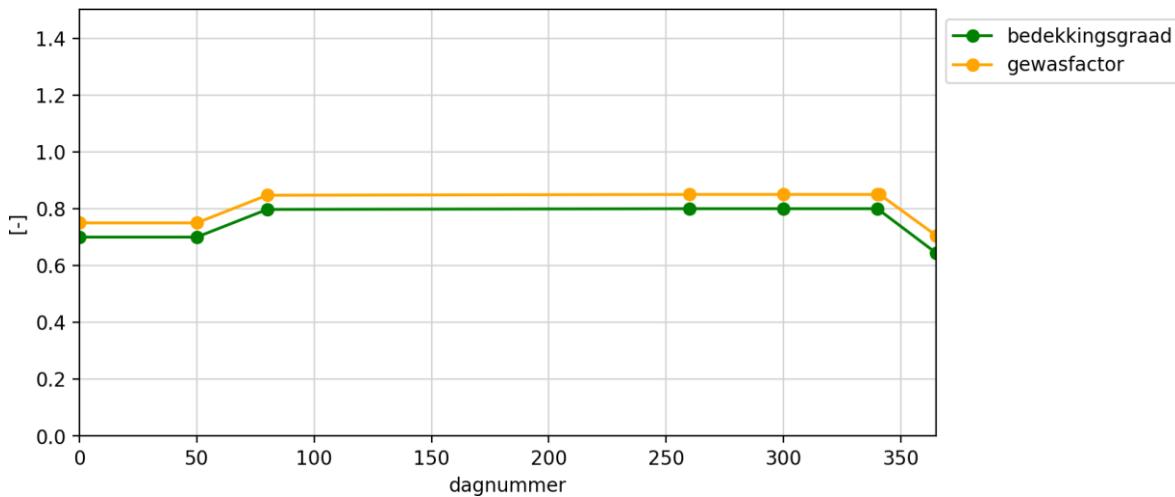
De gewasfactoren zijn eerder vastgesteld en zijn in feite onafhankelijk van het model. Maar de wijze waarop de modellen de gewasfactoren verwerken, verschilt wel van elkaar. Het modelconcept van Metaswap verschilt sterk met dat van FLUZO. De verdampingsreductie wordt anders berekend in Metaswap. Hierdoor valt de verdamping in FLUZO lager uit dan in Metaswap (zie Boleij, 2012). Met de gewasfactoren van Metaswap wordt gemiddeld meer grondwateraanvulling berekend (Figuur 11-22). Daardoor wordt de grondwateraanvulling in FLUZO waarschijnlijk overschat als gewasfactoren uit Metaswap worden gebruikt. Het overnemen van de gewasfactoren uit Metaswap in FLUZO is daarom niet eenvoudig mogelijk.



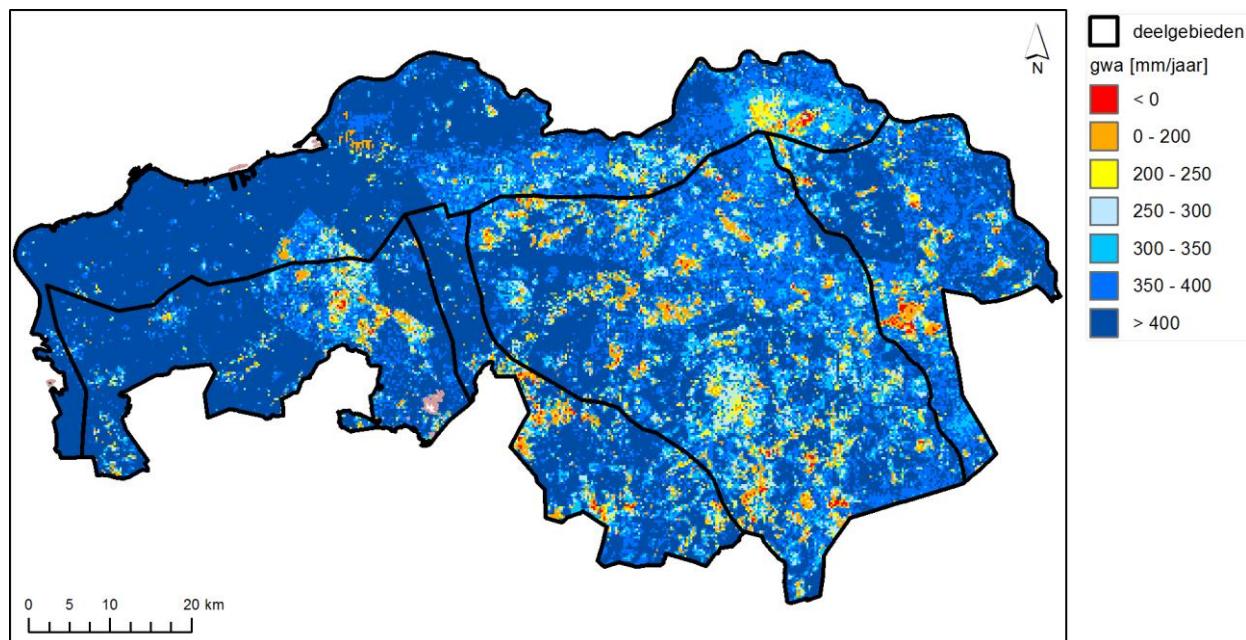
Figuur 11-18: Gewasfactor en bedekkingsgraad agrarisch gras, FLUZO



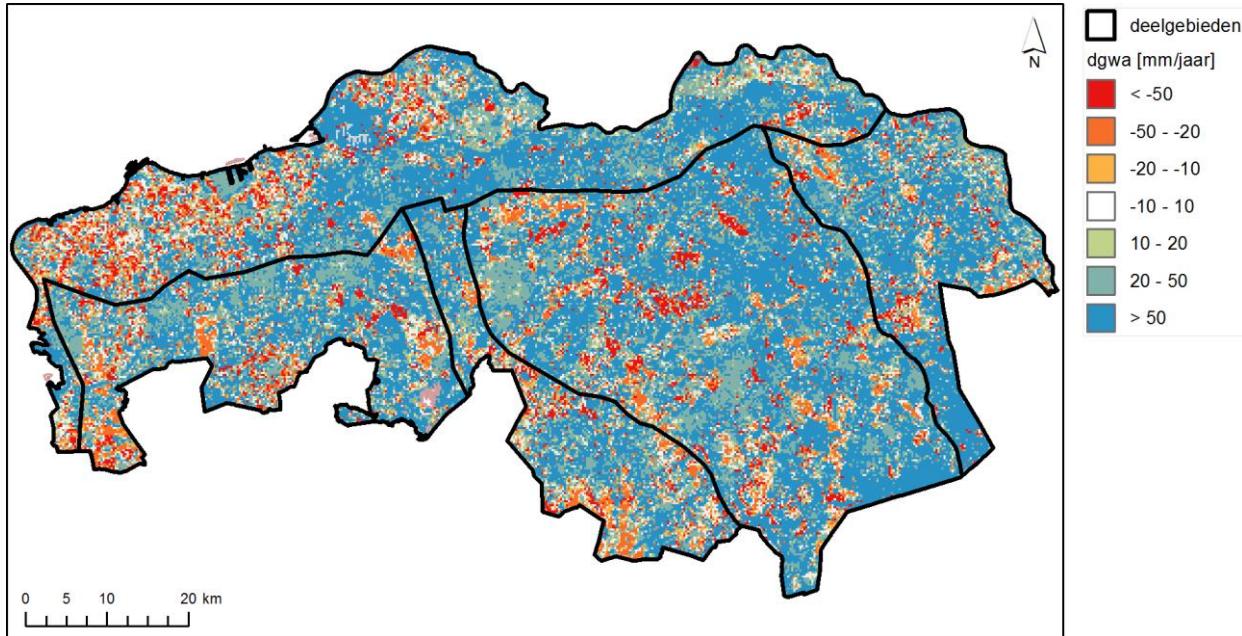
Figuur 11-19: Gewasfactor en bedekkingsgraad agrarisch gras, Metaswap



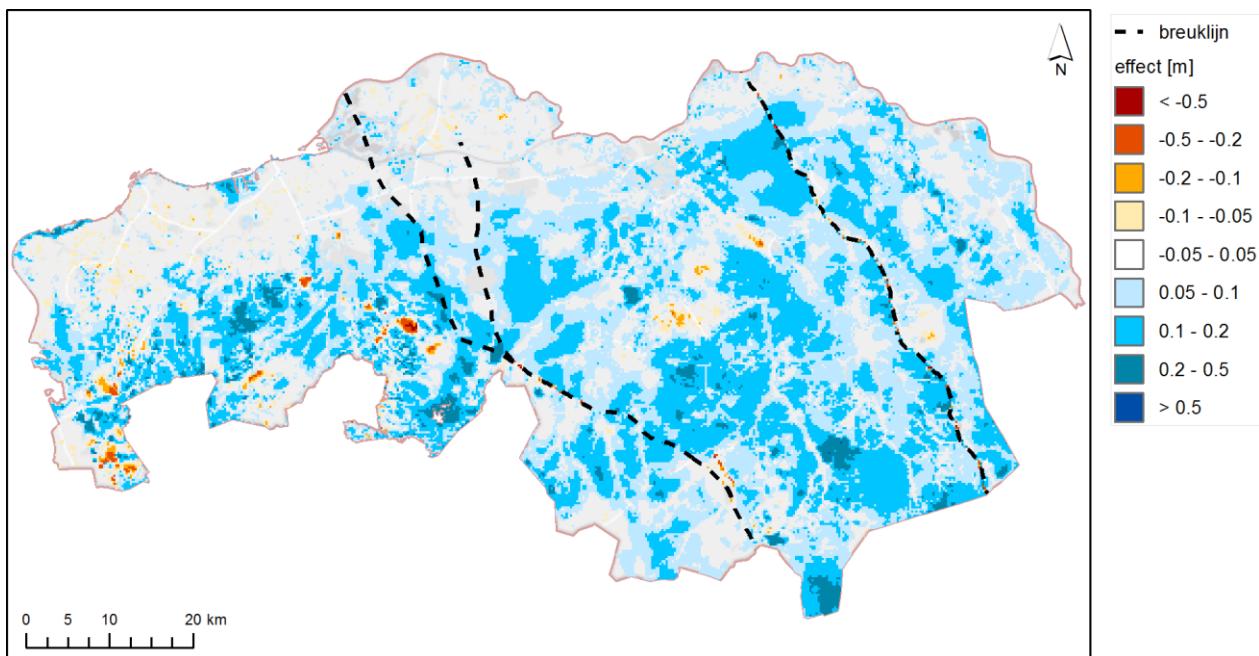
Figuur 11-20: Gewasfactor en bedekkingsgraad agrarisch gras, Metaswap verwerkt in FLUZO



Figuur 11-21: Gemiddelde grondwateraanvulling 1997 – 1999, variant Metaswap gewasfactoren



Figuur 11-22: Effect grondwaternaauvulling 1997 – 1999, variant Metaswap gewasfactoren t.o.v. referentie



Figuur 11-23: Effect grondwaterstand 1997 – 1999, variant Metaswap gewasfactoren t.o.v. referentie

Tabel 11-10: Grondwaternaauvulling 1997 t/m 1999 per FLUZO grondgebruik, variant Metaswap gewasfactoren

FLUZO code	Omschrijving	Referentie [mm/jaar]	Metaswap-gewas [mm/jaar]	Verschil [mm/jaar]
2	overig akkerbouw	453	430	-23
3	bollen	345	351	6
4	agrarisches gras	344	411	67
5	maïs	370	426	57
7	bieten	386	412	26
8	aardappelen	424	435	12
10	boomgaard, boomkwekerijen, fruitkwekerijen	283	358	76
11	granen	409	415	7
12	loofbos	307	288	-19
13	naaldbos	328	318	-10
14	natuur - gras	327	423	96
15	kale grond	533	557	24
16	open water	320	321	1
17	bebouwing, glastuinbouw	302	344	42
18	natuur - moeras	354	419	65
19	gemengd bos	361	339	-22

Conclusies

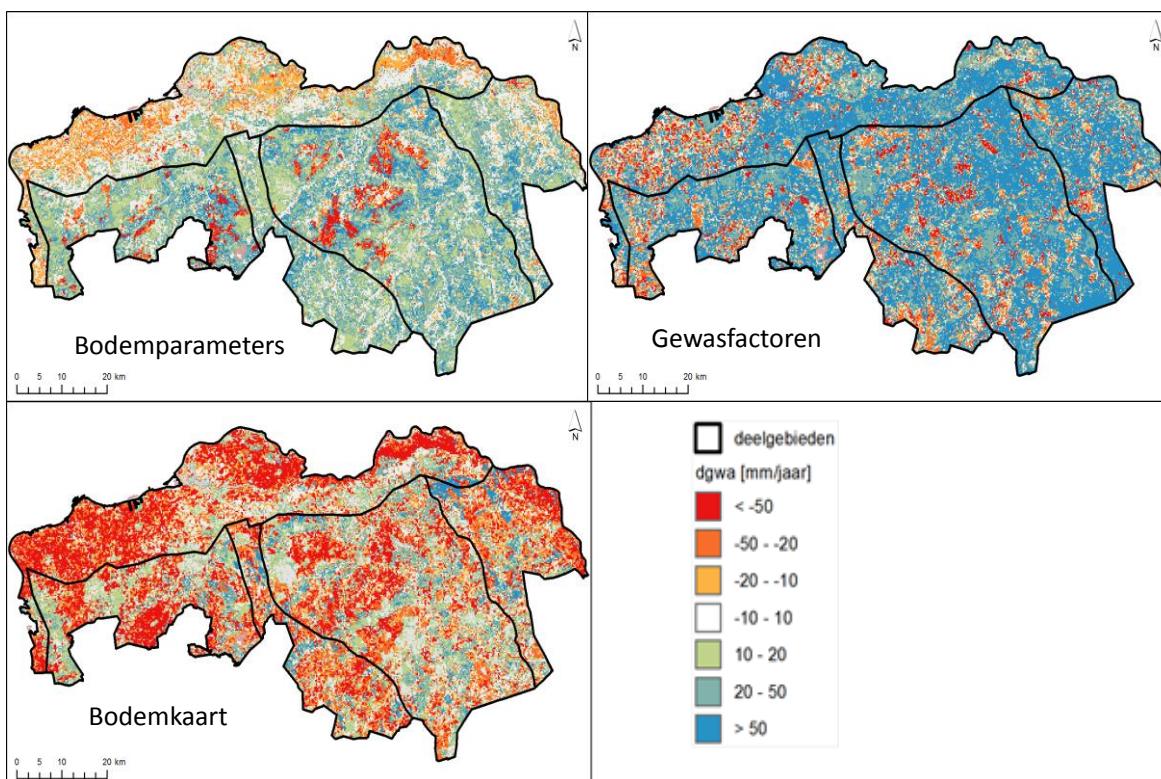
Met een tijdsafhankelijke berekening zijn drie varianten van het onverzadigde zonemodel van het HGK onderzocht. De berekening maakt gebruik van het Brabantmodel versie 2017 in de Draagkracht studie (Royal Haskoning 2017c). De periode 1997 t/m 1999 is doorgerekend. Omdat 1998 een zeer nat jaar was ligt de berekende grondwaternaauvulling hoger dan het langjarig gemiddelde.

Uit de analyse is het volgende naar voren gekomen:

- Staringreeks 2001 is bepaald op basis van een groot aantal gemeten bodemfysische karakteristieken. Toepassing in FLUZO leidt tot een meer realistische benadering van de verdamping in de zomer op lemige gronden en zwak leemhoudende zandgronden. Aanpassing van de bodemparameters geeft meer grondwaternaauvulling op de hoger gelegen zandige gronden en minder grondwaternaauvulling op lemige gronden (linksboven in Figuur 11-24). We adviseren de oorspronkelijke parameterwaarden te vervangen door Staringreeks 2001.
- Bodemkaart BOFEK2012 bevat een groter aantal bodemeenheden en daardoor een grotere ruimtelijke nauwkeurigheid. We adviseren om de PAWN bodemkaart te vervangen door BOFEK2012. Aanpassing van de bodemkaart gecombineerd met de nieuwe bodemparameters geeft minder grondwaternaauvulling op de kleigronden en de hoger gelegen lemige zand- en enkeerdgronden (linksonder in Figuur 11-24).
- Foutieve parameters voor overig landbouw (groente) leidden tot een overschatting van de grondwaternaauvulling voor dit landgebruik. Dit is gecorrigeerd. De modelconcepten van FLUZO en Metaswap zijn sterk verschillend. Hierdoor kunnen gewasparameters uit Metaswap niet direct worden overgenomen in FLUZO. We vermoeden dat de grondwaternaauvulling voor grasland wordt overschat

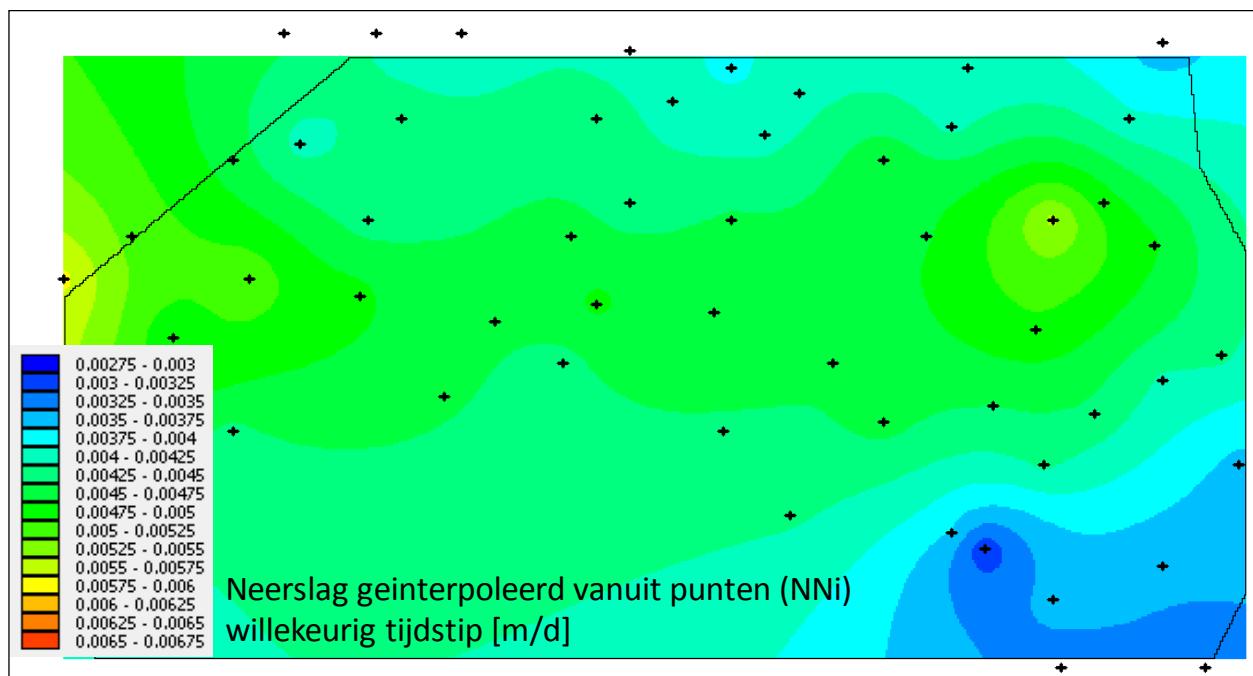
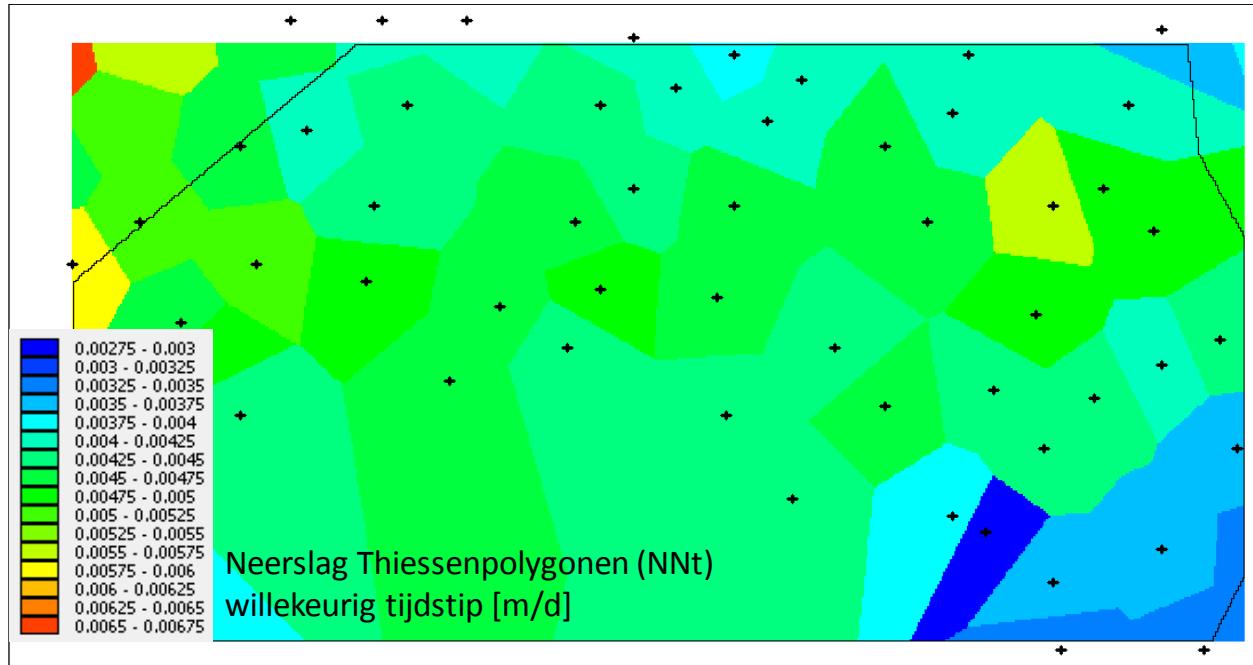
als de gewasfactoren van Metaswap worden gebruikt in FLUZO. Ook wordt met de Metaswap gewasfactoren een lagere aanvulling voor bos berekend, terwijl de grondwaterstanden in natuurgebieden met het huidige model voornamelijk worden onderschat. Gemiddeld zou de grondwaternaanvulling sterk toenemen (linksonder in Figuur 11-24). We adviseren om de oorspronkelijke parameters van FLUZO aan te houden, of over te stappen op Metaswap voor het doorrekenen van de onverzadigde zone. De grondgebruikstypen in FLUZO kunnen waarschijnlijk wel worden vereenvoudigd, op gelijke wijze als in Metaswap.

Daarom zijn alleen de eerste twee aanpassingen overgenomen. De grondwaternaanvulling zal daardoor gemiddeld in Noord-Brabant afnemen in het model.

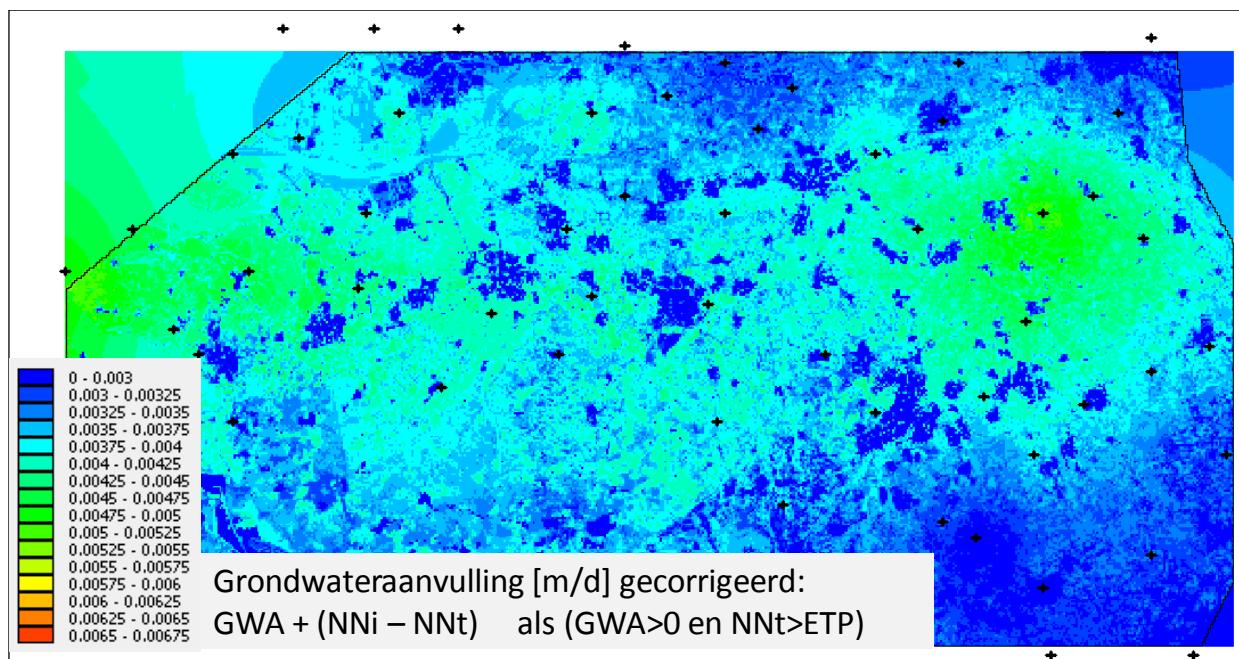
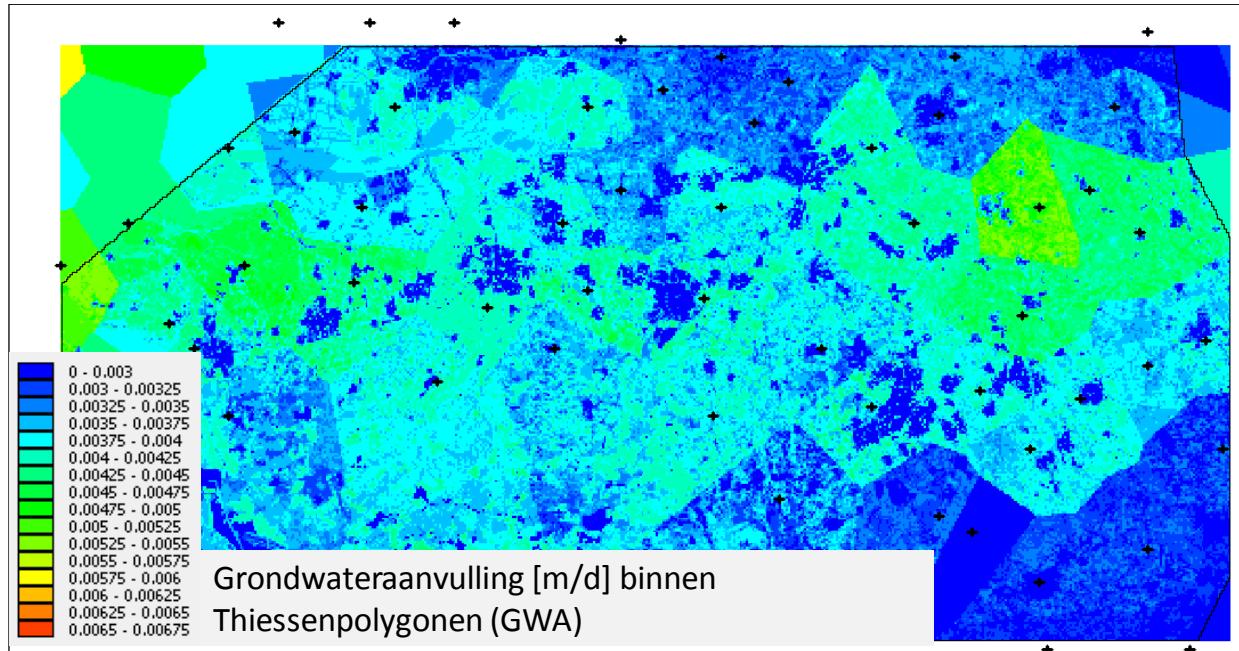


Figuur 11-24: Effect grondwaternaanvulling 1997 – 1999, voor drie varianten t.o.v. referentie

Bijlage 3: Grondwateraanvulling van Thiessenpolygone naar modelknopen



Figuur 11-25: Neerslag in Thiessenpolygonen en geïnterpoleerd



Figuur 11-26: Grondwateraanvulling berekend (boven) en gecorrigeerd (onder)

Bijlage 4: Koppeltabel gebruikte ondergrondmodellen

Nr.	REGISII v2.2		H3O Roerdalslenk		H3O De Kempen		HCOV		Outputnaam
1	HLC	20.00%	HLC	20%	HLC	20%	0110		hlc_s1
2	HLC	20.00%	HLC	20%	HLC	20%	0120		hlc_s2
3	HLC	20.00%	HLC	20%	HLC	20%	0130		hlc_s3
4	HLC	20.00%	HLC	20%	HLC	20%	0134		hlc_s4
5	HLC	20.00%	HLC	20%	HLC	20%	0140		hlc_s5
6	BXS Ck1		Bxsck1						bxsck1
7	BXz2		Bxz2		Bxz2		0150	50%	bxz2
8	BXL Mk1		Bxk1		Bxlmk1				bxlmk1
9	BXk1		Bxlmk1						bxk1
10	BXz3		Bxz3		Bxz3		0150	50%	bxz3
11	BXk2		Bxk2		Bxk2				bxk2
12	BXz4		Bxz4		Bxz4		0160		bxz4
13	KRW Yk1								krwyk1
14	KRz2								krz2
15	KRK1								krk1
16	KRz3								krz3
17	BEz1		Bez1				0173		bez1
18	BER Ok1								berok1
19	BEK1		Bek1						bek1
20	BEz2		Bez2				0172		bez2
21	BEK2		Bek2						bek2
22	BEz3		Bez3				0171	33%	bez3
23	WBv 1								wbv1
24	EEz1								eez1
25	EEk1								eek1
26	EEz2								eez2
27	EEk2								eek2
28	EEz3								eez3
29	KRZ Uk1								krzuk1
30	KRz4								krz4
31	KRT Wk1								krtwk1
32	KRz5								krz5
33	DRz1								drz1
34	DRUI k1								druik1
35	DRz2								drz2
36	DRGI k1								drgik1
37	DRZ3								drz3
38	DTc	10.00%							dtc_s1
39	DTc	80.00%							dtc_s2
40	DTc	10.00%							dtc_s3
41	D Nz1								dnz1
42	URz1								urz1
43	URk1								urk1
44	URz2								urz2
45	URz3								urz3
46	URz4								urz4
47	URz5								urz5
48	STz1		stz1		stz1		0171	33%	stz1

Nr.	REGISII v2.2		H3O Roerdalslenk		H3O De Kempen		HCOV		Outputnaam
49	STk1		stkJ		stkJ				stkJ
50	STz2		stzJ		stzJ		0171	34%	stzJ
51	SYz1		syzJ		syzJ				syzJ
52	SYkJ1		sykJ1		sykJ1				sykJ1
53	SYz2		syzJ		syzJ				syzJ
54	SYkJ2		sykJ2		sykJ2				sykJ2
55	SYz3		syzJ		syzJ				syzJ
56	SYkJ3		sykJ3		sykJ3				sykJ3
57	SYz4		syzJ		syzJ				syzJ
58	PZW Az1		pzwazJ		pzwazJ				pzwazJ
59	WAkJ 1		wakJ		wakJ		0221		wakJ
60	PZW Az2		pzwazJ		pzwazJ		0222		pzwazJ
61	WAkJ 2		wakJ		wakJ		0223		wakJ
62	PZW Az3		pzwazJ		pzwazJ		0231		pzwazJ
63	WAkJ 3		wakJ		wakJ				wakJ
64	PZW Az4		pzwazJ		pzwazJ		0232	50%	pzwazJ
65	MSz1		mszJ		mszJ		0232	50%	mszJ
66	MSkJ1				mskJ1				mskJ1
67	MSz2				mszJ2		0233	25%	mszJ2
68	MSkJ2				mskJ2				mskJ2
69	MSz3				mszJ3		0233	25%	mszJ3
70	MSc	10.00%							msc_s1
71	MSc	80.00%					0233	25%	msc_s2
72	MSc	10.00%							msc_s3
73	MSz4						0233	25%	mszJ4
74	Klz1		kizJ		kizJ				kizJ
75	Klk1		KikJ		KikJ				kikJ
76	Klz2		KizJ		KizJ		0211		kizJ
77	Klk2		KikJ		KikJ		0212		kikJ
78	Klz3		KizJ		KizJ		0213 + 0234		kizJ
79	Klk3		KikJ				0214		kikJ
80	Klz4		KizJ				0215	50%	kizJ
81	Klk4		KikJ						kikJ
82	Klz5		KizJ				0215	50%	kizJ
83	Ooz1		OozJ		OozJ				oozJ
84	OOk1				OokJ				ookJ
85	Ooz2				OozJ		0251		oozJ
86	OoC	10.00%	OoC	10.00%	OoC	10.00%			ooc_s1
87	OoC	80.00%	OoC	80.00%	OoC	80.00%			ooc_s2
88	OoC	10.00%	OoC	10.00%	OoC	10.00%			ooc_s3
89	IEkJ1		iekJ						iekJ
90	IEz2		iezJ						iezJ
91	IEkJ2		iekJ	0242		0240			iekJ
92	IEz3		iezJ						iezJ
93	BRz1	10.00%			0252		0252		brz1_s1
94	BRz1	10.00%	0253-1		0253-0254	33%	0253	33%	brz1_s2
95	BRz1	10.00%	0253v1						brz1_s3

Nr.	REGISII v2.2		H3O Roerdalslenk		H3O De Kempen		HCOV		Outputnaam
96	BRz1	10.00%	0253-2		0253- 0254	33%	0253	33%	brz1_s4
97	BRz1	10.00%	0253v2						brz1_s5
98	BRz1	10.00%	0253-3		0253- 0254	34%	0253	34%	brz1_s6
99	BRz1	10.00%	0254-1				0254	50%	brz1_s7
100	BRz1	10.00%	0255		0255				brz1_s8
101	BRz1	10.00%	0254-2		0254		0254	50%	brz1_s9
102	BRz1	10.00%	0256		0256		0256		brz1_s10

Bijlage 5: Eisen naamgeving

De REGIS bestanden moeten de REGIS naamgeving hebben zoals gehanteerd in TNO REGIS II.1. Dit betekent dat de naam van de bestanden als volgt opgebouwd moet zijn:

- laag + type + <nummer>;
- en een toevoeging die aangeeft om welke parameter het gaat.

Laag mag alleen uit letters (dus geen tekens) bestaan en moet minimaal 2 karakters lang zijn.

Type geeft aan of de laag een zandlaag (z), kleilaag (k), complex (c), veenlaag (v), bruinkoollaag (b) of kalksteenlaag (q) is.

Nummer is optioneel en kan een getal zijn van 1 tot en met 9.

De toevoeging die aangeeft om welke parameter het gaat. Per REGIS laag kan de tool de volgende parameters verwerken:

- TOP: top van de laag; de toevoeging is: "-T-CK";
- BOT: bottom van de laag; de toevoeging is: "-B-CK";
- Dikte: dikte van de laag; de toevoeging is: "-D-CK";
- KH: horizontale doorlatendheid; de toevoeging is: "-KH-SK";
- KD: transmissiviteit; ; de toevoeging is: "-KD-K";
- KC: verticale doorlatendheid; de toevoeging is: "-KV-SK";
- C: weerstand; de toevoeging is: "-C-K".

Bijlage 6: Toegekende k-waarden HCOV en H3O modellen

HCOV	k-waarde	H3O Roerdalslenk	k-waarde	H3O De Kempen	k-waarde
0110	5.68	hlc kh	5	hlc kh	5
0120	5.68	hlc kv	0.01	hlc kv	0.01
0130	0.0077	bxsck1	0.0161	bxz2	5
0134	5.68	bxz2	5	bxlmk1	0.0044
0140	0.0077	bxk1	0.0074	bxz3	5
0150	8	bxlmk1	0.00441	bxk2	0.0081
0160	10	bxz3	5	bxz4	5
0173	320	bxk2	0.0081	stz1	50
0172	80	bxz4	5	stk1	0.0422
0171	50	bez1	90	stz2	50
0221	0.002	bek1	0.0236	syz1	10
0222	10	bez2	90	syk1	0.0381
0223	0.0877	bek2	0.0204	syz2	10
0231	18.33	bez3	90	syk2	0.0402
0232	12.9	stz1	50	syz3	10
0233	17.2	stk1	0.0422	pzwaz1	15
0211	14.2	stz2	50	wak1	0.0154
0212	0.002	syz1	10	pzwaz2	18
0213	16.5	syk1	0.0381	wak2	0.0148
0214	0.001	syz2	10	pzwaz3	20
0215	18	syk2	0.0402	wak3	0.0225
0234	17.2	syz3	10	pzwaz4	20
0240	0.05	syk3	0.0185	msz1	12
0251	10	syz4	10	msk1	0.0038
0252	12.7	pzwaz1	15	msz2	12
0253	10	wak1	0.0154	msk2	0.0039
0254	6	pzwaz2	18	msz3	12
0256	1.7	wak2	0.0148	kiz1	19
		pzwaz3	20	kik1	0.001
		wak3	0.0225	kiz2	24
		pzwaz4	20	kik2	0.0008
		msz1	12	kiz3	27
		kiz1	19	ooz1	7
		kik1	0.001	ook1	0.0056
		kiz2	24	ooz2	13
		kik2	0.0008	ooc kh	2
		kiz3	27	ooc kv	0.0124
		kik3	0.001	0242	0.001
		kiz4	30	0252	3.5
		kik4	0.0013	0253-0254	3.5
		kiz5	28	0255	0.001
		ooz1	7	0254	6
		ooc kh	2	0256	1.7
		ooc kv	0.0124		
		iek1	0.0004		
		iez2	43		
		iek2	0.0002		
		iez3	42		
		0253-1	3.5		
		0253v1	0.0001		

HCOV	k-waarde	H3O Roerdalslenk	k-waarde	H3O De Kempen	k-waarde
		0253-2	3.5		
		0253v2	0.0001		
		0253-3	3.5		
		0254-1	6		
		0255	0.001		
		0254-2	6		
		0256	1.7		

Bijlage 7: Gemiddelde k-waarde per REGIS laag

Het gemiddelde is berekend voor het kaartvlak: [xmin, xmax]=[39000,216000] en
ymin,ymax]=[319500,445900].

REGIS	k-waarde (gemiddelde)	REGIS	k-waarde (gemiddelde)
hlc kh	5	stk1	0.0422237
hlc kv	0.01	stz2	50.1767197
bxsck1	0.01611633	syz1	10.0908976
bxmlk1	0.004368687	syk1	0.03810169
bxk1	0.007397451	syz2	12.0054455
bxz2	4.953148842	syk2	0.04020811
bxk2	0.00807094	syz3	12.6686239
bxz3	4.896032333	syk3	0.01848124
bxz4	5.092437267	syz4	12.2897224
krwyk1	0.018332589	pzwaz1	15.1368656
krz2	48.83658981	pzwazz2	18.7911015
krk1	0.028981129	wak1	0.01544886
krz3	50.26607513	pzwazz3	20.6841469
berok1	0.017276557	pzk1	0.0459917
bez1	81.88233185	pzwaz4	20.3385849
bek1	0.023569791	wak2	0.01482294
bez2	92.01219177	wak3	0.02253576
bek2	0.020354135	msz1	13.6497107
bez3	92.65772247	msc kh	4.83819628
kwz1	10.70227242	msc kv	0.01233326
wbv1	0.004314807	msk1	0.00383883
eez1	11.9394083	msz2	12.728096
eek1	0.019088833	msk2	0.00389615
eez2	11.88374519	msz3	11.5724449
eek2	0.035799999	msz4	11.3216143
eez3	12.05860519	kiz1	18.6583328
krz4	55.45550919	kik1	0.00097721
krzuk1	0.040895522	kiz2	24.2965336
krz5	48.14769363	kik2	0.00075528
krtwk1	0.000645013	kiz3	27.6943645
drz1	31.20529366	kik3	0.00097954
druik1	0.000959758	kiz4	30.2237797
drz2	27.98045158	kik4	0.00127233
drgik1	0.013304702	kiz5	28.572052
drz3	32.73209763	ooz1	6.80100393
dtc kh	5	ooc kh	2.09927702
dtc kv	0.01	ooc kv	0.01243509
dnz1	1	ook1	0.00556936
urz1	52.75266647	ooz2	12.8648233
urk1	0.04884281	iek1	0.00039321
urz2	52.27228546	iez2	42.9706573
urz3	53.05263519	iek2	0.00021415
urz4	52.68748474	iez3	41.5082169
urz5	54.32919312	brz1 kh	3.46823287
stz1	47.15410614	brz1 kv	0.01

Bijlage 8: Gemiddelde onttrekkingsdebieten drinkwater

Onttrekking drinkwater		Middelpunt		Gemiddelde diepte		Gemiddelde 2009 t/m 2016	
Organisatie	Winning	X	Y	Van [m+nap]	Tot [m+nap]	Debit [m3/dag]	Debit [miljoen m3/jaar]
Brabant Water	Aalsterweg	161268	380148	-88.6	-134.6	21720	7.9
Brabant Water	Bergen op Zoom	80614	388435	-48.4	-73.4	12670	4.6
Brabant Water	Boxmeer	191034	406332	4.2	-1.7	1793	0.7
Brabant Water	Budel	168874	366763	-51.4	-72.6	6528	2.4
Brabant Water	Dorst	119016	401022	-121.0	-175.5	24283	8.9
Brabant Water	Drongelen	129642	413919	-56.4	-97.2	5413	2.0
Brabant Water	Empel	152349	416479	-40.6	-60.2	0	0.0
Brabant Water	Genderen	135233	417047	-70.9	-122.2	9840	3.6
Brabant Water	Gilze	124816	393384	-37.8	-86.8	4245	1.6
Brabant Water	Ginneken	113935	396987	-60.2	-80.6	549	0.2
Brabant Water	Groote Heide	165261	378011	-202.2	-263.3	21316	7.8
Brabant Water	Haaren	144982	402399	-125.5	-169.0	18696	6.8
Brabant Water	Helmond	176250	388473	-56.1	-92.3	17655	6.4
Brabant Water	Helvoirt	140430	408615	-59.1	-87.7	3556	1.3
Brabant Water	Klotputten	158717	379843	-199.0	-264.5	7321	2.7
Brabant Water	Lieshout	166996	392514	-136.6	-206.6	9956	3.6
Brabant Water	Lith	155785	421467	-16.3	-43.5	7606	2.8
Brabant Water	Loosbroek	162298	410343	-117.1	-145.9	18380	6.7
Brabant Water	Luyksgestel	148013	366084	-15.6	-39.2	4926	1.8
Brabant Water	Macharen	164821	423686	-2.9	-10.3	5305	1.9
Brabant Water	Nuland	156885	414728	-74.8	-93.5	22279	8.1
Brabant Water	Oirschot	145844	393657	-164.6	-194.0	7923	2.9
Brabant Water	Oosterhout	116590	405030	-138.3	-185.3	31176	11.4
Brabant Water	Prinsenbosch	118807	395012	-94.0	-126.3	11539	4.2
Brabant Water	Roosendaal	91461	391662	-60.5	-84.9	8561	3.1
Brabant Water	Schijf	96588	391105	-92.6	-149.2	18986	6.9
Brabant Water	Schijndel	155856	401500	-149.9	-199.4	20276	7.4
Brabant Water	Seppe	97471	397415	-114.0	-163.7	35358	12.9
Brabant Water	Someren	175528	371760	-150.7	-227.2	8138	3.0
Brabant Water	Son	158268	393344	-149.2	-225.3	21313	7.8
Brabant Water	Tilburg	129012	395503	-113.2	-140.2	38811	14.2
Brabant Water	Veghel	168491	402872	-101.5	-154.1	23367	8.5
Brabant Water	Vessem	149704	383096	-8.2	-26.3	12048	4.4
Brabant Water	Vierlingsbeek	194002	400690	4.3	-9.2	2141	0.8
Brabant Water	Vlierden	181237	383159	-113.0	-170.0	9354	3.4
Brabant Water	Vlijmen	141101	410590	-119.4	-157.9	4170	1.5
Brabant Water	Waalwijk	133136	409560	-31.6	-47.9	3142	1.1
Brabant Water	Welschap	157094	384533	-115.7	-260.9	10932	4.0
Brabant Water	Wouw	83922	393972	-98.1	-134.4	9228	3.4
Evides	Halsteren	79079	393723	-87.3	-114.4	6119	2.2
Evides	Huijbergen	83588	383664	-34.1	-65.8	19695	7.2
Evides	Ossendrecht	81985	380070	-20.6	-47.5	11996	4.4

Bijlage 9: Aanname watervoerendheid Roerdalslenk Duitsland

Modellaag	kD [m ² /d]
1	niet aanwezig
2	volgens HCOV
3	volgens HCOV
4	volgens HCOV
5	volgens HCOV
6	500
7	500
8	200
9	niet aanwezig
10	niet aanwezig
11	niet aanwezig
12	niet aanwezig
13	niet aanwezig
14	500
15	500
16	500
17	500
18	1000
19	3200