

RAPPORT

Hydrologische modellering Turfkoelen en Flinke Ven

Eindrapport

Klant: Provincie Limburg

Referentie: BH3329-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001

Status: S0/P01.01

Datum: 2 februari 2021

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Amerikalaan 110
6199 AE MAASTRICHT AIRPORT
Water
Trade register number: 56515154

+31 88 348 78 48 **T**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Hydrologische modellering Turfkoelen en Flinke Ven

Ondertitel: Hydrologische modellering Turfkoelen Flinke Ven
Referentie: BH3329-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001
Status: P01.01/S0
Datum: 2 februari 2021
Projectnaam: Hydrologische modellering Turfkoelen en Flinke Ven
Projectnummer: BH3329-101-100
Auteur(s): Hank Vermulst, Wouter Swierstra, Wouter Engel

Opgesteld door: Hank Vermulst 
Gecontroleerd door: Wouter Swierstra 
Datum: 29 januari 2021
Goedgekeurd door: Paul Aalders 
Datum: 29 januari 2021

Classificatie

Projectgerelateerd

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Let op: dit document bevat persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V. en dient voor publicatie of anderszins openbaar maken te worden geanonimiseerd.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Probleem- en doelstelling	1
1.3	Leeswijzer	2
2	Gebiedsbeschrijving	3
2.1	Algemene gebiedsbeschrijving	3
2.2	Maaiveldhoogte	4
2.3	Geologie	5
2.4	Oppervlaktewater	6
2.5	Waterkwaliteit	7
2.6	Geohydrologie	8
3	Aanpak van de modellering	10
3.1	Algemeen	10
3.2	Verzamelen basisinformatie en opzet van het grondwatermodel	10
3.3	Gevoeligheidsanalyse en kalibratie	11
3.4	Betrouwbaarheidsanalyse modeluitkomsten	11
4	Opzet van het hydrologisch model	13
4.1	Modelgebied en randvoorwaarden	13
4.2	Modelschematisatie ondergrond	14
4.2.1	Algemeen	14
4.2.2	Koppelen van Duitse ondergrondmodellen aan REGIS	15
4.2.3	Inbrengen aanvullende informatie uit GeoTOP	18
4.2.4	Vertaling van de detail-lagen naar modellagen (mapping)	22
4.2.5	Schematisatie van de breuken	23
4.3	Onttrekkingen	24
4.3.1	Drink- en industriewaterwinningen	24
4.3.2	Beregeningsonttrekkingen	24
4.4	Meteo-invoer en Maaspeilen	27
4.5	Schematisatie van het oppervlaktewater	27
4.5.1	Algemeen	27
4.5.2	Primaire en secundaire watergangen	27
4.5.3	Tertiaire watergangen en drains	28
4.5.4	Onverzadigde zone module (MetaSWAP)	29
5	Kalibratie van het grondwatermodel	30
5.1	Aanpak kalibratie	30

5.2	Gevoeligheidsanalyse	33
5.3	Stationaire kalibratie	33
5.3.1	Kalibratiestap 1: optimalisatie stijghoogten Peelhorst	33
5.3.2	Kalibratiestap 2: handmatige kalibratie Peelrandbreuk en Meinwegstoring	35
5.3.3	Kalibratiestap 3: kalibratie Roerdalslenk	37
5.3.4	Kalibratie stap 4: verdere fijnregeling rondom Flinke Ven en Turfkoelen	39
5.4	Tijdsafhankelijke kalibratie	42
5.5	Optimalisatieslag met Monte Carlo analyse	48
6	Betrouwbaarheidsanalyse van de modeluitkomsten	51
6.1	Aanpak betrouwbaarheidsanalyse	51
6.2	Selectie twee alternatieve modellen	51
6.3	Betrouwbaarheidsinterval berekende effecten	53
6.3.1	Aanleg van subirrigatie Flinke Ven	53
6.3.2	Aanpassen van de ontwatering in het Flinke Ven	58
7	Conclusies en aanbevelingen	64
8	Referenties	66

Bijlagen

Bijlage 1: Tabellen t.b.v. onderbouwing schematisatie ondergrond

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Flinke Ven ligt in de gemeente Roerdalen ten noorden van de Keulsebaan en bestaat nu uit intensief gebruikte landbouwpercelen. Het ligt tussen twee Natura 2000-gebieden in, te weten Roerdal in het zuiden en de Meinweg in het noorden. Aan de oostkant wordt de grens gevormd door de bossen van de Meinweg aan de westkant ligt het Roerdal met de Turfkoelen. De Turfkoelen maakt deel uit van het Natura2000-gebied Roerdal en is daarbij ook door de Provincie aangewezen als TOP-gebied, tegenwoordig aangeduid als Natte Natuurparel. Rondom de Natte Natuurparels zijn hydrologische bufferzones begrensd, waar aanvullende regels van toepassing zijn, bijvoorbeeld ten aanzien van beregening.

In het deelgebied Flinke Ven, gelegen in de hydrologische bufferzone van het Natura 2000-gebied Turfkoelen, is het huidig gebruik in de vorm van onttrekkingen ten behoeve van haspelberegening, niet meer vrijgesteld van een Passende Beoordeling in het kader van Natura 2000. De reden hiervoor is dat de effecten van beregening op de staat van instandhouding van de habitattypen binnen Natura 2000-gebied Turfkoelen vooralsnog onvoldoende zijn te kwantificeren en dat significant negatieve effecten op voorhand niet zijn uit te sluiten. Inmiddels heeft de LLTB tijdens een bestuurlijk overleg aan de Provincie Limburg en Waterschap Limburg gevraagd om in het Flinke Ven subirrigatie toe te passen als alternatief voor haspelberegening. Omdat ook de effecten van eventuele subirrigatie vooralsnog onvoldoende bekend zijn en er daardoor geen besluit over kan worden genomen, heeft de Provincie Limburg een nader onderzoek gevraagd.

1.2 Probleem- en doelstelling

In het verleden zijn verschillende grondwatermodellen ontwikkeld voor het gebied van de Turfkoelen en het Flinke Ven. Te noemen zijn onder meer IBRAHYM versies 1.0, 2.0 en 2.1. In 2014 is op basis van IBRAHYM 2.0 een detailmodel ontwikkeld ten behoeve van het uitvoeringsproject “Vernattingsproject Schuttecampsgraaf / Turfkoelen” (Grontmij, 2014). Dit detailmodel is verder verbeterd en gekalibreerd in het kader van de studie “Effectbepaling Vernattingsmaatregelen Herkenbosscherbroek” (Sweco, 2018). In 2019 is het “Hydrologisch onderzoek Flinke Ven en Turfkoelen” (Arcadis, 2019) uitgevoerd. Voor dit onderzoek is het IBRAHYM 2.1 model verfijnd, verbeterd met lokale informatie en opnieuw gekalibreerd.

Geen van deze grondwatermodellen blijkt voldoende nauwkeurig te zijn voor de onderbouwing van een Passende Beoordeling voor het Natura2000-gebied de Turfkoelen voor wat betreft de effecten van haspelberegening en eventuele subirrigatie in het deelgebied Flinke Ven.

Om deze reden bestaat het gevraagde nadere onderzoek uit twee fasen:

1. Opstellen hydrologisch model.
Opzetten en kalibreren van een hydrologisch model waarmee de effecten van haspelberegening en subirrigatie op het Natura 2000-gebied Turfkoelen kunnen worden gekwantificeerd met de nauwkeurigheid die noodzakelijk is voor de onderbouwing van een Passende Beoordeling in het kader van Natura 2000.
2. Beoordelen alternatief subirrigatie.
Met het in fase 1 ontwikkelde hydrologische model dienen de effecten van subirrigatie in het Flinke Ven op de habitattypen in de Turfkoelen te worden gekwantificeerd.
3. Het model uit fase 1 dient ook geschikt te zijn om in de toekomst de effecten van andere maatregelen op de habitattypen adequaat te voorspellen.

De voorliggende rapportage heeft betrekking op fase 1 van het nadere onderzoek, het opstellen en kalibreren van het hydrologisch model voor de gebieden Flinke Ven, Turfkoelen en wijdere omgeving.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 van deze rapportage volgt een beschrijving van het studiegebied. Deze is grotendeels ontleend aan de eerdere hydrologische modelstudie door Arcadis (Arcadis, 2019).

Hoofdstuk 3 gaat in op de aanpak van de modellering. In dit hoofdstuk worden de werkstappen om te komen tot het hydrologisch model nader toegelicht.

In hoofdstuk 4 beschrijven we de modelopzet. Hierbij wordt ingegaan op de gebruikte basisgegevens en de keuzes ten aanzien van randvoorwaarden en schematisaties.

Na een eerste gevoeligheidsanalyse is een stationaire en tijdsafhankelijke kalibratie van het model uitgevoerd. Hoofdstuk 5 behandelt de stappen en resultaten in de stationaire en tijdsafhankelijke kalibratie van het model.

Aanvullend op de kalibratie is een betrouwbaarheidsanalyse uitgevoerd van de door het hydrologisch model berekende effecten. De resultaten van deze betrouwbaarheidsanalyse worden gepresenteerd en toegelicht in hoofdstuk 6.

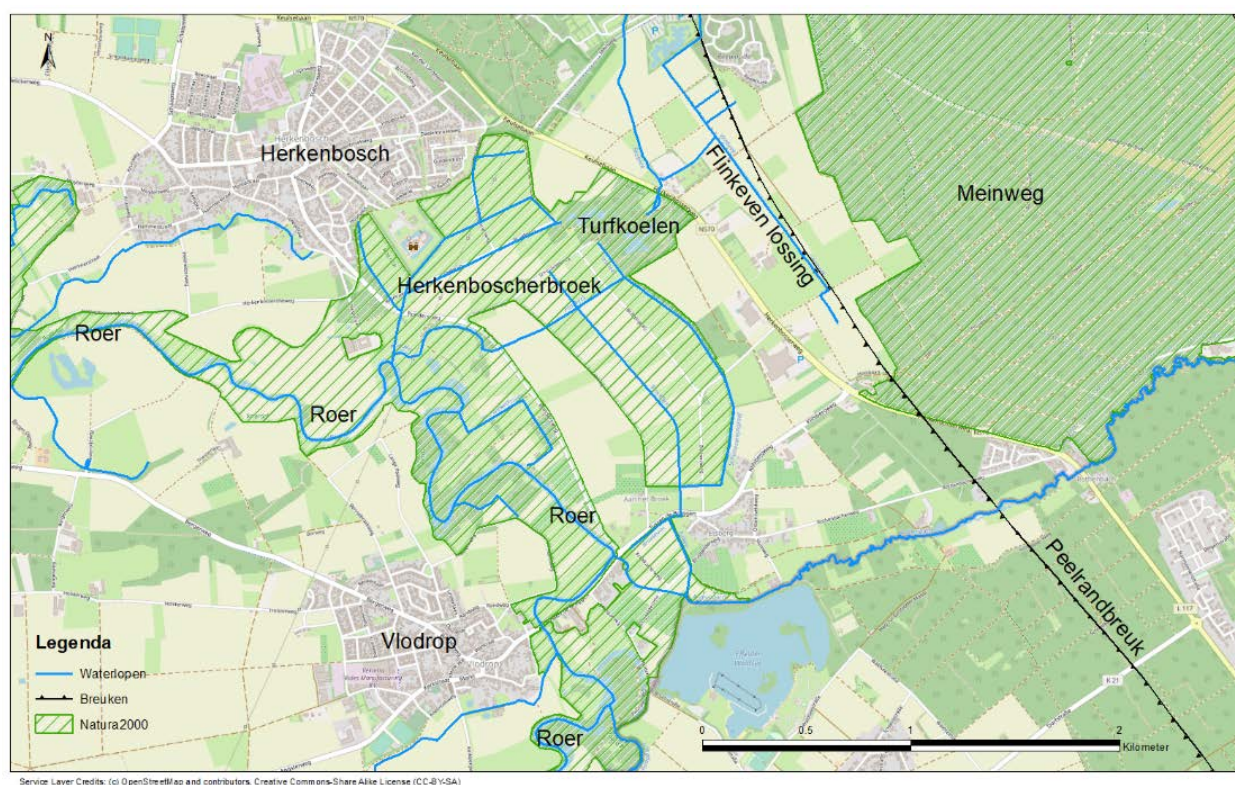
Tot slot volgen in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen.

2 Gebiedsbeschrijving

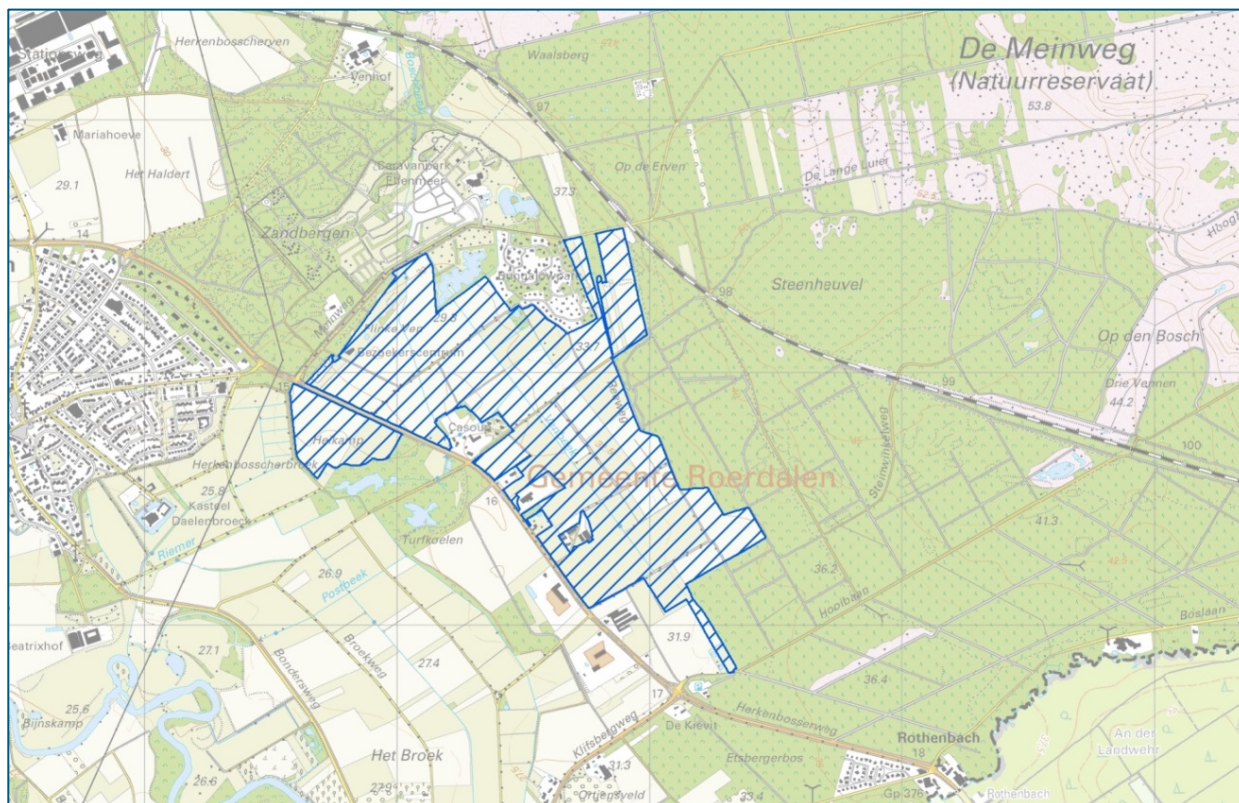
2.1 Algemene gebiedsbeschrijving

Figuren 2-1a en 2-1b geven een overzicht van het studiegebied. Het Flinke Ven en de Turfkoelen liggen in een door ruilverkaveling en landbouw sterk aangepast landschap tussen de Natura2000-gebieden Roerdal en de Meinweg. De Meinweg bestaat voornamelijk uit bos en heidegebied, met een aantal vennen. Tussen de Meinweg en de Turfkoelen ligt het deelgebied Flinke Ven (gebied rondom de Flinkevenlossing (zie figuur 2-4). Hier vindt momenteel vooral landbouw plaats.

De Turfkoelen ligt in een voormalige meander van de Roer en is een moerasgebied met een oppervlakte van ongeveer 8 hectare. Het gebied bestaat uit twee plassen; een zuidelijke en een noordelijke, die gescheiden zijn door een zandweg. De zuidelijke kant is voedselarm en wordt omgeven door gagelstruweel en voedselarm elzen- en berkenbroekbos. De noordelijke kant is omgeven door elzenbroekbos van wisselende kwaliteit. Ten zuidwesten van de Turfkoelen bevinden zich hooilanden waar de omstandigheden voor het donker Pimpernelblauwtje, een beschermde vlindersoort die vroeger veelvuldig voorkwam in het Roerdal, worden verbeterd (vernatting). Ten westen van de Turfkoelen ligt aan de voet van een steilrand ligt het (voormalig) vochtig weilandgebied het Herkenbosscherbroek.



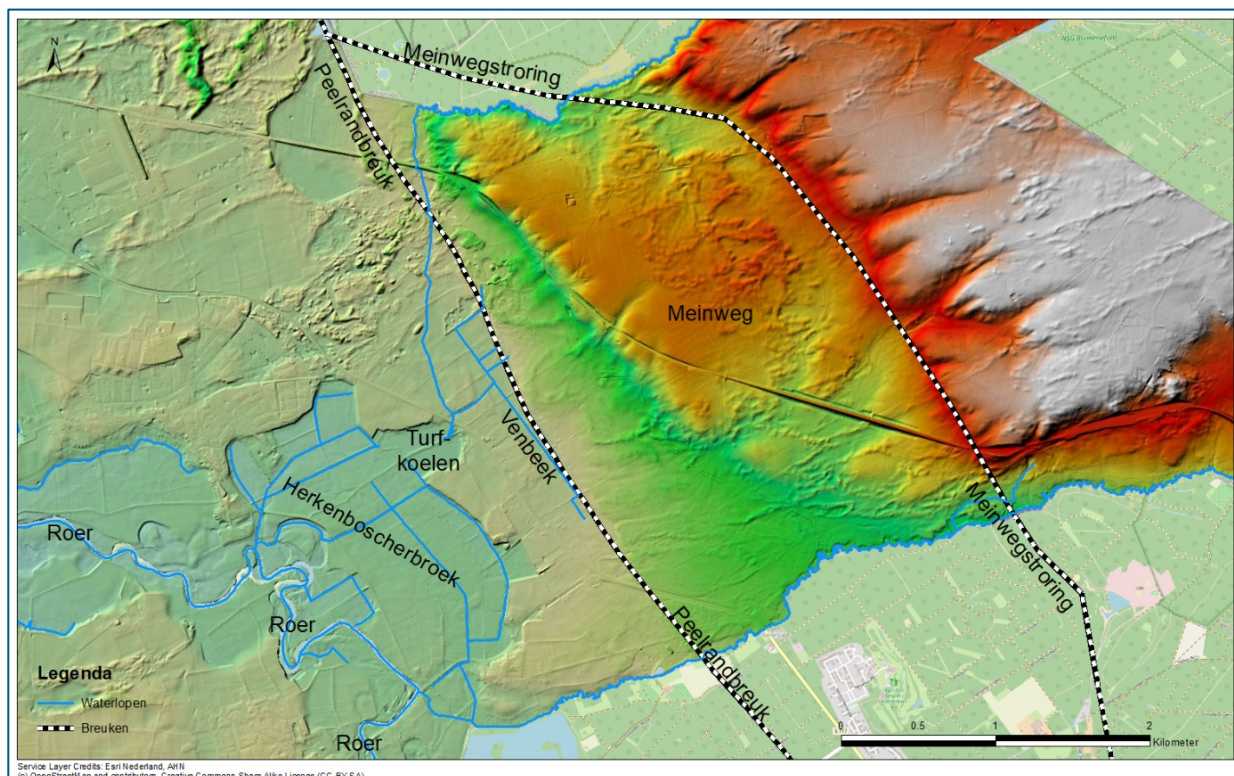
Figuur 2-1a: Overzichtskartaal studiegebied Turfkoelen – Flinke Ven met begrenzing Natura2000-gebieden



Figuur 2-1b: Overzichtskaart studiegebied met begrenzing deelgebied Flinke Ven (blauwe arcering)

2.2 Maaiveldhoogte

Figuur 2-2 geeft voor het studiegebied de maaiveldhoogte (afgeleid uit het AHN-bestand) en de ligging van de geologische breuken weer. In het gebied is een aantal rivierterrassen te onderscheiden, gescheiden door breuken (de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring). De Turfkoelen en het Herkenboscherbroek liggen in het huidige dal van de Roer, op een hoogte van ongeveer 25 m +NAP. De overgang naar het Flinke Ven wordt gevormd door een steilrand. Het Flinke Ven ligt op een hoogte van ongeveer 30 m + NAP. Aan de noordoostzijde van het Flinke Ven ligt de Peelrandbreuk. Hier loopt het maaiveld geleidelijk op van ongeveer 30 m +NAP naar meer dan 35 m +NAP. Verder in noordoostelijke richting loopt het maaiveld in de Meinweg verder op naar ongeveer 50 m +NAP nabij de volgende breuk, de Meinwegstoring. Ten noordoosten van de Meinwegstoring loopt het maaiveld nog verder op tot meer dan 80 m +NAP.



Figuur 2-2: Overzichtskaart maaiveldhoogte en breuken

2.3 Geologie

In figuur 2-3 is een geologisch dwarsprofiel van zuidwest naar noordoost door het studiegebied weergegeven. De geologische opbouw is afkomstig uit REGIS II v2.2 (TNO, 2019c).

Geologisch liggen de Turfkoelen en het grootste deel van het Flinke Ven in de Roerdalslenk. De Roerdalslenk wordt aan de noordoostzijde begrensd door de Peelrandbreuk. De ondergrond is opgebouwd uit dikke lagen Pleistoceen sediment vanuit de Maas en de Rijn. Boven een dik pakket rivierafzettingen bestaande uit grove zanden en grinden (Formaties van Sterksel en Beegden) ligt een deklaag van enkele meters dikte bestaande uit door de wind afgezette fijne zanden en leem (Formatie van Boxtel).



Figuur 2-3: Geologisch dwarsprofiel van zuidwest naar noordoost door het studiegebied (afkomstig uit REGIS II v2.2 (TNO, 2019c).

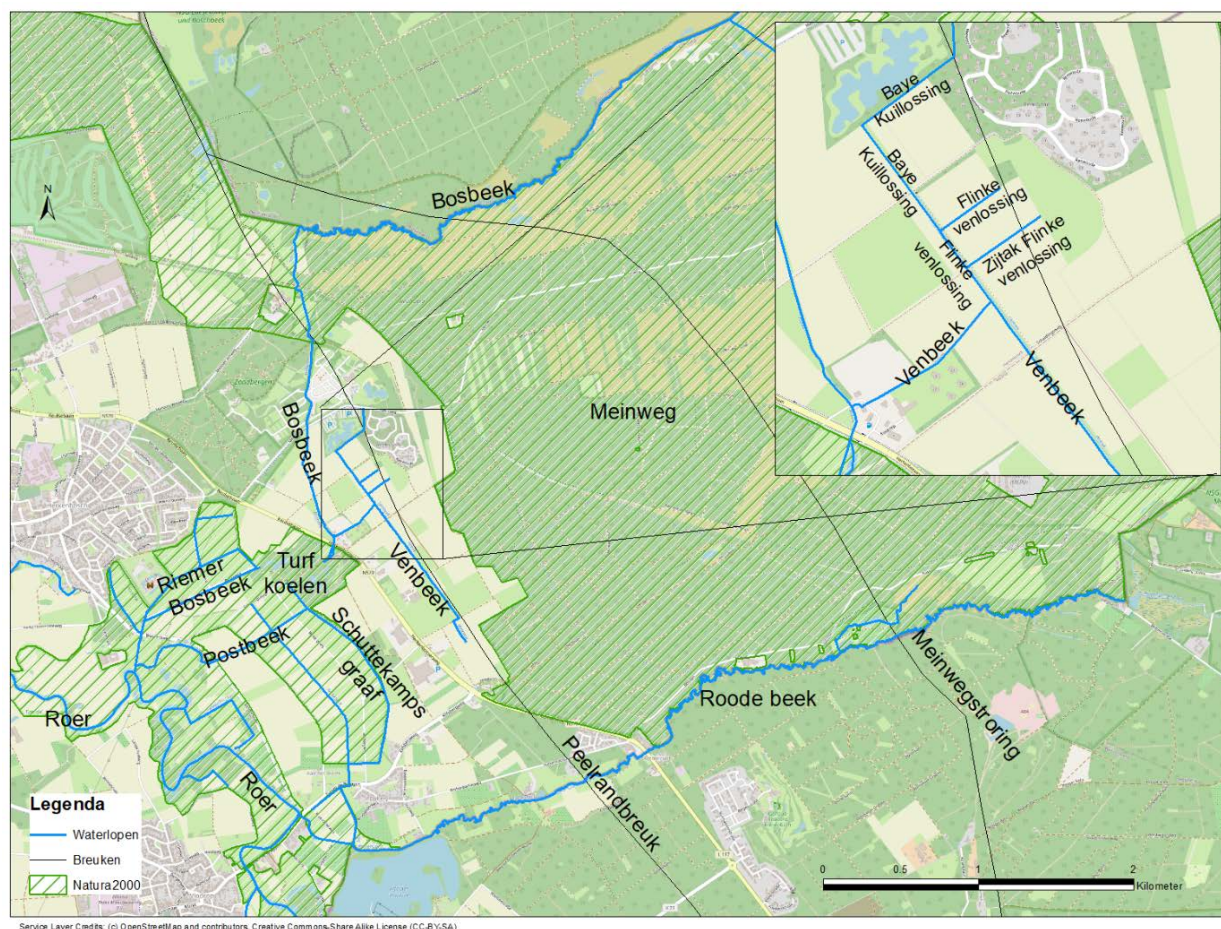
Door herhaaldelijk insnijden en afzettingen door de Roer en de Maas zijn verschillende rivierterrassen ontstaan. In het gebied zijn drie hoofdterrassen te onderscheiden, die begrensd worden door steilranden.

De Turfkoelen ligt in het laagste rivierterras, feitelijk het huidige dal van de Roer. Boven de rivierzanden van de Formaties van Sterksel en Beegden en een dunne laag fijne zanden en leemlagen van de Formatie van Boxtel ligt een Holocene deklaag bestaande uit kleiige afzettingen en veen. Het veen is tot 1850 afgegraven, en daarna weer aangegroeid tot een pakket van ongeveer 2 meter.

2.4 Oppervlaktewater

Figuur 2-4 geeft het oppervlaktewater in het studiegebied weer. In de Roerdalslenk, komen relatief veel watergangen, sloten en greppels voor. Ten noordoosten van de Peelrandbreuk is het afwateringsstelsel zeer beperkt. Aan de noordzijde van het studiegebied stroomt de Boschbeek van oost naar west langs de noordelijke rand van de Meinweg. Na het passeren van de Peelrandbreuk buigt de Boschbeek naar het zuiden af, doorkruist vervolgens de Turfkoelen en mondt ongeveer 500 m verder naar het westen in de Roer uit. Aan de zuidzijde van de Meinweg stroomt van oost naar west de Roode Beek. De Roode Beek mondt ten noorden van Vlodrop, bij het gehucht Tussen de Bruggen, uit in de Roer.

In het Herkenboscherbroek, ten westen en zuidwesten van de Turfkoelen, komt een dicht stelsel van watergangen en sloten voor, waarmee het van oorsprong zeer natte gebied wordt ontwaterd naar de Roer. In het Flinke Ven ligt de Venbeek met aangetakte sloten en zijwatergangen (Flinke Venlossing en Baye Kuillossing). De Venbeek stroomt naar het westen en komt iets ten noorden van de Turfkoelen uit in de Boschbeek.



Figuur 2-4: Beken, watergangen en sloten in het studiegebied

2.5 Waterkwaliteit

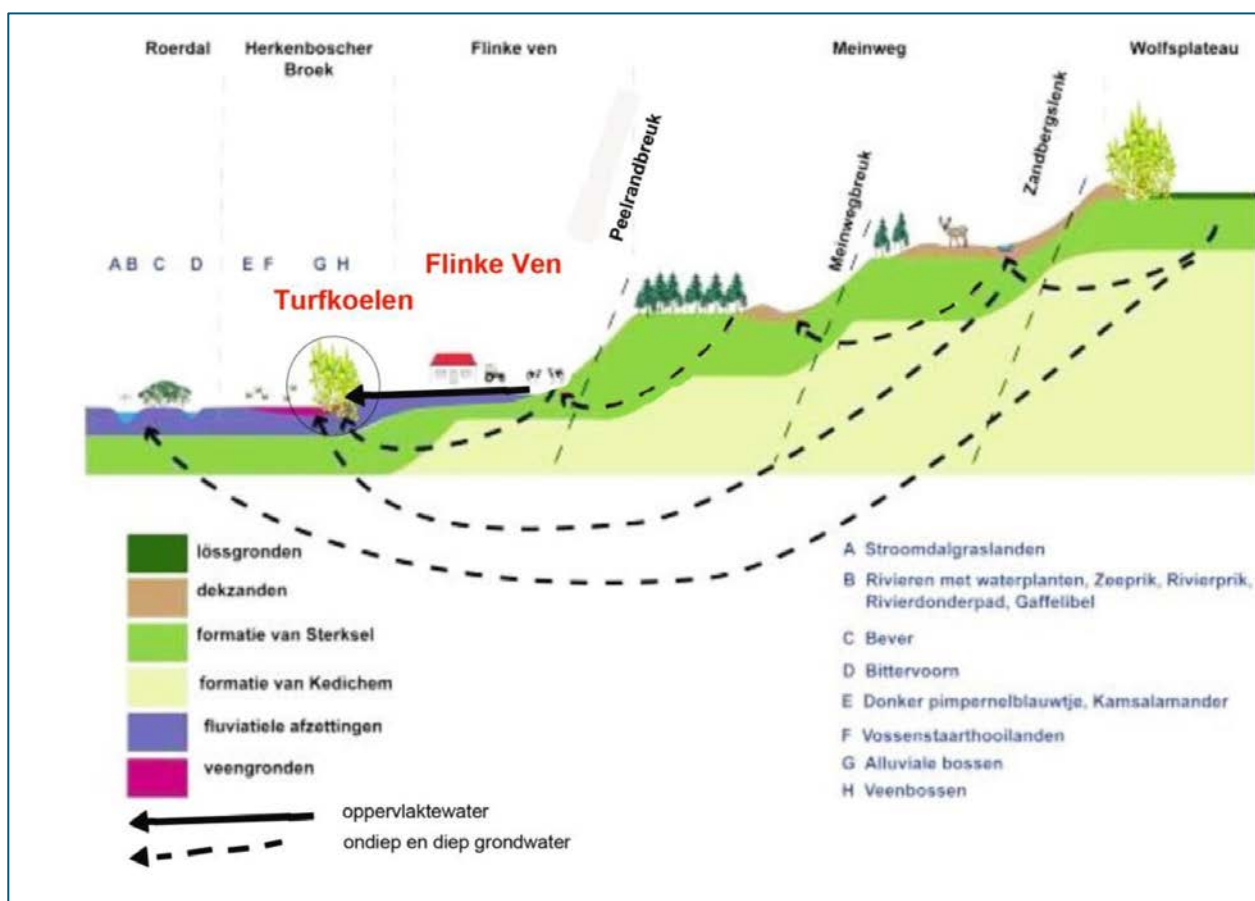
Door de diepe ontwatering van omliggende landbouwgebieden is de kwelaanvoer naar de Turfkoelen verminderd. Relatief gezien komt er meer water het gebied binnen via de Venbeek en de Boschbeek. Dit water is vermoedelijk voedselrijker en bevat minder ijzer dan kwelwater. Dit wordt bevestigd door de beschikbare waterkwaliteitsmetingen (ijzer) in de periode 1998 tot 2017. De bovenloop van de Boschbeek bevat nog relatief veel ijzer, maar in de Venbeek en de Turfkoelen wordt een laag ijzergehalte gemeten (Arcadis, 2019). In enkele sloten in het Flinke Ven, die uitmonden in de Venbeek, is in het veld kwel waarneembaar. Deze sloten voeren het kwelwater af, dat nabij de Peelrandbreuk aan de oppervlakte komt.

Uit toetsingsresultaten van het OGOR-meetnet Limburg (Provincie Limburg, 2013) blijkt dat de grondwaterkwaliteit van de Turfkoelen als slecht is te classificeren. Het water heeft (te) hoge sulfaat-, chloride- en stikstofgehalten, hetgeen wijst op beïnvloeding door uitspoeling vanuit landbouwgronden. De waterkwaliteit in de Venbeek is bij de bovenloop als goed geclassificeerd. Verder in de richting van de Turfkoelen wordt de waterkwaliteit van de beek geleidelijk slecht. De Boschbeek heeft een betere waterkwaliteit, waardoor het nitraat uit de Venbeek verdund wordt, zodra de beken bij elkaar komen. De waterkwaliteit in de Turfkoelen verbetert nog iets na de zandvang die aan de noordoostzijde van het gebied ligt, waar ook meer kwelwater omhoogkomt. In de Turfkoelen treedt als gevolg van verdroging mineralisatie van het aanwezige veen op, wat vervolgens zorgt voor verhoging van de gehalten nitraat in het ondiepe grondwater. Door de opeenvolging van een drietal droge jaren 2018 tot en met 2020 is dit effect mogelijk versterkt.

2.6 Geohydrologie

De rivierterrassen in combinatie met de geologische breuken (Peelrandbreuk en Meinwegstoring) zorgen voor een complexe geohydrologische situatie. In figuur 2-5 is deze complexe situatie schematisch weergegeven.

Een deel van het infiltrerende grondwater op de Meinweg stroomt als regionale kwel naar het dal van de Roer. Een beperkt deel van deze regionale kwel komt ook in de Turfkoelen aan de oppervlakte komen. De Peelrandbreuk en de Meinwegstoring zijn als gevolg van versmering van kleilagen horizontaal slechter doorlatend (dit in tegenstelling tot Figuur 2-5, die een goede horizontale doorlatendheid van de breuken suggereert). Beide breuken zijn met name in de diepere lagen matig tot slecht doorlatend. Hierdoor wordt een deel van het regionale grondwater direct bovenstrooms van deze breuken (aan de noordoostzijde) naar de oppervlakte gedrukt. Dit is onder meer waarneembaar in de zone langs de Peelrandbreuk in het Flinke Ven, waar diepe kwel door een stelsel van sloten wordt afgevoerd naar de Venbeek.



Figuur 2-5: Schematische geohydrologische dwarsdoorsnede van het studiegebied

De Turfkoelen, het Flinke Ven en het Herkenboscherbroek zijn van origine kwelgebieden. Door ingrepen in het verleden, met name het afgraven van veen en de aanleg van een stelsel van afwaterende en ontwaterende sloten, is de kwel aanzienlijk verminderd. Het dichte stelsel van sloten en watergangen in het Flinke Ven zorgt ervoor dat de regionale kwel, die in de zone langs de Peelrandbreuk aan de oppervlakte komt, direct wordt afgevangen en afgevoerd naar de Venbeek en dus niet meer ten goede kan komen aan de natte natuur in de Turfkoelen. Ook de af- en ontwateringssloten in het

Herkenbosscherbroek vangen een deel van de regionale kwel af, hetgeen eveneens heeft geleid tot vermindering van de kwel naar de Turfkoelen.

De bruinkoolwinningen in Duitsland (waaronder Garzweiler) hebben met name in het gebied ten oosten van de Meinwegstoring een verlagend effect op de stijghoogten. Om deze verlagingen (en daarmee samenhangend mogelijke afname van de diepe kwel) te mitigeren, zijn in het verleden -in overleg tussen de Duitse en Nederlandse overheden- op verschillende locaties op Duits grondgebied infiltratieputten geplaatst, waarmee onttrokken grondwater uit de bruinkoolgroeves weer terug in het grondwater wordt gebracht. Een rij infiltratieputten ligt direct over de Nederlands-Duitse grens, tegen de noordoostelijke begrenzing van Natura2000-gebied De Meinweg. Alle, binnen het modelgebied gelegen infiltratievoorzieningen, zijn in het hydrologisch model voor het gebied Turfkoelen-Flinke Ven geschematiseerd als infiltrerende put.

3 Aanpak van de modellering

3.1 Algemeen

Om te komen tot het hydrologisch model voor het gebied Turfkoelen-Flinke Ven zijn de volgende werkstappen doorlopen:

- Verzamelen basisinformatie en opzet van het grondwatermodel.
- Gevoeligheidsanalyse en kalibratie.
- Betrouwbaarheidsanalyse modeluitkomsten.

Deze werkstappen worden hieronder verder toegelicht.

3.2 Verzamelen basisinformatie en opzet van het grondwatermodel

In het verleden zijn verschillende grondwatermodellen ontwikkeld voor het gebied van de Turfkoelen en het Flinke Ven. Te noemen zijn onder meer IBRAHYM versies 1.0, 2.0 en 2.1. In 2014 is op basis van IBRAHYM 2.0 een detailmodel ontwikkeld ten behoeve van het uitvoeringsproject 'Vernattingsproject Schuttecampsgraaf / Turfkoelen' (Grontmij, 2014). Dit detailmodel is verder verbeterd en gekalibreerd in het kader van de studie "Effectbepaling Vernattingsmaatregelen Herkenbosscherbroek" (Sweco, 2018). In 2019 is het "Hydrologisch onderzoek Flinke Ven en Turfkoelen" (Arcadis, 2019) uitgevoerd. Voor dit onderzoek is het IBRAHYM 2.1 model verfijnd, verbeterd met lokale informatie en opnieuw gekalibreerd.

Verder hebben de volgende projecten en onderzoeken nieuwe informatie en inzichten opgeleverd ten aanzien van de geohydrologie:

- GeoTOP Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg (TNO, 2019a).
- Wit, K.E., Rees van, E., Wijnsma, M (mei 1985). Geohydrologisch onderzoek in de omgeving van Herkenbosch (COAL publikatie nr. 19. ICW nota 1624 (<https://edepot.wur.nl/209921>)).
- Laperre R., Balen van R. (2016). VU veldonderzoek 2016 Peelrandbreuk bij de Venbeek.
- Het model IBRAHYM-Roerdalslenk (Deltares, 2019).
- De grensoverschrijdende geohydrologische kartering van de Roerdalslenk (H3O-ROSE, TNO 2019b).
- REGIS II v2.2 (TNO, 2019c).

Probleem is dat geen van de eerder opgezette hydrologische modellen voldeed aan de vereiste betrouwbaarheid voor de onderbouwing van een Passende Beoordeling in het kader van Natura 2000. Om het hydrologisch model dat nu is opgesteld wel te laten voldoen aan deze eisen, heeft als de eerste werkstap een grondige beoordeling en analyse van de bestaande modelleringen en onderzoeken plaatsgevonden. Op basis daarvan is vervolgens een uitgangspuntennotitie opgesteld voor de modellering, waarin onder meer de volgende zaken zijn gespecificeerd:

- Modelbegrenzingsen, gridgrootte en randvoorwaarden.
- Wijze schematisatie oppervlaktewater en topsysteem.
- Geohydrologische lagenschematisatie en schematisatie breuken.
- Aanpak gevoeligheidsanalyse, stationaire en tijdsafhankelijke kalibratie en kalibratieset.

Op basis van deze uitgangspuntennotitie is het grondwatermodel vanuit de basisgegevens opgebouwd. Hoofdstuk 4 gaat hier verder op in.

3.3 Gevoeligheidsanalyse en kalibratie

Om goed inzicht te krijgen in de gevoeligheid van de verschillende modelinvoervariabelen, is voorafgaand aan de stationaire en tijdsafhankelijke modelkalibratie een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. In deze gevoeligheidsanalyse zijn onder meer de volgende variabelen betrokken:

- Horizontale doorlatendheid van de Peelrandbreuk in alle modellagen.
- Verticale weerstand van de Bortel-formatie.
- Horizontale doorlatendheid van de Beegden- en Sterksel-formaties.
- De in- en uittreewestanden van de watergangen en drainages (in iMOD aangeduid als conductances).

Op basis van de resultaten van deze gevoeligheidsanalyse zijn vervolgens de stationaire en tijdsafhankelijke kalibratie uitgevoerd.

De stationaire kalibratie bestond uit een aantal handmatige kalibratieslagen en een tweetal automatische kalibratieslagen, met achtereenvolgens iPEST en Monte Carlo-analyse. In de handmatige kalibratieslagen zijn aanpassingen aan de modelparameters doorgevoerd op basis van geohydrologische inzichten en de resultaten uit de gevoeligheidsanalyse. In de automatische kalibratieslagen zijn de gevoelige modelparameters, onder meer de weerstand van de Bortel-formatie, de doorlatendheid van de Maasafzettingen (Formatie van Beegden), de horizontale doorlatendheid van de Peelrandbreuk, verder geoptimaliseerd. De stationaire kalibratie is in de volgende stappen uitgevoerd:

1. Kalibratie stijghoogten op het gebied ten oosten van de Peelrandbreuk (met name het gebied ten oosten van de Meinwegstoring, het Wolfspaleau).
2. Kalibratie van de doorlatendheid van de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring, op basis van gemeten stijghoogten aan weerszijden van de breuken.
3. Kalibratie van de Roerdalslenk.
4. Verdere fijnregeling rondom het Flink Ven en de Turfkoelen.

Vervolgens is een tijdsafhankelijke kalibratie uitgevoerd. Deze is met name gericht op hoe het model de fluctuaties van grondwaterstanden en stijghoogten in de tijd reproduceert (de dynamiek).

3.4 Betrouwbaarheidsanalyse modeluitkomsten

In de (theoretische) ideale situatie zijn voor een hydrologische modellering alle benodigde invoerparameters bekend. In de praktijk is dit vrijwel nooit het geval en is er een flink aantal onbekenden. In het deelgebied Turfkoelen – Flink Ven zit de belangrijkste onzekerheid in de ligging en de eigenschappen van de Peelrandbreuk. Deze onzekerheden hebben er waarschijnlijk voor gezorgd dat het tot dusver nog steeds niet gelukt is om een voldoende betrouwbaar hydrologisch model voor Turfkoelen – Flink Ven te ontwikkelen.

Gezien de onzekerheden met betrekking tot de ligging en doorlatendheid van de Peelrandbreuk en andere onzekerheden, bijvoorbeeld de verbreiding van leemlagen in de Bortel-formatie en de ruimtelijke verdeling van de doorlatendheden in de Formatie van Beegden, is het aannemelijk dat er meerdere combinaties van modelinvoervariabelen zijn die tot een vergelijkbaar goede reproductie van de gemeten grondwaterstanden en stijghoogten leiden. Om deze reden is aanvullend op de gevoeligheidsanalyse en de stationaire en tijdsafhankelijke kalibratie een betrouwbaarheidsanalyse uitgevoerd op de -met het model berekende- effecten. Doel hiervan is om de gevolgen van de onzekerheid met betrekking tot de doorlatendheid van de Peelrandbreuk en andere ondergrondparameters voor de berekende effecten van maatregelen inzichtelijk te maken en te kwantificeren.

De betrouwbaarheidsanalyse bestond uit de volgende twee stappen:

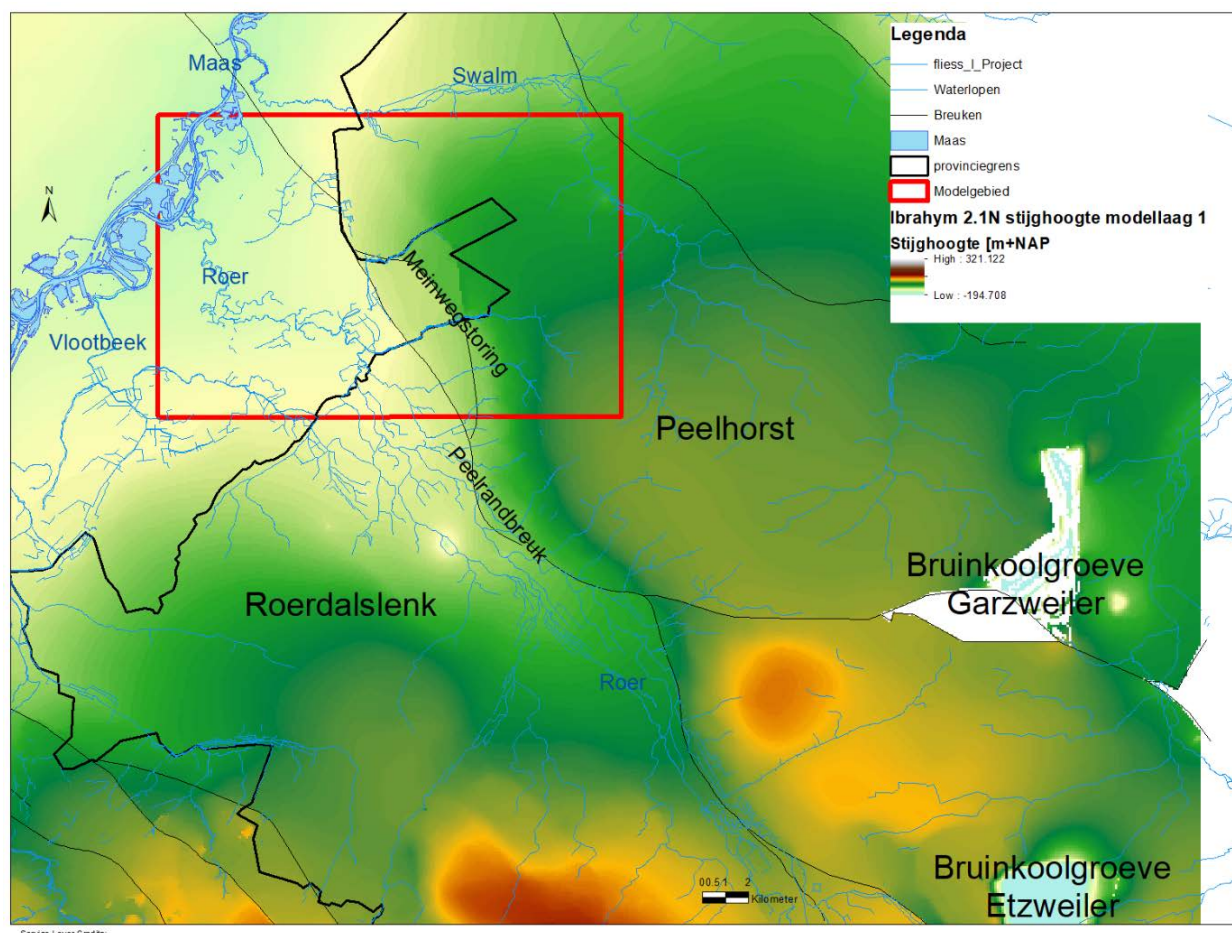
- Afleiden twee alternatieve geoptimaliseerde hydrologische modellen. Aanvullend op het gekalibreerde hydrologische model zijn twee alternatieve hydrologische modellen afgeleid, één met een verlaagde horizontale doorlatendheid van de Peelrandbreuk en één met een verhoogde horizontale doorlatendheid van de Peelrandbreuk. De alternatieve modellen zijn geselecteerd uit de 10 beste parametercombinaties uit de Monte Carlo analyse (onderdeel van de stationaire kalibratie). Uit deze top10-best scorende “kandidaat” modellen is het model geselecteerd waarmee -naar verwachting- de sterkste verbreiding van effecten wordt berekend (grootste doorlatendheid Peelrandbreuk en/of hoogste doorlatendheid Formatie van Beegden) en het model met -naar verwachting- de geringste verbreiding van effecten (geringste doorlatendheid Peelrandbreuk en/of laagste doorlatendheid Formatie van Beegden).
- Vervolgens is met de drie modellen (gekalibreerd model en twee alternatieve modellen met sterkste en geringste verbreiding effecten) een tweetal generieke maatregelen doorgerekend, te weten:
 - aanleg van subirrigatie over de volledige oppervlakte van het Flinke Ven.
 - aanpassen ontwatering in het Flinke Ven conform het scenario “landbouw met beperkingen” dat eerder is doorgerekend door Arcadis (2019). Dempen van een aantal waterlopen en peil van de Flinke Ven Lossing naar 70 cm onder maaiveld.

Door de berekende effecten van de drie modellen met elkaar te vergelijken ontstaat inzicht in de mate waarin modelonzekerheden doorwerken in de berekende effecten op de Turfkoelen en omgeving. Op basis hiervan is een eerste indicatie gegeven van het betrouwbaarheidsinterval in de berekende effecten.

4 Opzet van het hydrologisch model

4.1 Modelgebied en randvoorwaarden

Figuur 4-1 geeft de begrenzing van het grondwatermodel weer. De modelranden zijn zodanig gekozen dat de opgelegde randvoorwaarden geen invloed hebben op de berekende effecten in het interessegebied (Turfkoelen en Flinke Ven).

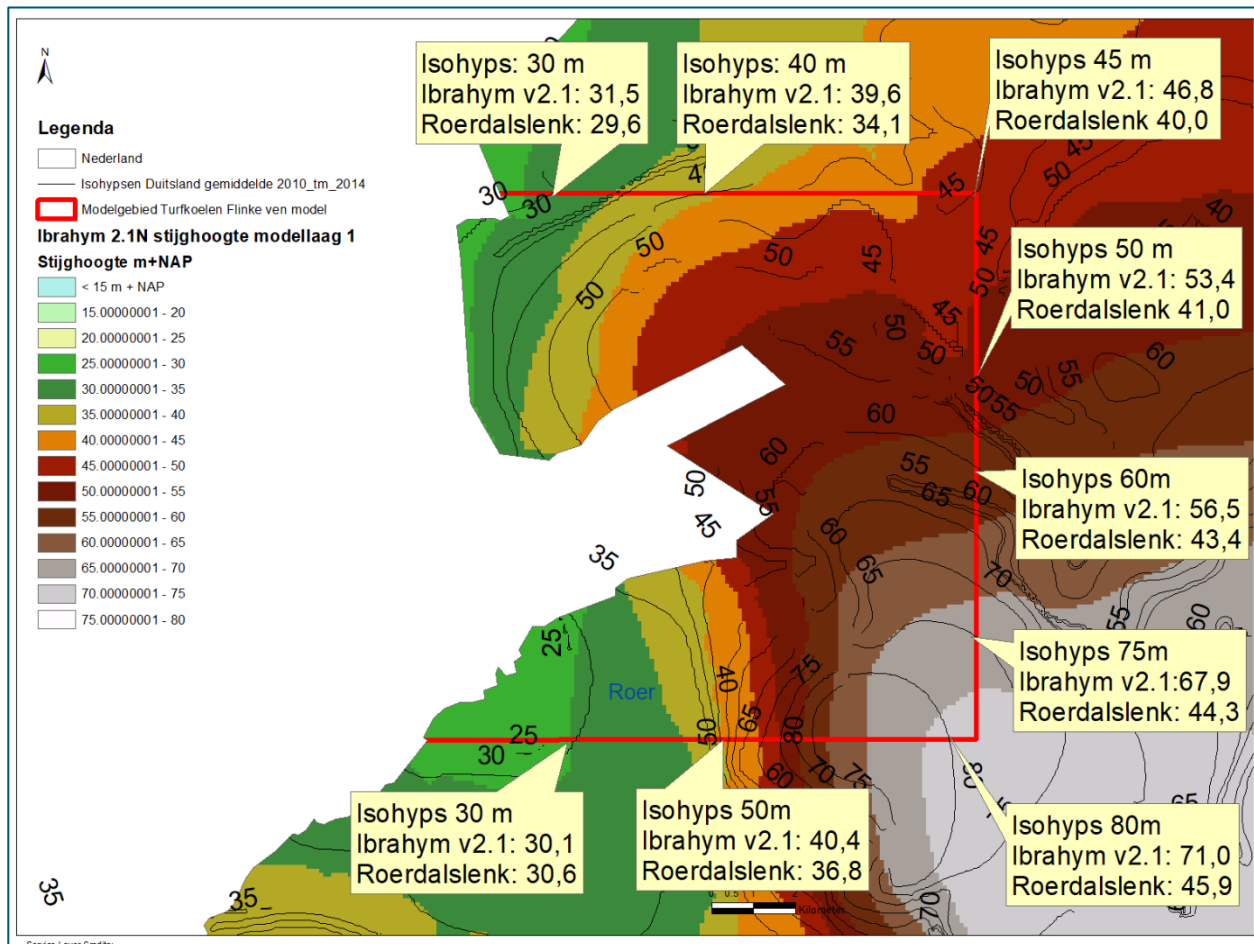


Figuur 4-1: Begrenzing grondwatermodel Turfkoelen en Flinke Ven

Op de modelranden zijn vaste stijghoogten opgelegd als randvoorwaarde. Deze randstijghoogten zijn overgenomen uit het regionale IBRAHYM v2.1N model. Recentelijk is ook het IBRAHYM Roerdalslenk model opgeleverd. In dit model is het lagenmodel voor de Roerdalslenk in Duitsland verbeterd. Echter, op de Peelhorst berekent het IBRAHYM Roerdalslenk model veel lagere stijghoogten dan IBRAHYM v2 en ook veel lagere stijghoogten dan de metingen. Omdat voor het grondwatermodel voor Turfkoelen en Flinke Ven de oostelijke modelranden zijn gekozen ter plaatse van de Peelhorst, is besloten om de stijghoogten op deze oostelijke modelranden uit het IBRAHYM v2 model over te nemen en niet uit het recentere IBRAHYM Roerdalslenk model.

Figuur 4-2 geeft een vergelijking weer van de stijghoogten op de oostelijke modelrand berekend door het IBRAHYM v2 model resp. het IBRAHYM Roerdalslenk model. Tevens geeft de figuur het isohypsenverloop weer dat is afgeleid op basis van Duitse peilbuismetingen. Figuur 4-2 laat zien dat de stijghoogten berekend door IBRAHYM v2 aanzienlijk beter overeenkomen met de isohypsen dan de

stijghoogten berekend door het IBRAHYM Roerdalslenk model. Dit ondersteunt de keuze om de stijghoogten op de oostelijke modelrand over te nemen uit het IBRAHYM v2 model.



Figuur 4-2: Berekende stijghoogten ter plaatse van de oostelijke modelrand IBRAHYM v2 vs. IBRAHYM Roerdalslenk model. Vergelijking met isohypsen afgeleid uit Duitse peilbuismetingen

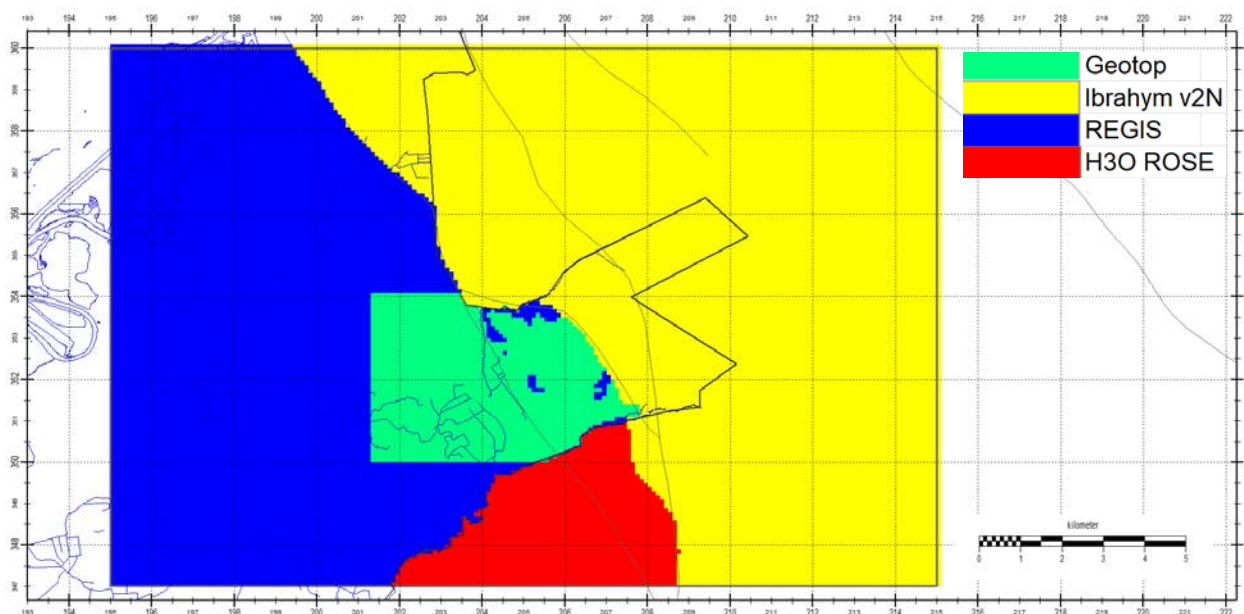
4.2 Modelschematisatie ondergrond

4.2.1 Algemeen

Voor het grondwatermodel Turfkoelen en Flinke Ven is de modelschematisatie van de ondergrond (het lagenmodel) opnieuw opgebouwd. Voor de bouw van dit lagenmodel is gebruik gemaakt van de volgende vier databronnen:

1. REGIS II v2.2 (TNO, 2019c)
2. H3O Rose (TNO, 2019b)
3. Het IBRAHYM v2 model (Deltares, 2019).
4. GeoTOP (TNO, 2019a).

Figuur 4-3 geeft aan waar welke databron is gebruikt voor de opbouw van het lagenmodel.



Figuur 4-3: Overzicht databronnen lagenmodel Turfkoelen Flinke Ven. Blauw: REGIS II v2.2, rood: H3O Rose, geel: lagenmodel IBRAHYM v2 en groen: Holocene en Formatie van Boxtel uit REGIS vervangen door GeoTOP

Voor het Nederlands deel van de Roerdalslenk is het lagenmodel gebaseerd op REGIS II v2.2 (blauwe gebied in Figuur 4-3). Voor het Duitse deel van de Roerdalslenk is de lagenopbouw overgenomen uit H3O Rose (rode gebied in Figuur 4-3). De laagopbouw van H3O Rose sluit goed aan op die van REGIS II v2.2. Voor de Peelhorst (zowel het Nederlandse als het Duitse deel, geel gemarkeerd in Figuur 4-3) is uitgegaan van het lagenmodel van het regionale model IBRAHYM v2. Voor het groen gemarkeerde deel van het modelgebied in Figuur 4-3 is de Holocene deklaag en de Formatie van Boxtel uit REGIS vervangen door GeoTOP. De diepere lagen zijn gebaseerd op REGIS II v2.2.

Om te komen tot de modelschematisatie voor de ondergrond zijn de volgende werkstappen doorlopen:

1. Koppelen van (Duitse) ondergrondmodellen aan REGIS (zie paragraaf 4.2.2).
 - Koppelen H3O ROSE aan REGIS
 - Koppelen Ibrahim v2 lagenmodel aan REGIS.
2. Inbrengen van aanvullende informatie (user defined layers) uit Geotop binnen het aandachtsgebied (zie paragraaf 4.2.3).
 - Vervangen van het Holocene en de Boxtel-formatie uit REGIS door laaginformatie uit GeoTOP.
3. Vertaling van detail-lagen naar modellagen (zogenoemde mapping, zie paragraaf 4.2.4). In deze stap is de vertaling gemaakt van de bodemlagen zoals onderscheiden in de geologische basisinformatie (detail-lagenmodel) naar modellagen in het grondwatermodel.

De methodiek om te komen tot het lagenmodel is volledig geautomatiseerd en daardoor reproduceerbaar. Deze methodiek is eerder door Sweco en Royal HaskoningDHV ontwikkeld en toegepast voor het genereren van een nieuw ondergrondmodel voor de regionale grondwatermodellen MIPWA en AZURE.

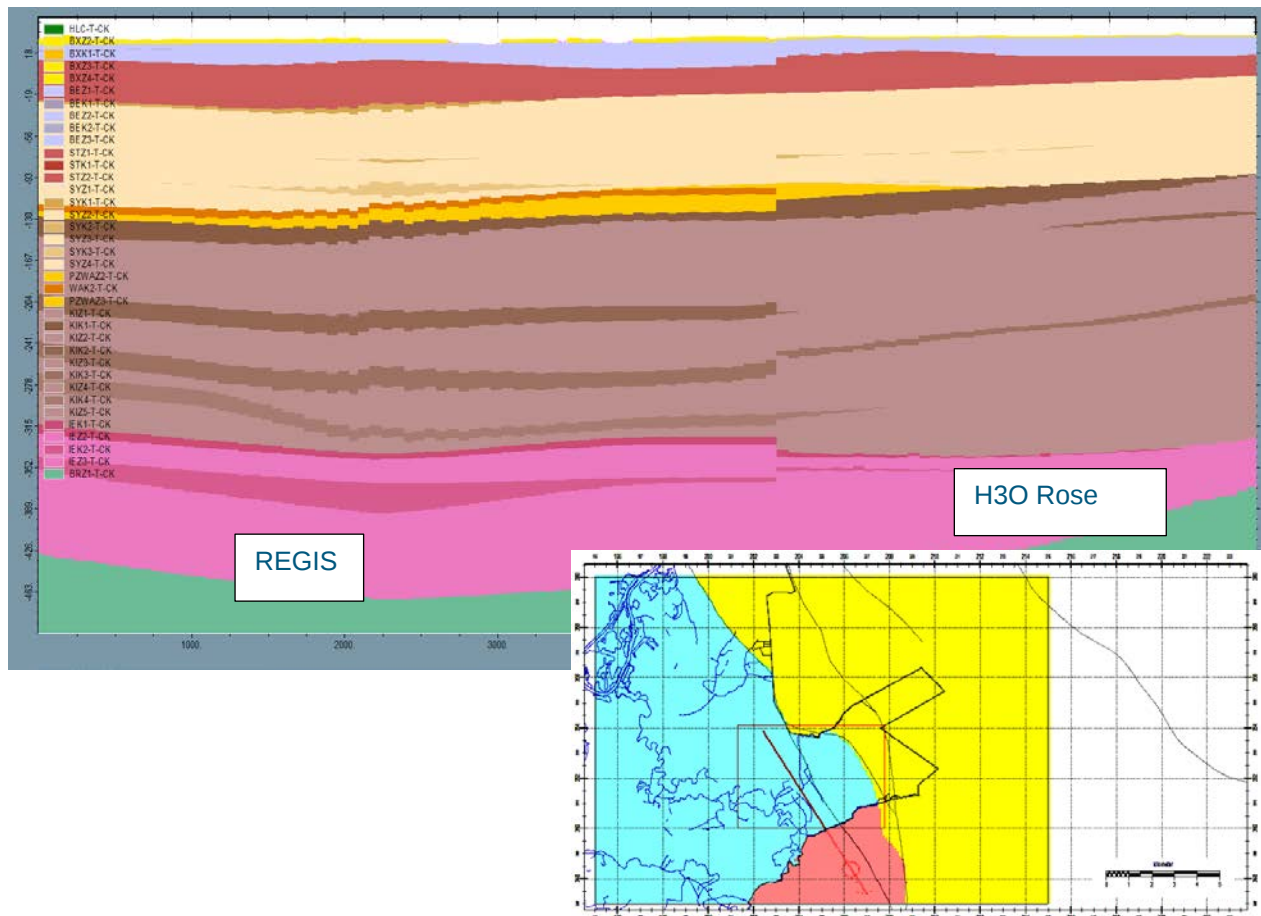
4.2.2 Koppelen van Duitse ondergrondmodellen aan REGIS

Koppelen H3O ROSE aan REGIS

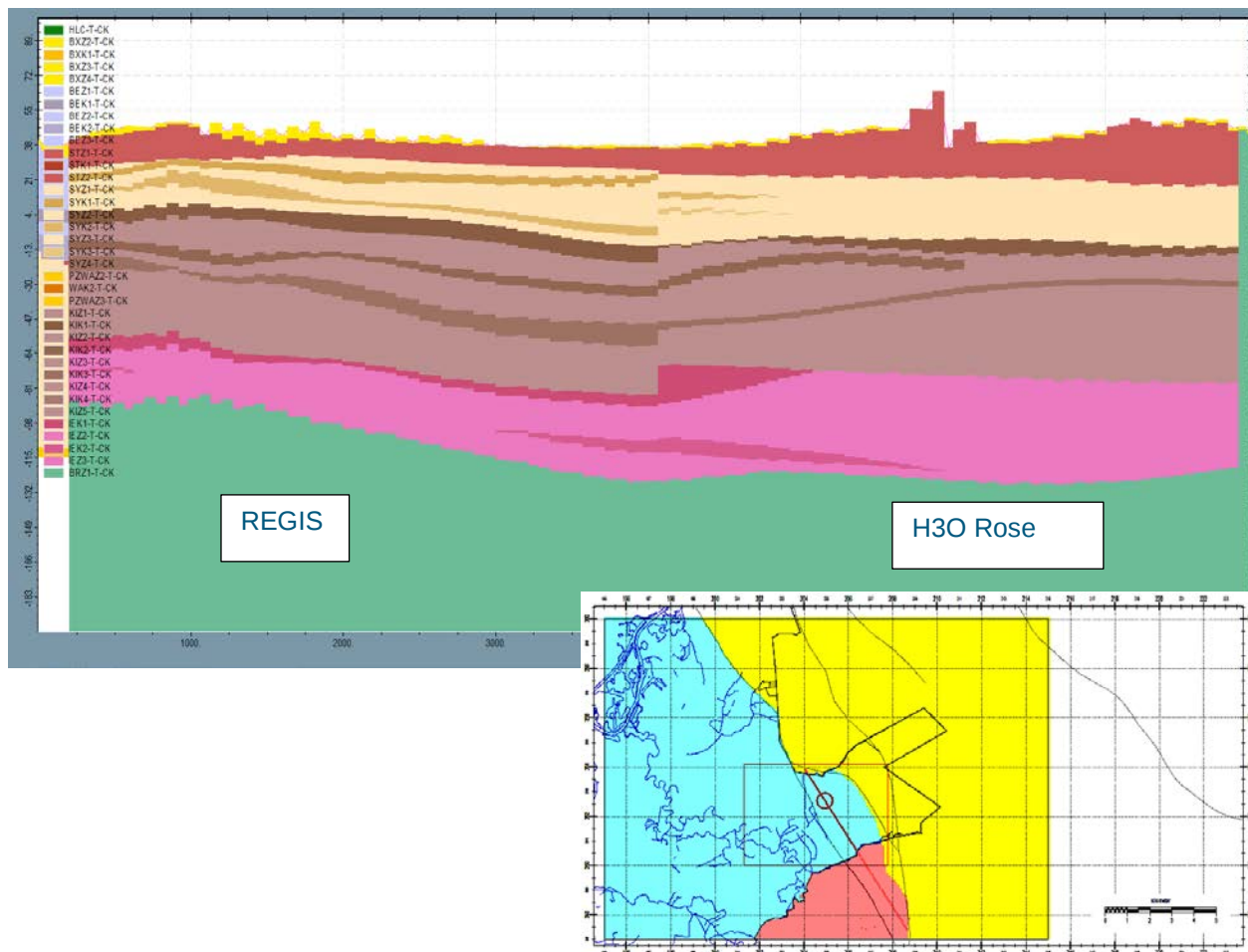
Voor het koppelen van de Duitse ondergrondmodellen vanuit H3O ROSE aan REGIS is gebruik gemaakt van een koppeltabel, waarin is gespecificeerd aan welke REGIS lagen de modellagen uit H3O ROSE gekoppeld zijn. Deze koppeltabel is opgenomen als Tabel 1 in bijlage 1.

REGIS lagen die niet in de koppeltabel voorkomen houden een NoData waarde in Duitsland. REGIS en H3O Rose zijn echte hydrogeologische lagenmodellen en sluiten goed op elkaar aan. Figuren 4-4 en 4-5 geven voor twee doorsneden de overgang tussen REGIS en H3O ROSE weer.

In H3O ROSE zijn geen hydraulische parameters van de verschillende formaties opgenomen. Voor de doorlatendheden (horizontaal en verticaal) is uitgegaan van gemiddelde waarden uit REGIS. De aangenomen doorlatendheden zijn opgenomen in Tabel 3 van Bijlage 1.



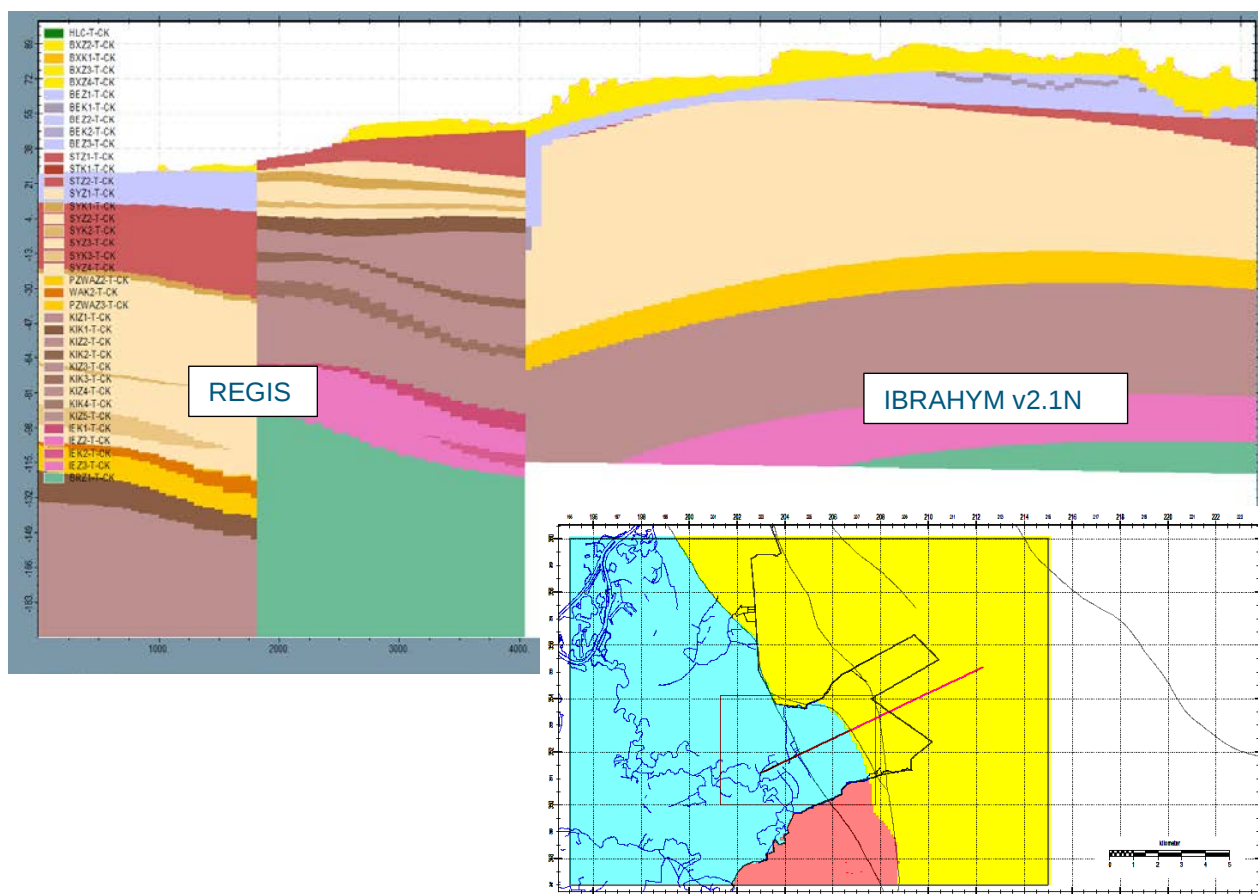
Figuur 4-4: Doorsnede met overgang REGIS naar H3O ROSE. Inzet rechtsonder geeft de ligging van het dwarsprofiel weer



Figuur 4-5: Doorsnede met overgang REGIS naar H3O ROSE. Inzet rechtsonder geeft de ligging van het dwarsprofiel weer

Koppelen IBRAHYM v2 lagenmodel aan REGIS

De modellagen in IBRAHYM v2.1N zijn geschematiseerd op basis van de ligging van kleilagen. De afzonderlijke kleilagen zijn daarbij toegekend aan de scheidende lagen in het model, maar de modellagen zelf zijn niet direct te relateren aan geologische formaties. De modellagen voor de Peelhorst (afkomstig uit IBRAHYM v2.1 N) zijn gekoppeld aan REGIS-lagen in de Roerdalslenk, zie Figuur 4-6. Ook de hydraulische eigenschappen van de modellagen op de Peelhorst zijn overgenomen uit IBRAHYM v2.1 N.



Figuur 4-6: Doorsnede met overgang REGIS naar IBRAHYM v2.1N op de Peelhorst. Inzet rechtsonder geeft de ligging van het dwarsprofiel weer.

4.2.3 Inbrengen aanvullende informatie uit GeoTOP

GeoTOP geeft meer gedetailleerde informatie over de opbouw en hydraulische eigenschappen van de Holocene afzettingen en de Formatie van Bortel. Het bestaat uit een lagenmodel en een voxelmodel. De boven- en onderkanten (tops en bots) van de in GeoTOP onderscheiden bodemlagen zijn afgeleid uit het lagenmodel. De hydraulische parameters van de onderscheiden deelformaties zijn afgeleid uit het voxelmodel.

De verwerking van GeoTOP in het lagenmodel van het grondwatermodel Turfkoelen-Flinke Ven bestond uit de volgende twee werkstappen:

- Vervangen Holocene en Bortel-formatie uit REGIS door één GeoTOP-formatie;
- Invoegen van de verschillende bodemlagen die zijn onderscheiden in Geotop.

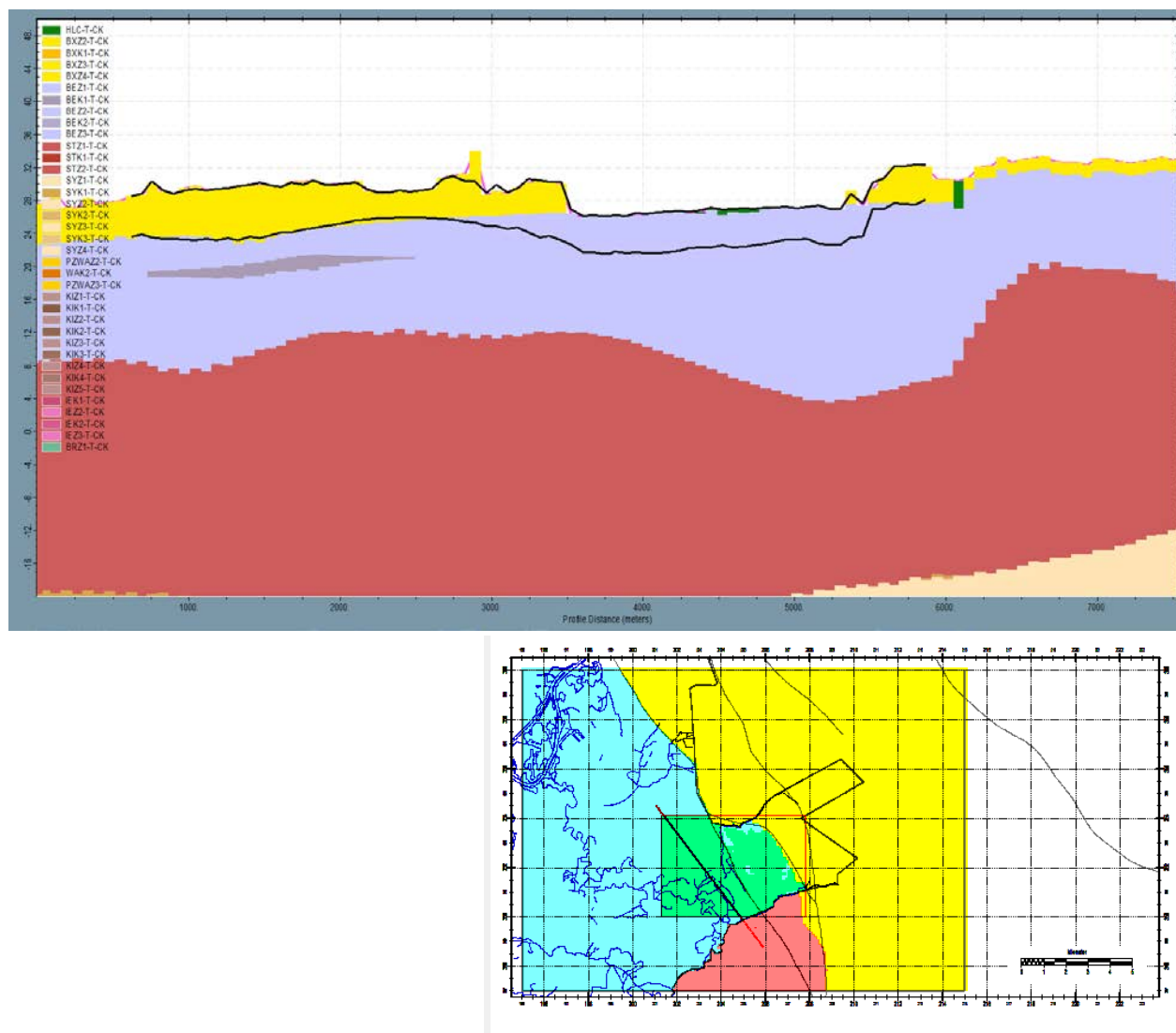
Deze werkstappen worden hieronder nader toegelicht.

Deze verfijningsslag van de bovenste lagen in het grondwatermodel was nodig om de effecten van ingrepen in de drainage en de effecten van subirrigatie met het vereiste detail te kunnen modelleren. Hiervoor was het namelijk van belang om -ten opzichte van IBRAHYM v2.1N en het eerder door Arcadis opgezette grondwatermodel- meerdere modellagen te onderscheiden in de deklaag boven het eerste watervoerende pakket (Formatie van Bortel en Holocene).

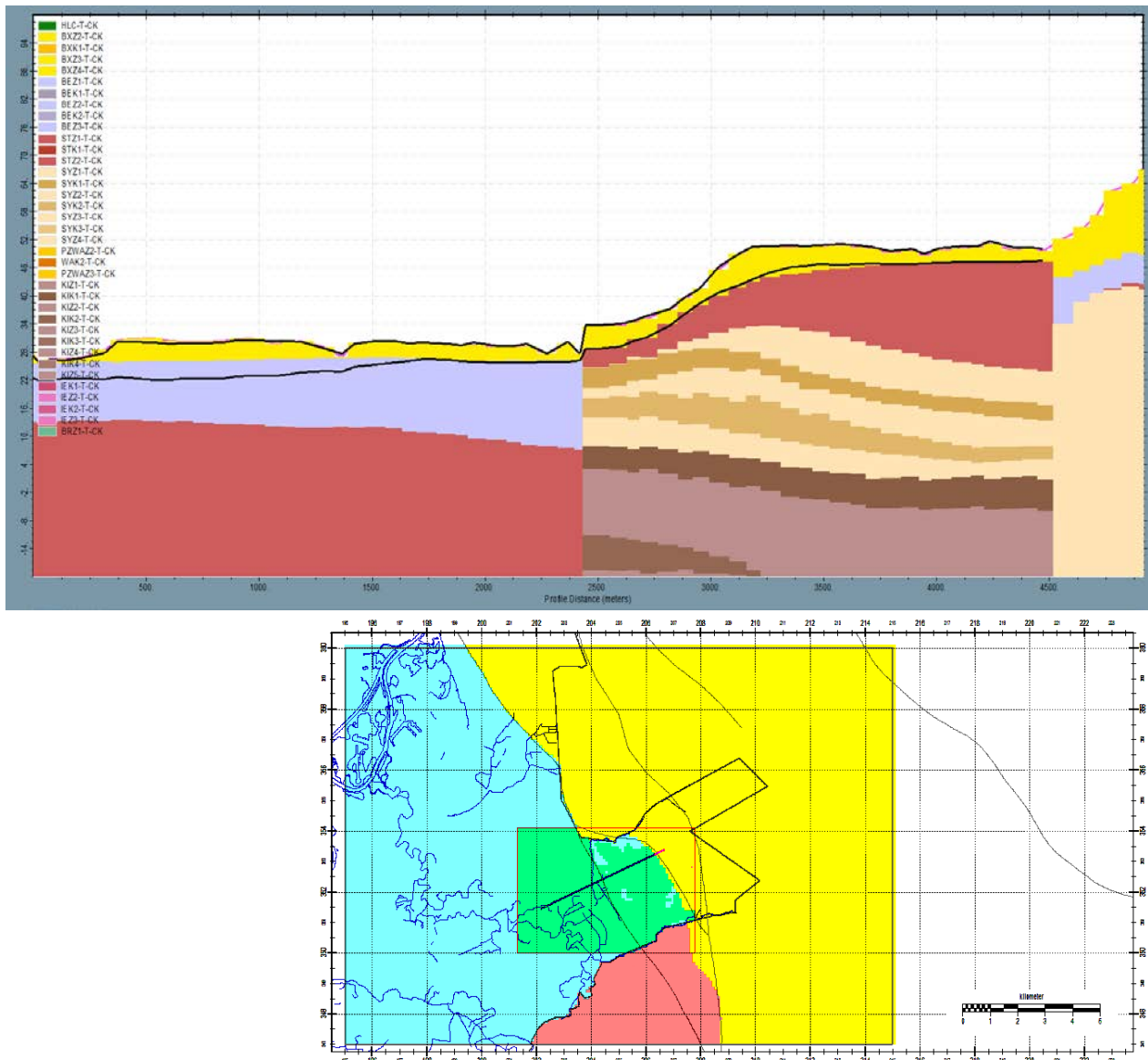
Vervangen Holocene en Bostel-formatie uit REGIS door één GeoTOP-formatie

De aanvullende informatie uit GeoTOP is m.b.v. de NHI-Lagenmodule ingebracht in het lagenmodel. Dit is gebeurd voor het aandachtsgebied. Als eerste werkstap zijn het Holoceen en de Bostel-formatie uit REGIS geheel vervangen door één formatie, gebaseerd op de bovenkant van het Holoceen en de onderkant van de Bostel-formatie uit GeoTOP.

Figuren 4-7 en 4-8 geven voor twee dwarsdoorsnedes de opbouw van de REGIS-formaties weer en tevens de ligging van de boven- en onderkant van GeoTOP. De REGIS-eenheden zijn ingekleurd en de boven- en onderkant van GeoTOP zijn weergegeven als zwarte lijnen. Opvallend is dat in GeoTOP binnen het Roerdal (Turkoeien en ook het Herkenboscherbroek) een veel dikkere deklaag wordt aangenomen dan in REGIS. De onderkant van GeoTOP ligt hier ruim onder de bovenkant van de Formatie van Beegden volgens REGIS (paars weergegeven laag). Buiten het Roerdal komen de onderkant van GeoTOP en de onderkant van de Formatie van Bostel in REGIS wel goed overeen.



Figuur 4-7: Dwarsdoorsnede REGIS II v2.2 (gekleurde lagen) met de ligging van de boven- en onderkant van GeoTOP (zwarte lijnen). Ligging van het dwarsprofiel in de inzet rechtsonder.



Figuur 4-8: Dwarsdoorsnede REGIS II v2.2 (gekleurde lagen) met de ligging van de boven- en onderkant van GeoTOP (zwarte lijnen). Ligging van het dwarsprofiel in de inzet rechtsonder.

De hydraulische parameters van de in GeoTOP onderscheiden deelformaties zijn overgenomen uit GeoTOP. Voor elke deelformatie is het totale doorlaatvermogen (transmissiviteit, kD -waarde) en de weerstand bepaald op basis van het GeoTOP voxelmodel. De horizontale doorlatendheid per deelformatie is bepaald door de transmissiviteit te delen door de dikte; de verticale doorlatendheid per deelformatie volgt uit de dikte gedeeld door de weerstand.

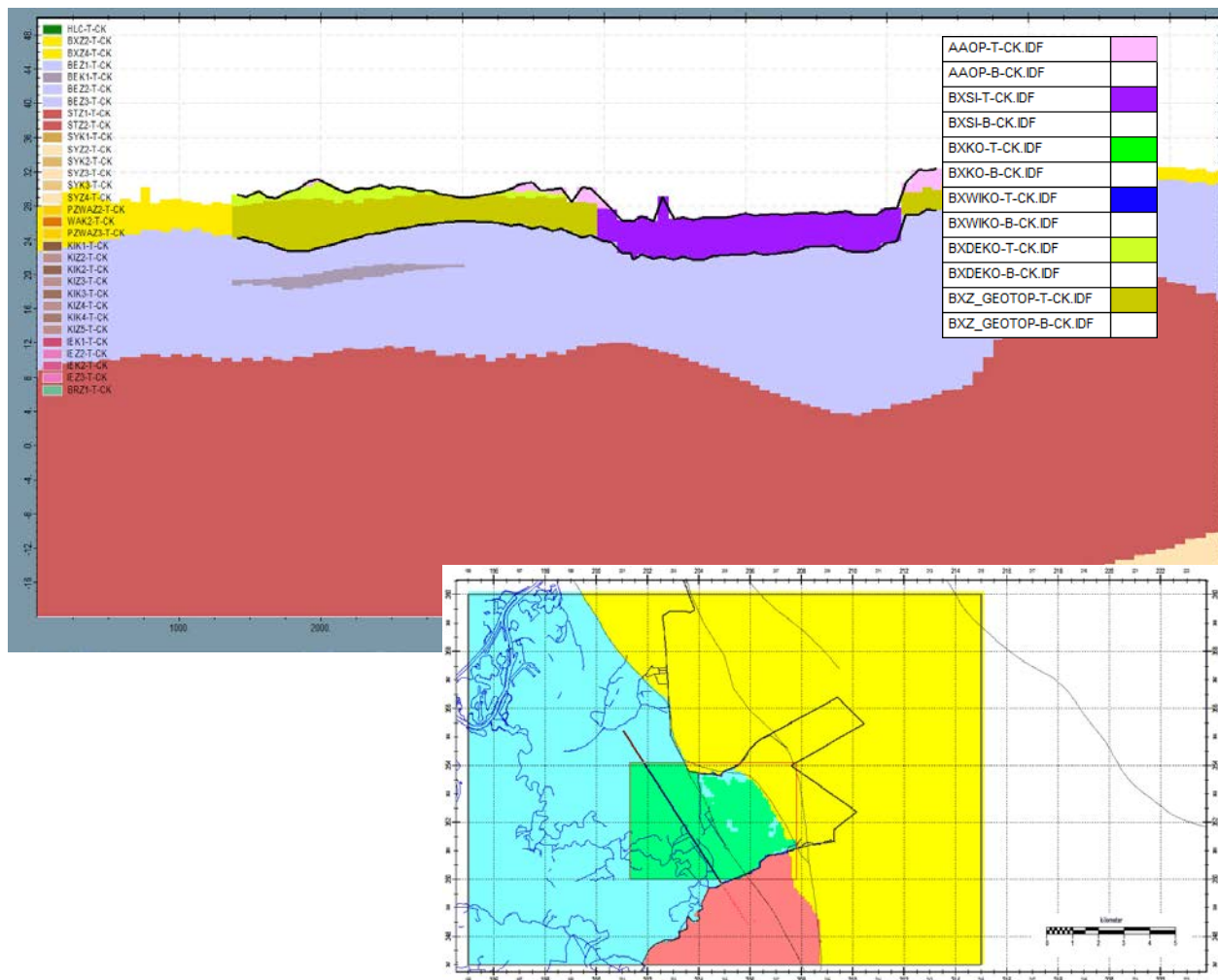
Invoegen van de verschillende bodemlagen uit Geotop

Als tweede stap zijn de verschillende, binnen GeoTOP onderscheiden, bodemlagen in het detail-lagenmodel ingebracht. Ook deze stap is geautomatiseerd en reproduceerbaar uitgevoerd met de NHI-lagenmodule.

De volgende Holocene en Boxtel-deelformaties zijn in Geotop onderscheiden:

- AAOP: Antropogeen (opgebrachte grond);
- BXS1: Laagpakket van Singraven. *Kleinschalig fluviatiel of fluvioperiglaciaal (beek), inclusief geul (zand), oever en kom (silt en klei), en moeras (veen en gyttja);*
- BXKO: Laagpakket van Kootwijk: eolisch stuifzand;
- BXWIKO: Laagpakket van Wierden: eolisch dekzand;
- BXDEKO: Laagpakket van Delwijnen: eolische rivierduin;
- BX_GEOTOP: Formatie van Boxtel ongedefinieerd: eolische zandafzetting die niet is ingedeeld bij een specifiek onderscheiden laagpakket.

Voor een verdere toelichting op de onderscheiden deelformaties binnen de Formatie van Boxtel wordt verwezen naar <https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator/naar-ouderdom/holocene/formatie-van-boxtel>. Figuur 4-9 geeft een dwarsprofiel met daarin de in het detail-lagenmodel ingebrachte Holocene en Boxtel-deelformaties vanuit GeoTOP.



Figuur 4-9: Dwarsdoorsnede REGIS II v2.2 met ingebrachte Holocene en Boxtel-deelformaties vanuit GeoTOP. Ligging van het dwarsprofiel in de inzet rechtsonder.

4.2.4 Vertaling van de detail-lagen naar modellagen (mapping)

In deze stap is de vertaling gemaakt van de bodemlagen zoals onderscheiden in de geologische basisinformatie (detail-lagenmodel) naar modellagen in het grondwatermodel. Deze werkstap is geautomatiseerd en reproduceerbaar uitgevoerd met de NHI-lagenmodule.

Met uitzondering van de antropogene toplaag zijn alle ingebrachte GeoTOP-lagen uit het detail-lagenmodel opgesplitst in een watervoerend en een scheidend deel. Het watervoerende deel heeft de totale transmissiviteit gekregen van de formatie en het weerstandsdeel de totale weerstand. De verdeling in dikte tussen het watervoerende en scheidende deel is 50-50.

De indeling van de modellagen (mapping) binnen GeoTOP is als volgt:

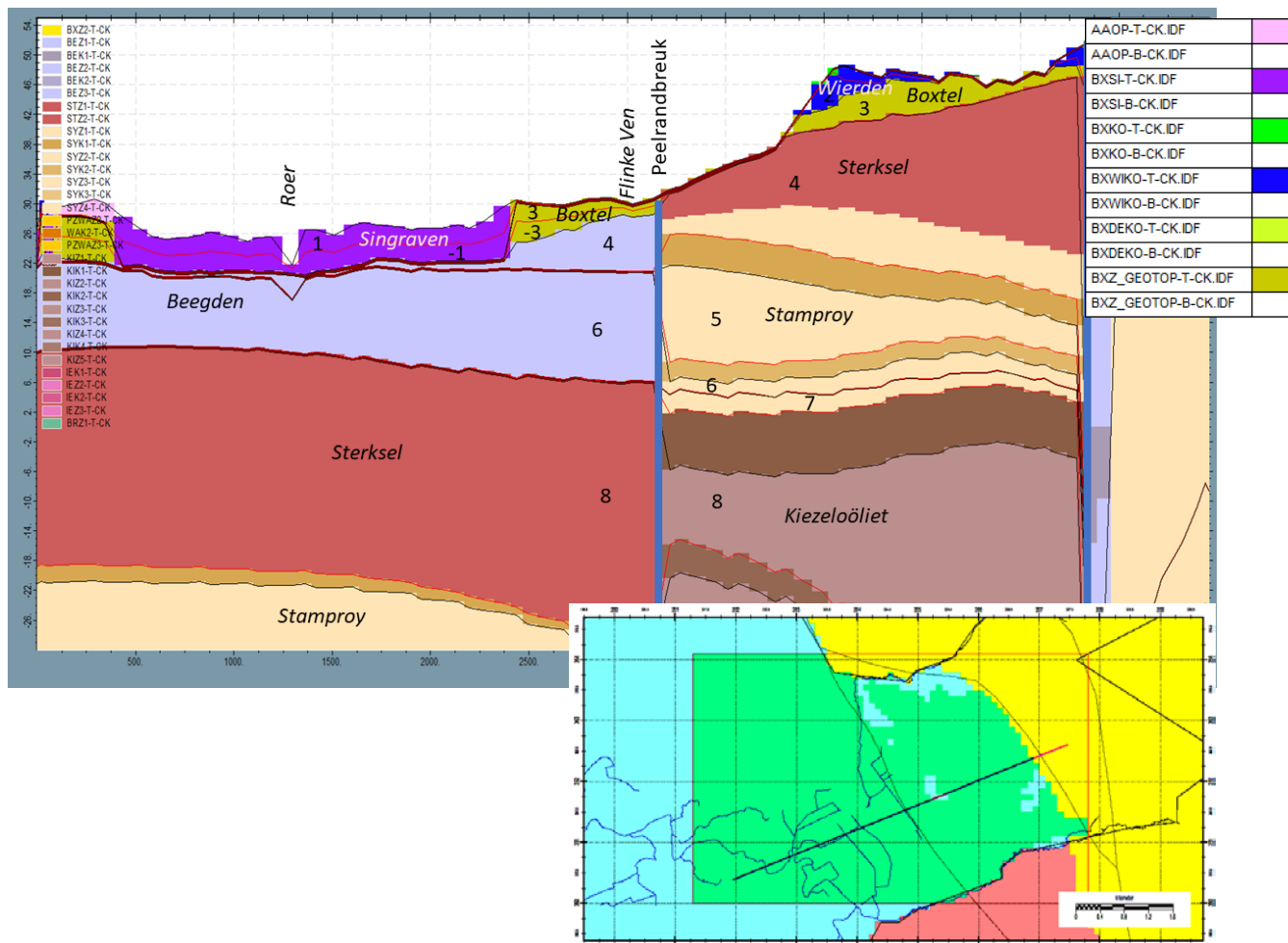
- De antropogene toplaag is opgenomen in modellaag 1;
- Bortel-Singraven is als modellaag 1 (transmissiviteit) en scheidende laag 1 (weerstand) opgenomen;
- Bortel-Delwijnen en Bortel-Wierden zijn in modellaag 2 en scheidende laag 2 opgenomen.
- Bortel-ongedefineerd is in modellaag 3 en scheidende laag 3 opgenomen.

Deze verfijningsslag van de bovenste lagen in het grondwatermodel was nodig om de effecten van ingrepen in de drainage en de effecten van subirrigatie met het vereiste detail te kunnen modelleren. Hiervoor was het namelijk van belang om -ten opzichte van IBRAHYM v2.1N en het eerder door Arcadis opgezette grondwatermodel- meerdere modellagen te onderscheiden in de deklaag boven het eerste watervoerende pakket.

Voor de oudere afzettingen is voor de Roerdalslenk een andere laagindeling toegepast dan voor het gebied ten noordoosten van de Peelrandbreuk.

In de Roerdalslenk vormen modellaag 4 t/m 8 het eerste watervoerende pakket, bestaande uit de Formaties van Beegden en Sterksel. Modellen 8 t/m 13 bestaan uit de Formaties van Stramproy en Peize-Waarle. Ten noorden van de Peelrandbreuk komt de Formatie van Beegden niet voor. Het eerste watervoerende pakket is in modellaag 4 opgenomen en wordt gevormd door de Sterksel-zanden. Modellen 5 t/m 7 bevatten de Stramproy en Peize-Waalre afzettingen.

Door in de Roerdalslenk een andere vertaling naar modellagen aan te nemen dan ten noordoosten van de Peelrandbreuk wordt de aansluiting tussen de modellen aan beide zijde van de breuk beter gemodelleerd. Figuur 4-10 geeft de toekenning van de modellen weer in de vorm van een dwarsprofiel. Een tabel met de vertaling naar modellen is opgenomen in bijlage 1, tabel 4.



Figuur 4-10: Dwarsdoorsnede met formatie namen en met de nummers aangegeven de vertaling naar de modellagen. Ligging van het dwarsprofiel in de inzet rechtsonder

4.2.5 Schematisatie van de breuken

Er is voor gekozen om de breuken niet met de horizontal flow barrier (HFB) package van Modflow te schematiseren, maar de breuken te modelleren als zones met een verminderde horizontale doorlatendheid van de watervoerende pakketten en scheidende lagen.

Als de breuken worden gemodelleerd met de HFB package van Modflow, past het rekenhart de horizontale doorlatendheden ter plaatse van de breuken automatisch aan. Deze aanpassingen zijn door de gebruiker niet te beïnvloeden. Door de breuken niet te modelleren met de HFB package, maar door de horizontale doorlatendheid ter plaatse van de breuken handmatig aan te passen, ontstaat meer controle over de horizontale doorlatendheid van de breukzones. Aangezien de doorlatendheid van de breukzones sterk bepalend is voor het kalibratieresultaat, is ervoor gekozen om de breuken te modelleren als zones met een (handmatig aan te passen) verlaagde horizontale doorlatendheid. Bij de toekenning van de horizontale doorlatendheden ter plaatse van de breukzones is per modellaag ingeschat of er op die diepte versmering van kleilagen is te verwachten.

4.3 Onttrekkingen

4.3.1 Drink- en industriewaterwinningen

De drink- en industriewaterwinningen zijn als volgt opgenomen in het grondwatermodel Turfkoelen-Flinke Ven.

In het stationaire model:

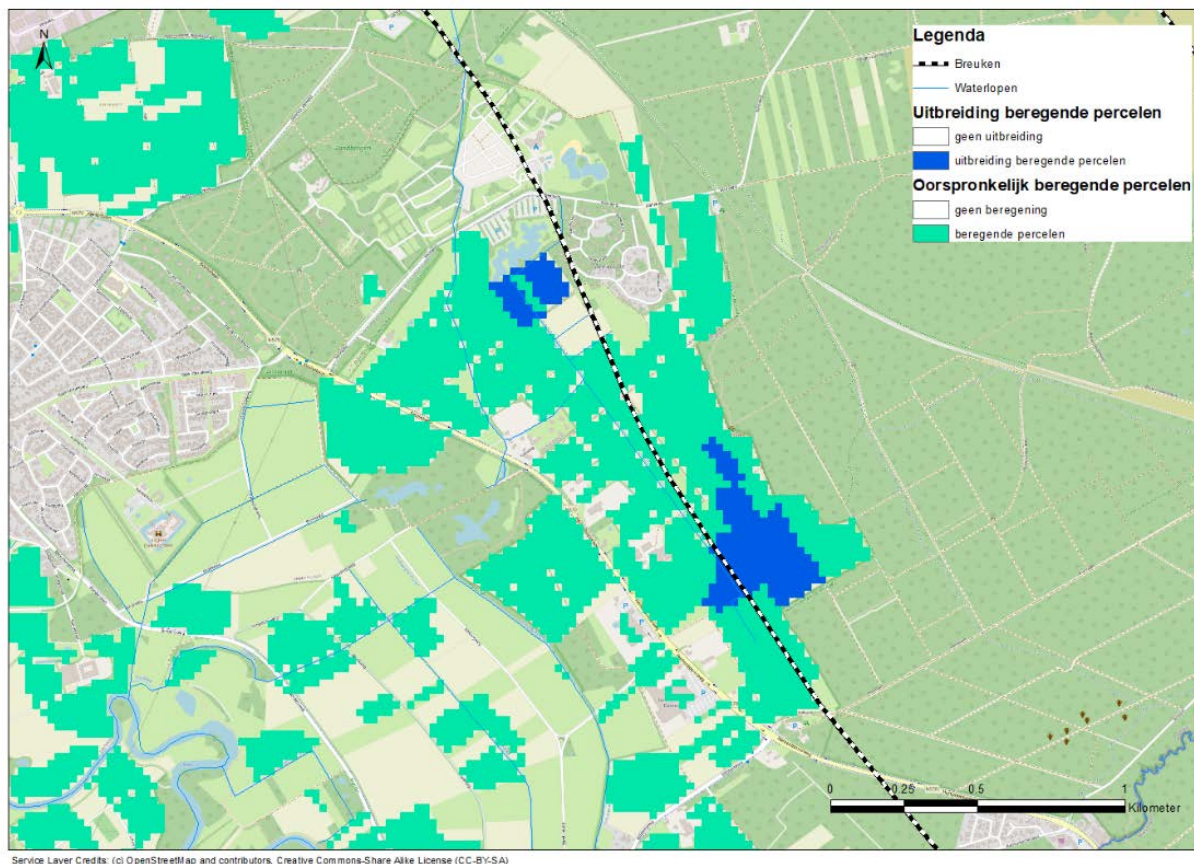
- Drinkwateronttrekkingen WML: gemiddelde onttrekkingshoeveelheden over de periode 2010 t/m 2019;
- Industriële winningen: gemiddelde onttrekkingshoeveelheden over de periode 2010 t/m 2019;
- Glastuinbouw: constant onttrekkingsdebiet, over te nemen uit IBRAHYM 2.1N.

In het tijdsafhankelijke model:

- Drinkwateronttrekkingen WML: onttrekkingshoeveelheden over de periode 2010 t/m 2019, vanuit de DBASE Roerdalslenk;
- Industriële winningen: onttrekkingshoeveelheden over de periode 2010 t/m 2019, vanuit de DBASE Roerdalslenk;
- Glastuinbouw: constant onttrekkingsdebiet, over te nemen uit IBRAHYM 2.1N.

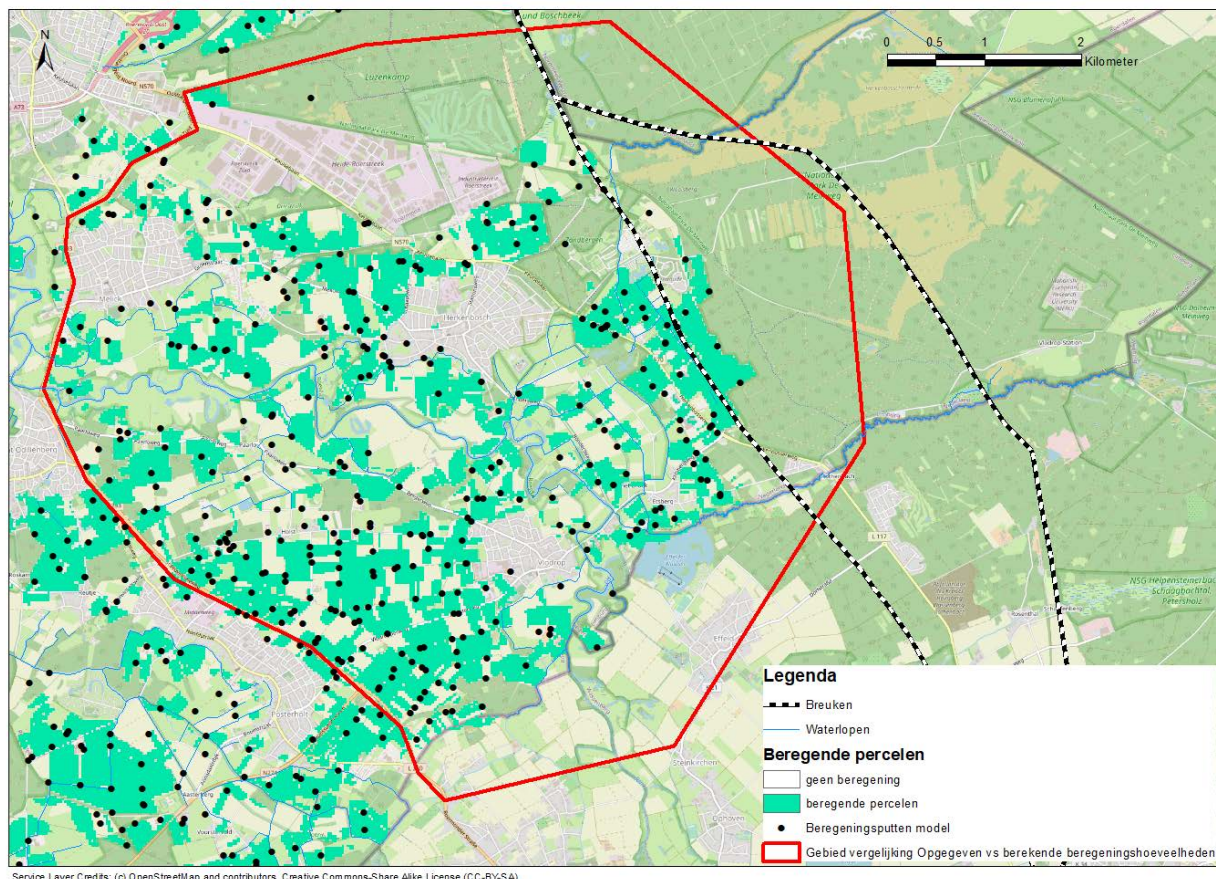
4.3.2 Beregeningsonttrekkingen

Voor wat betreft de beregeningsonttrekkingen is in eerste instantie uitgegaan van de beregeningslocaties die zijn opgenomen in IBRAHYM 2.1N, waarin ook de eerder door Sweco (2018) toegevoegde beregeningsputten zijn opgenomen. Op basis van gebiedskennis van Waterschap Limburg en de Provincie Limburg is vervolgens een controle uitgevoerd en is een aantal percelen met beregening toegevoegd. Figuur 4-11 geeft voor het grondwatermodel Turfkoelen-Flinke Ven de beregende percelen weer.



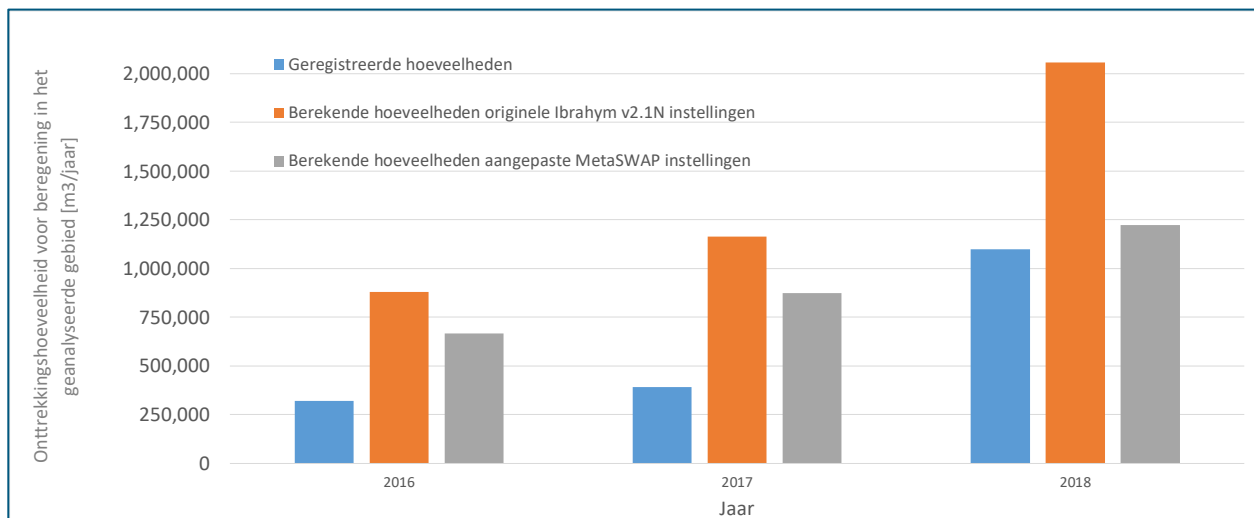
Figuur 4-11: Overzicht beregeningslocaties in het model. In blauw de uitbreiding van percelen ten opzichte van Ibrahim v2.1N.

In het grondwatermodel worden de beregeningshoeveelheden tijdsafhankelijk berekend door MetaSWAP. Voorafgaand aan de kalibratie zijn voor een gebied met ruime begrenzing rondom de Turfkoelen en Flinke Ven de met het model berekende onttrekkingshoeveelheden voor de jaren 2016 t/m 2018 vergeleken met de geregistreerde hoeveelheden. Figuur 4-12 geeft het geanalyseerde gebied weer, de beregende percelen (turquoise) en de beregeningsputten (stippen).



Figuur 4-12: Geanalyseerd gebied inclusief beregende percelen en beregeningsputten

Figuur 4-13 geeft voor de jaren 2016 t/m 2018 de geregistreerde en berekende onttrekkingshoeveelheden weer (binnen het geanalyseerde gebied). Met de standaard invoer van MetaSWAP uit IBRAHYM v2.1N zijn de geregistreerde hoeveelheden aanzienlijk lager dan de berekende hoeveelheden. Om de berekende hoeveelheden beter in overeenstemming te brengen met de landbouwkundige praktijk is de aangenomen terugkeerfrequentie in MetaSWAP aangepast. In plaats van 10 dagen voor gras en 7 dagen voor de overige landbouwgewassen is de terugkeerfrequentie aangepast naar 14 dagen voor zowel gras als voor de overige landbouwgewassen. Dit resulteert in minder hoog berekende onttrekkingshoeveelheden, die beter overeenkomen met de registraties, zie figuur 4-13. Desondanks liggen de berekende onttrekkingshoeveelheden voor de jaren 2016 en 2017 nog substantieel hoger dan de geregistreerde onttrekkingshoeveelheden.



Figuur 4-13: Berekende en geregistreerde onttrekkingshoeveelheden voor beregening in het geanalyseerde gebied (zie Figuur 4-12)

4.4 Meteo-invoer en Maaspeilen

Voor wat betreft de meteo-invoer en de Maaspeilen zijn in het grondwatermodel Turfkoelen-Flinke Ven de volgende uitgangspunten gekozen.

In het stationaire model:

- Gemiddelde grondwateraanvulling 2010 t/m 2018 berekend met MetaSWAP, afkomstig uit het IBRAHYM Roerdalslenkmodel;
- Voor de Maaspeilen is uitgegaan van de mediaanwaarde berekend over de periode 2010 t/m 2019.

In het tijdsafhankelijke model:

- De grondwateraanvulling is tijdsafhankelijk berekend met MetaSWAP, voor de meteoreeks 2007 t/m 2019. Neerslag en verdamping zijn gebaseerd op KNMI grids.
- De Maaspeilen zijn berekend voor de periode 2007 t/m 2019, op basis van betrekkinglijnen en de gemeten afvoer bij St Pieter. Op basis hiervan is een ISG gemaakt met dagwaarden van de Maaspeilen over genoemde periode 2007 t/m 2019.

4.5 Schematisatie van het oppervlaktewater

4.5.1 Algemeen

In de schematisatie van het oppervlaktewater is in het grondwatermodel Turfkoelen-Flinke Ven onderscheid gemaakt naar:

- Primaire en secundaire watergangen (paragraaf 4.5.2);
- Tertiaire watergangen en drains (paragraaf 4.5.3).

4.5.2 Primaire en secundaire watergangen

De peilen van de primaire watergangen zijn overgenomen uit het IBRAHYM-model dat is gemaakt voor de Limburgse Integrale Watersysteemanalyse (LIWA) (Waterschap Limburg en Provincie Limburg, 2020). Voor het LIWA-model heeft een update plaatsgevonden van de schematisatie van de primaire en secundaire watergangen op basis van alle -begin 2019- beschikbare oppervlaktewatermodellen van Waterschap Limburg. Uit deze oppervlaktewatermodellen zijn per primaire watergang de gemiddelde

waterstand voor het winterhalfjaar en voor het zomerhalfjaar afgeleid en overgenomen in het grondwatermodel.

Stationair wordt gerekend met het gemiddelde van deze twee waterstanden (het gemiddelde van de waterstand in het winterhalfjaar en de waterstand in het zomerhalfjaar). Tijdsafhankelijk wordt in de periode van 1 april tot 1 oktober gerekend met de waterstand uit het zomerhalfjaar en van 1 oktober tot 1 april met de waterstand uit het winterhalfjaar.

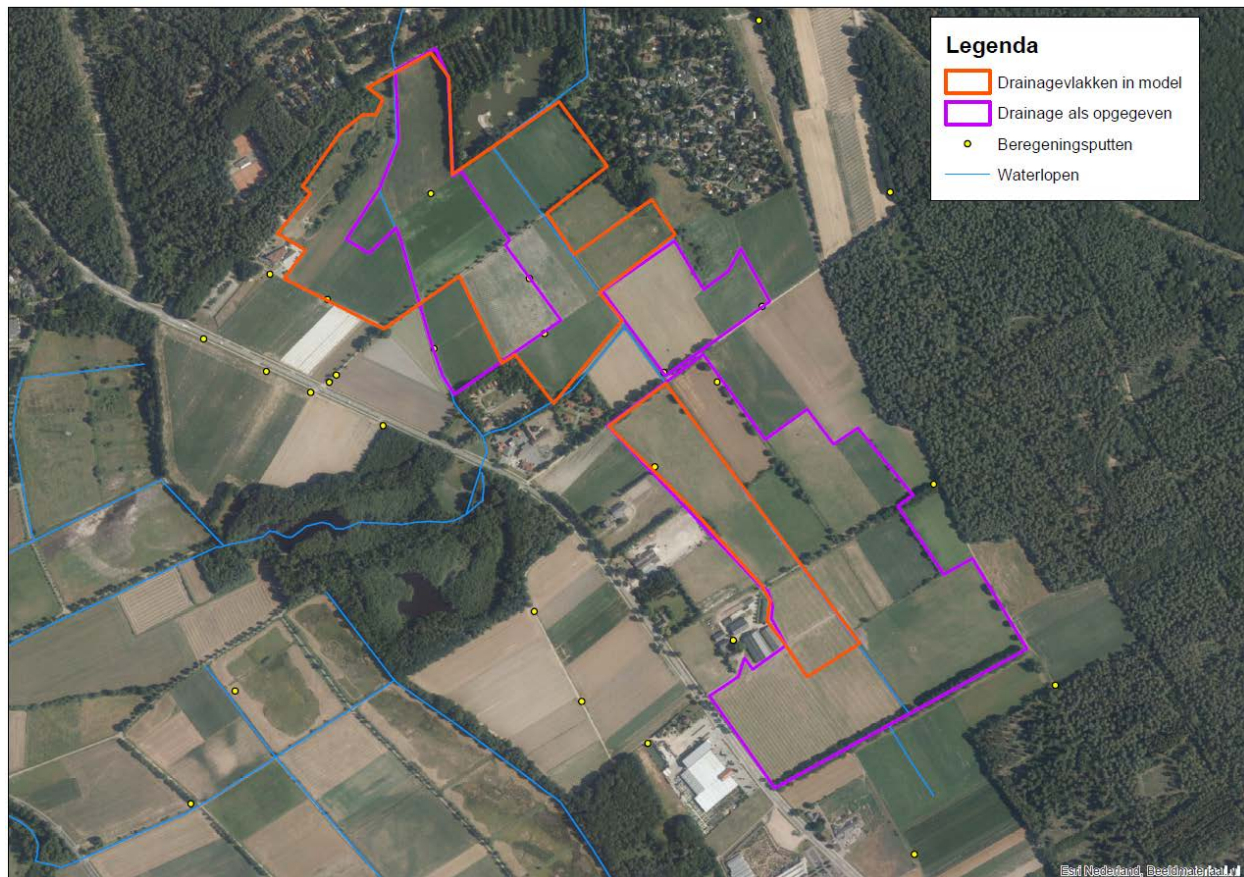
Ten behoeve van het grondwatermodel Turfkoelen-Flinke Ven zijn de volgende aanvullende controles uitgevoerd:

- De peilen van de Roer zijn op twee locaties vergeleken met metingen en op vier locaties op basis van expert judgement;
 - De ligging en peilen van de watergangen in het Flinke Ven en het Herkenbosscherbroek zijn beoordeeld op basis van gebiedskennis van het Waterschap Limburg en de Provincie Limburg.
 - De stuwstanden in het Flinke Ven zijn gecontroleerd aan de legger van Waterschap Limburg.
- Deze controles hebben niet geleid tot aanpassing van de oorspronkelijke data.

4.5.3 Tertiaire watergangen en drains

De tertiaire watergangen (greppels) zijn overgenomen uit IBRAHYM v2.1N. De greppels worden gemodelleerd met een jaarrond vast peil .

Voor de buisdrainage is in eerste instantie uitgegaan van het IBRAHYM-model dat is opgezet voor LIWA. De buisdrainage is gecontroleerd op basis van gebiedskennis van Waterschap Limburg en de Provincie Limburg. Op basis van deze controle heeft een aantal aanpassingen plaatsgevonden aan de locaties van de gedraineerde percelen, zie Figuur 4-14.



Figuur 4-14: Gedraineerde percelen in het model. In oranje de gedraineerde percelen zoals opgenomen in het IBRAHYM model voor LIWA. In paars de gedraineerde percelen gebaseerd op gebiedskennis en opgenomen in grondwatermodel Turfkoelen-Flinke Ven

4.5.4 Onverzadigde zone module (MetaSWAP)

De onverzadigde zone is gemodelleerd met MetaSWAP. MetaSWAP berekent per tijdstap onder meer de volgende variabelen:

- Grondwateraanvulling uit neerslag;
- Werkelijke verdamping;
- Freatische bergingscoëfficiënt;
- Onttrekkingshoeveelheid berekening
- Beregeningsgift.

Voor MetaSWAP is uitgegaan van de volgende specifieke basisdata:

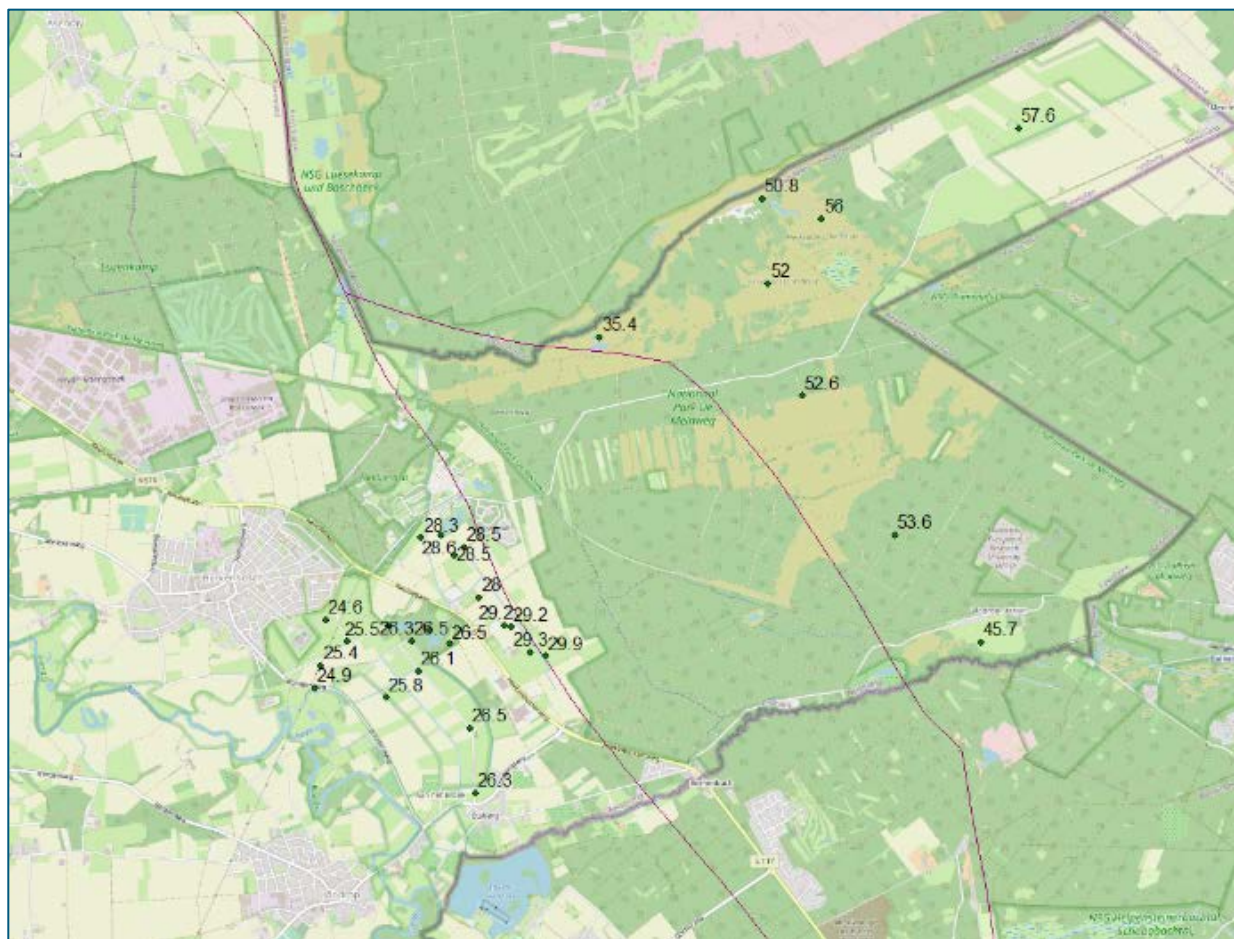
- Voor de maaiveldhoogte is gebruik gemaakt van het maaiveldbestand, dat is geactualiseerd in het kader van LIWA.
- Het landgebruik is gebaseerd op het LGN7-bestand met aanvullingen en actualisaties die zijn doorgevoerd in het kader van LIWA.
- De bodemfysische invoer is overgenomen uit IBRAHYM v2, zijnde de BOFEK 2012.
- Voor het verhard oppervlak is uitgegaan van kaarten, die zijn geactualiseerd in het kader van LIWA.

5 Kalibratie van het grondwatermodel

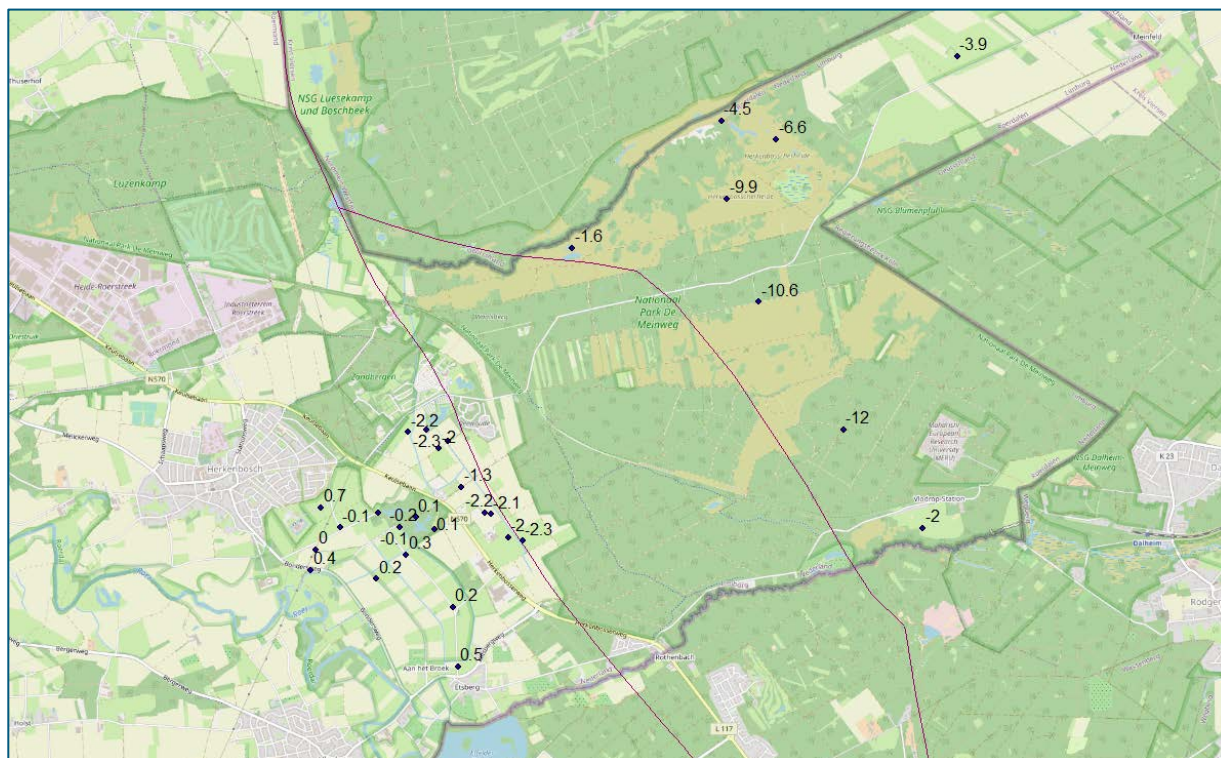
5.1 Aanpak kalibratie

De stijghoogten in het eerste watervoerende pakket lopen op van ongeveer 25 m +NAP nabij de Roer (en de Turfkoelen) naar ongeveer 27 m +NAP ter plaatse van het Flinke Ven. De freatische grondwaterstanden liggen in het Flinke Ven lokaal ongeveer 1,5 m hoger dan de stijghoogten in het eerste watervoerende pakket. Verder naar het oosten lopen de gemeten stijghoogten op tot 30 à 35 m +NAP in de zone tussen de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring en tot ruim boven de 50 m + NAP in het gebied ten oosten van de Meinwegstoring (het Wolfsplateau).

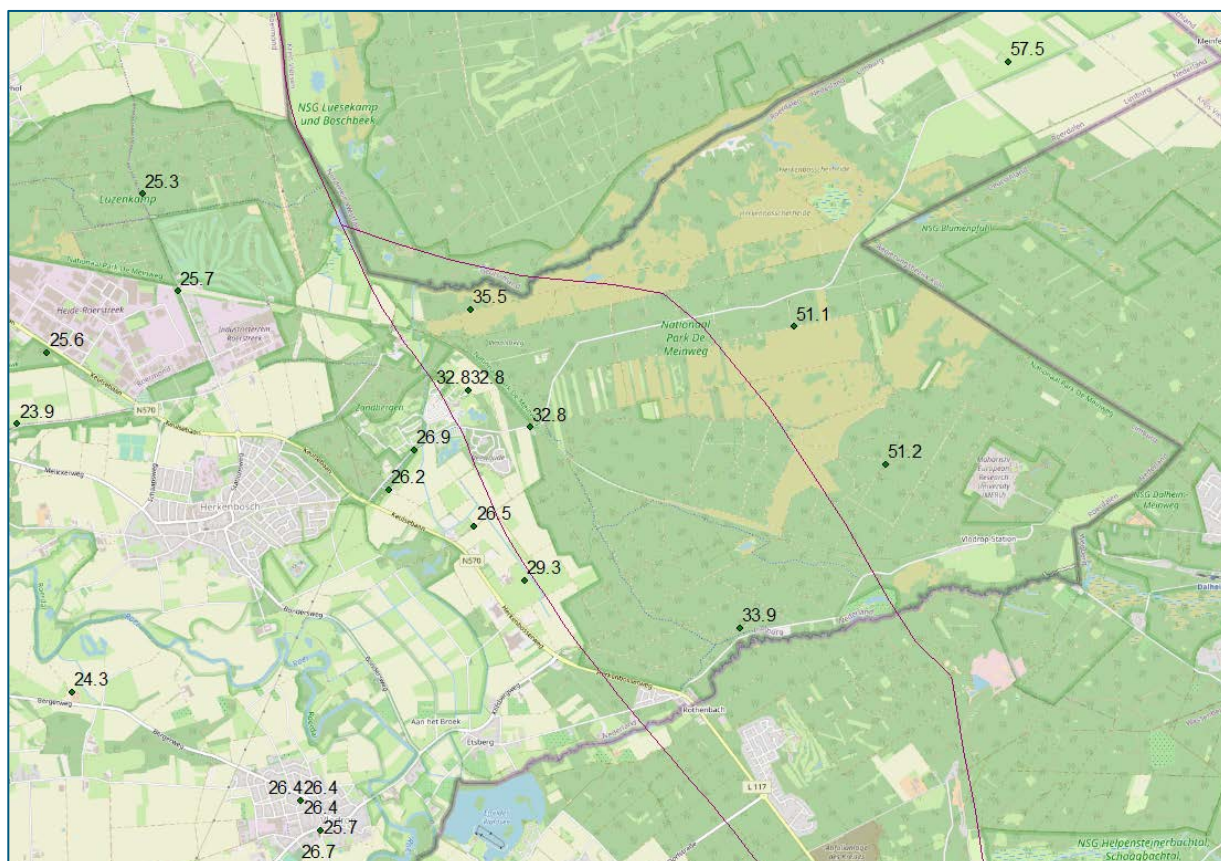
Figuren 5-1a t/m 5-1d geven voor het initiële model de gemeten (freatische) grondwaterstanden en stijghoogten in het modelgebied weer, alsmede de afwijkingen van de berekeningen ten opzichte van de metingen.



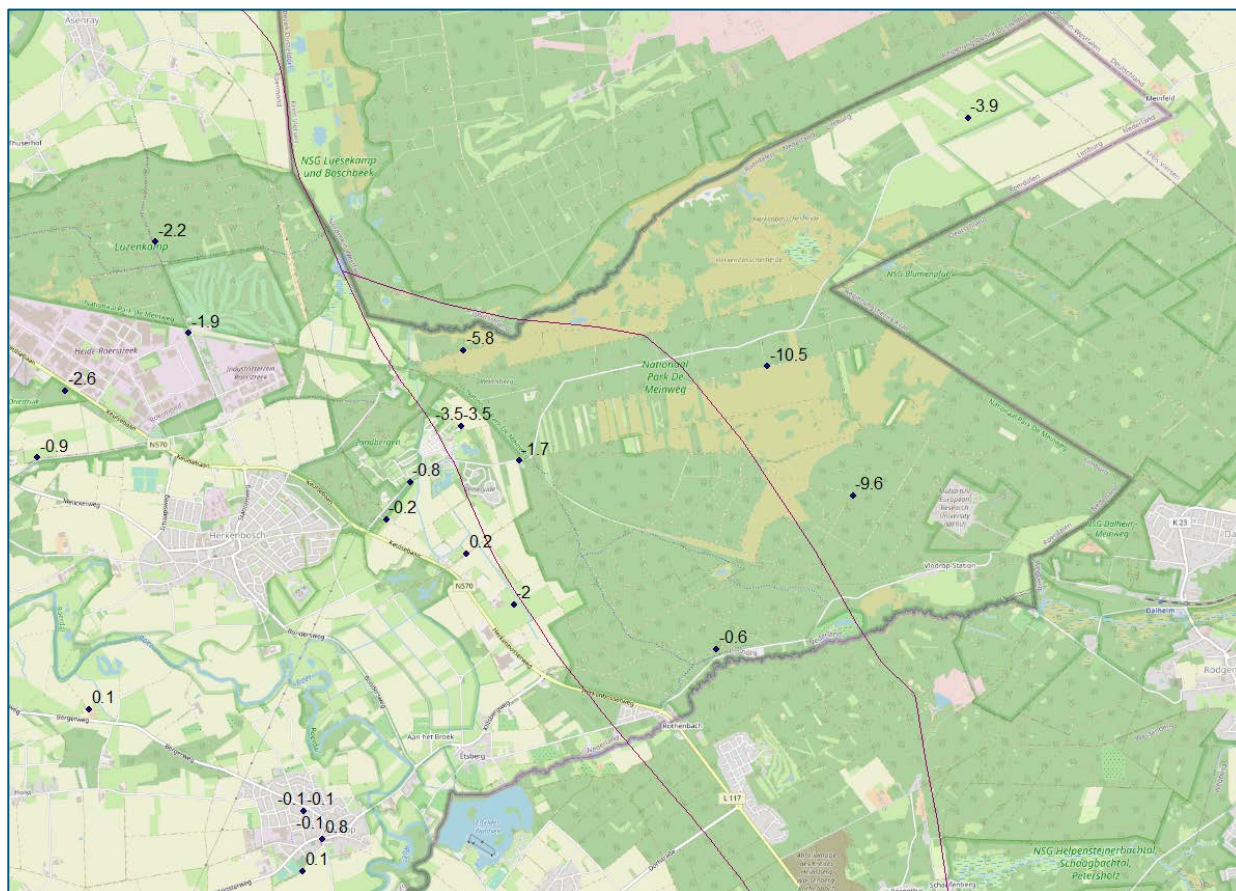
Figuur 5-1a: Gemeten (freatische) grondwaterstanden in modelgebied



Figuur 5-1b: Afwijkingen berekende grondwaterstanden initiële model ten opzichte van gemeten grondwaterstanden



Figuur 5-1c: Gemeten stijghoogten eerste watervoerend pakket in modelgebied



Figuur 5-1d: Afwijkingen berekende stijghoogten eerste watervoerend pakket initiële model ten opzichte van gemeten stijghoogten eerste watervoerend pakket

Het initiële model gaf de grootste afwijkingen ten opzichte van de metingen op het Wolfsplateau. Hier lagen de berekende stijghoogten veelal meer dan 10 m lager dan de gemeten waarden. De afwijkingen in de overige gebieden, met name de Roerdalslenk, waren in het initiële model minder. Om deze reden is de kalibratie van het grondwatermodel begonnen met de optimalisatie van het berekende stijghoogteverloop op het Wolfsplateau. Vervolgens is in stappen in stroomafwaartse richting verder geoptimaliseerd. In de stationaire kalibratie zijn dus de volgende stappen uitgevoerd:

1. Kalibratie stijghoogten op het gebied ten oosten van de Peelrandbreuk (met name het gebied ten oosten van de Meinwegstoring, het Wolfsplateau). Optimalisatie transmissiteit Peelhorst en doorlatendheid Peelrandbreuk en Meinwegstoring.
2. Kalibratie van de doorlatendheid van de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring, op basis van gemeten stijghoogten aan weerszijden van beide breuken.
3. Kalibratie van de Roerdalslenk. Optimalisatie van de doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket (Formatie van Beegden), de doorlatendheden en weerstanden van de Bostel-formatie en de conductance (in- of uitreeweerstand) van de watergangen in de Roerdalslenk.
4. Verdere fijnregeling van het kalibratieresultaat rondom het Flink Ven en de Turfkoelen.

Aansluitend op deze stapsgewijze stationaire kalibratie is de tijdsafhankelijke kalibratie uitgevoerd. Als laatste onderdeel van de kalibratie is een optimalisatieslag uitgevoerd met behulp van Monte Carlo Analyse. De uitkomsten van deze Monte Carlo Analyse zijn gebruikt voor de betrouwbaarheidsanalyse op de modeluitkomsten (hoofdstuk 6).

Voorafgaand aan de kalibratie is voor het initiële model een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd (zie paragraaf 5.2). De uitkomsten van deze gevoeligheidsanalyse zijn gebruikt om tijdens de kalibratiestappen te focussen op de meest relevante (gevoelige) modelparameters.

Paragraaf 5.3 gaat in op de stationaire kalibratie aan de hand van de bovenstaande 4 stappen. De resultaten van de tijdsafhankelijke kalibratie volgen in paragraaf 5.4. In paragraaf 5.5 wordt de optimalisatieslag m.b.v. Monte Carlo Analyse toegelicht.

5.2 Gevoeligheidsanalyse

Voorafgaand aan de kalibratie is met het initiële model een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de verschillende deelgebieden binnen het grondwatermodel. Doel hiervan was om tijdens de kalibratiestappen te kunnen focussen op de meest relevante (gevoelige) modelparameters.

Voor de Peelhorst (modelgebied ten noordoosten van de Peelrandbreuk) resulteerde de gevoeligheidsanalyse in de volgende inzichten:

- De stijghoogten op de modelranden zijn te laag, deze moeten omhoog.
- Doorlatendheid van de watervoerende pakketten op de Peelhorst moet omlaag. Dit geldt met name voor de transmissiviteit van modellagen 3 en dieper.
- De horizontale weerstanden van de Meinwegstoring en de Peelrandbreuk zijn cruciaal voor het reproduceren van de gemeten stijghoogtesprongen over deze breuken.

Voor de Roerdalslenk is gebleken dat de volgende parameters het meest gevoelig zijn:

- Doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket;
- Bodemweerstand van de Roer;
- Formatie van Singraven: deklaagweerstand Roerdal (Herkenboscherbroek);
- Verticale weerstand en horizontale doorlatendheid Formatie van Boxtel.

Tijdens de kalibratie zijn met name de bovengenoemde gevoelige parameters verder geoptimaliseerd.

5.3 Stationaire kalibratie

De stationaire kalibratie is uitgevoerd in de volgende 4 stappen:

1. Kalibratie stijghoogten gebied ten oosten van de Peelrandbreuk (Peelhorst), zie paragraaf 5.3.1.
2. Kalibratie van de doorlatendheid van de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring, zie paragraaf 5.3.2.
3. Kalibratie van de Roerdalslenk, zie paragraaf 5.3.3.
4. Verdere fijnregeling kalibratieresultaat rondom Flinke Ven en Turfkoelen, zie paragraaf 5.3.4.

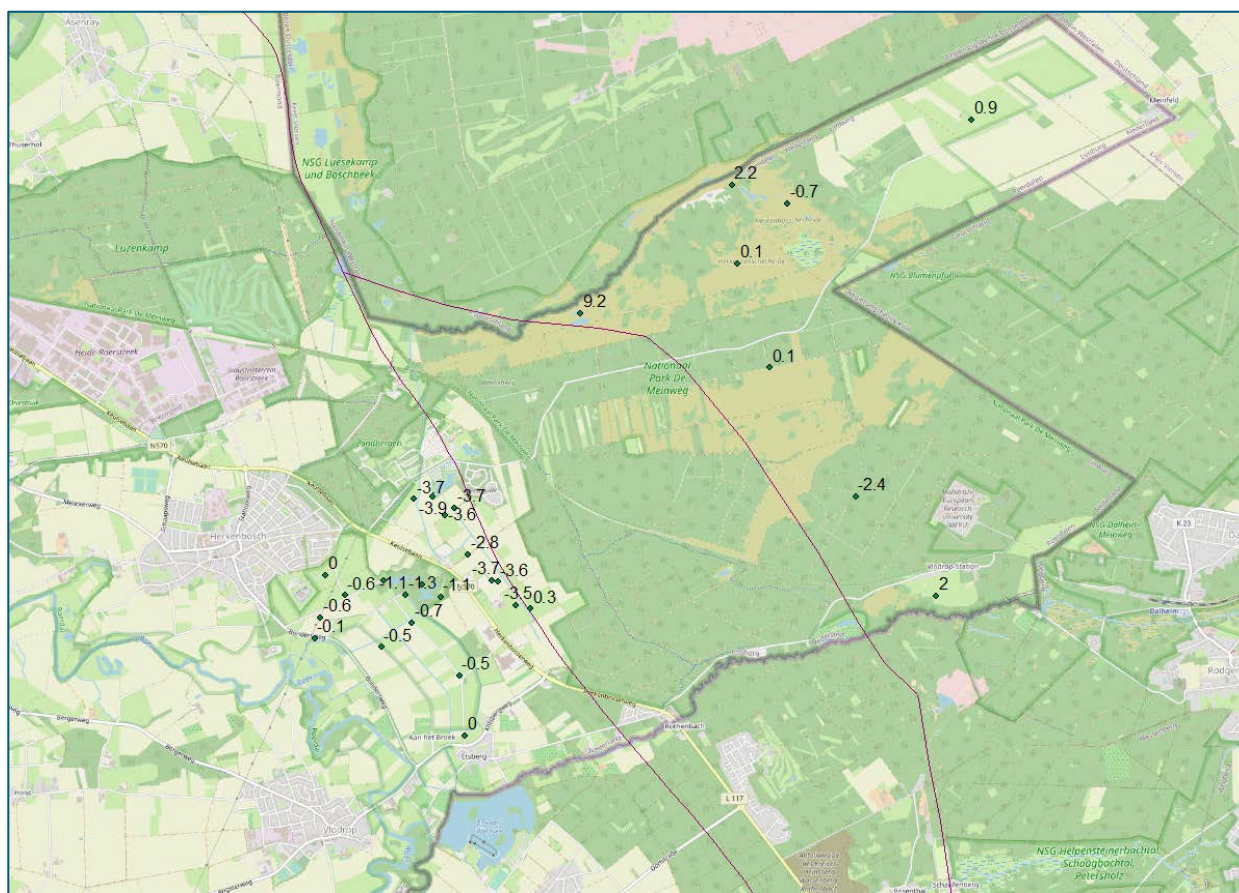
5.3.1 Kalibratiestap 1: optimalisatie stijghoogten Peelhorst

Om de stijghoogten op de Peelhorst, en met name het gebied ten oosten van de Meinwegstoring, te verhogen zijn als eerste stap de stijghoogten op de oostelijke modelrand verhoogd. In eerste instantie waren de stijghoogten op de modelranden overgenomen uit het IBRAHYM Roerdalslenk model. Deze bleken aanzienlijk lager dan de metingen. Om deze reden zijn de randstijghoogten overgenomen uit het IBRAHYM v2.1N model. Deze kwamen beter overeen met de metingen.

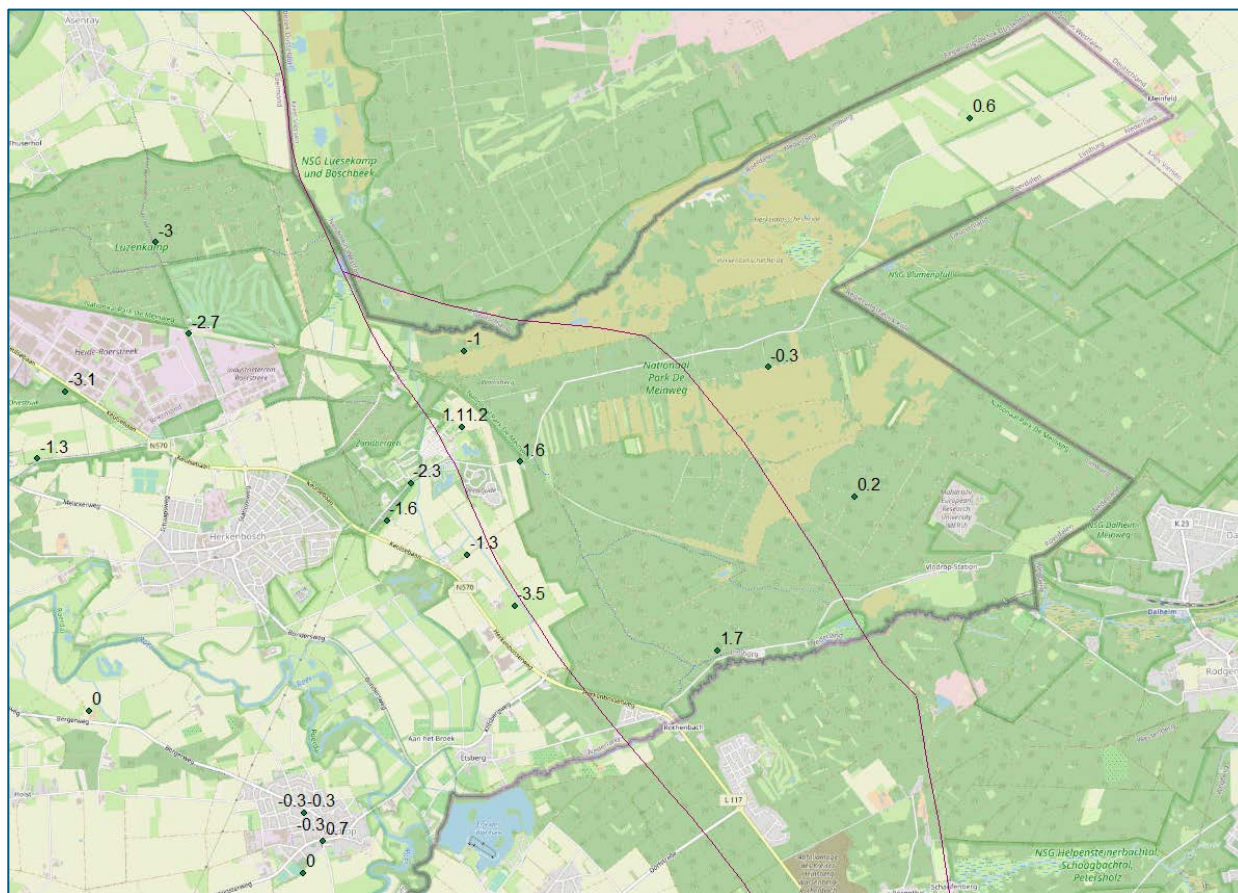
Ook na het verhogen van de stijghoogten op de modelranden werden de stijghoogten ten oosten van de Meinwegstoring (Wolfsplateau) nog veel te laag berekend (tot 10 m te laag, zie Figuren 5-1b en 5-1d). Met behulp van een automatische kalibratie met iPEST heeft verdere optimalisatie plaatsgevonden van de transmissiviteit van de modellagen op de Peelhorst en de doorlatendheid van de Peelrandbreuk en Meinwegstoring.

Deze optimalisatieslag heeft geleid tot verlaging van het doorlaatvermogen van de diepere pakketten op de Peelhorst. Op de Peelhorst bevinden de mariene afzettingen van de Formatie van Breda zich relatief dicht onder maaiveld. De doorlatendheid van deze zanden is relatief klein, echter het pakket is heel dik. In zowel IBRAHYM v2.1N als het IBRAHYM Roerdalslenk model wordt in totaal toch nog een relatief grote transmissiviteit toegekend aan de hele formatie van Breda, zonder dat met een noemenswaardige verticale weerstand wordt gerekend. Het is aannemelijk dat de Formatie van Breda in werkelijkheid veel minder bijdraagt aan de stroming van het grondwater. Om deze reden is het doorlaatvermogen van de modellagen 3 en dieper op de Peelhorst in deze kalibratiestap sterk verlaagd. De modellagen 3 en dieper bestaan op de Peelhorst over het algemeen uit de formatie van Breda. Verder zijn ten opzichte van het initiële model de horizontale doorlatendheden van zowel de Meinwegstoring als de Peelrandbreuk verlaagd.

Figuren 5-2a en 5-2b geven de resultaten van de eerste kalibratiestap weer. Ten opzichte van de initiële modelberekening (Figuur 5-1a t/m 5-1d) zijn de afwijkingen van grondwaterstanden en stijghoogten ten oosten van de Meinwegstoring aanzienlijk verkleind. De afwijkingen in het gebied tussen de breuken en in de Roerdalslenk zijn juist groter geworden. Dit geldt met name voor de zone aan weerszijden van de Peelrandbreuk.



Figuur 5-2a: Verschillen tussen berekende en gemeten grondwaterstanden na kalibratiestap 1

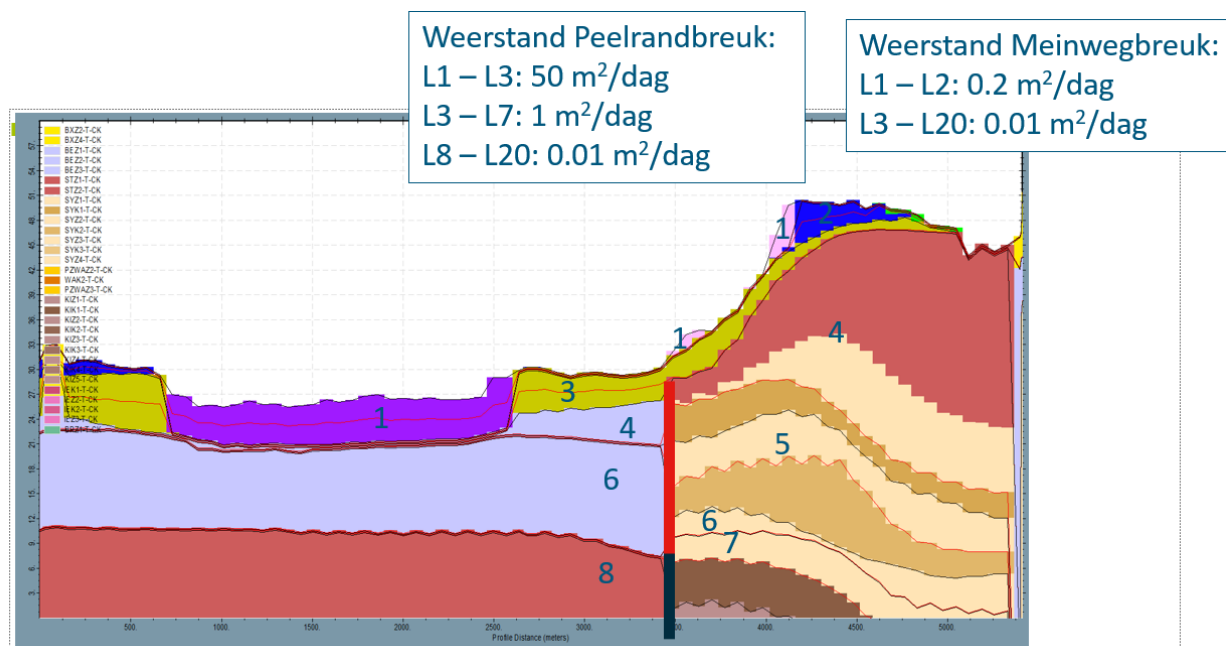


Figuur 5-2b: Verschillen tussen berekende en gemeten stijghoogten eerste watervoerend pakket na kalibratiestap 1

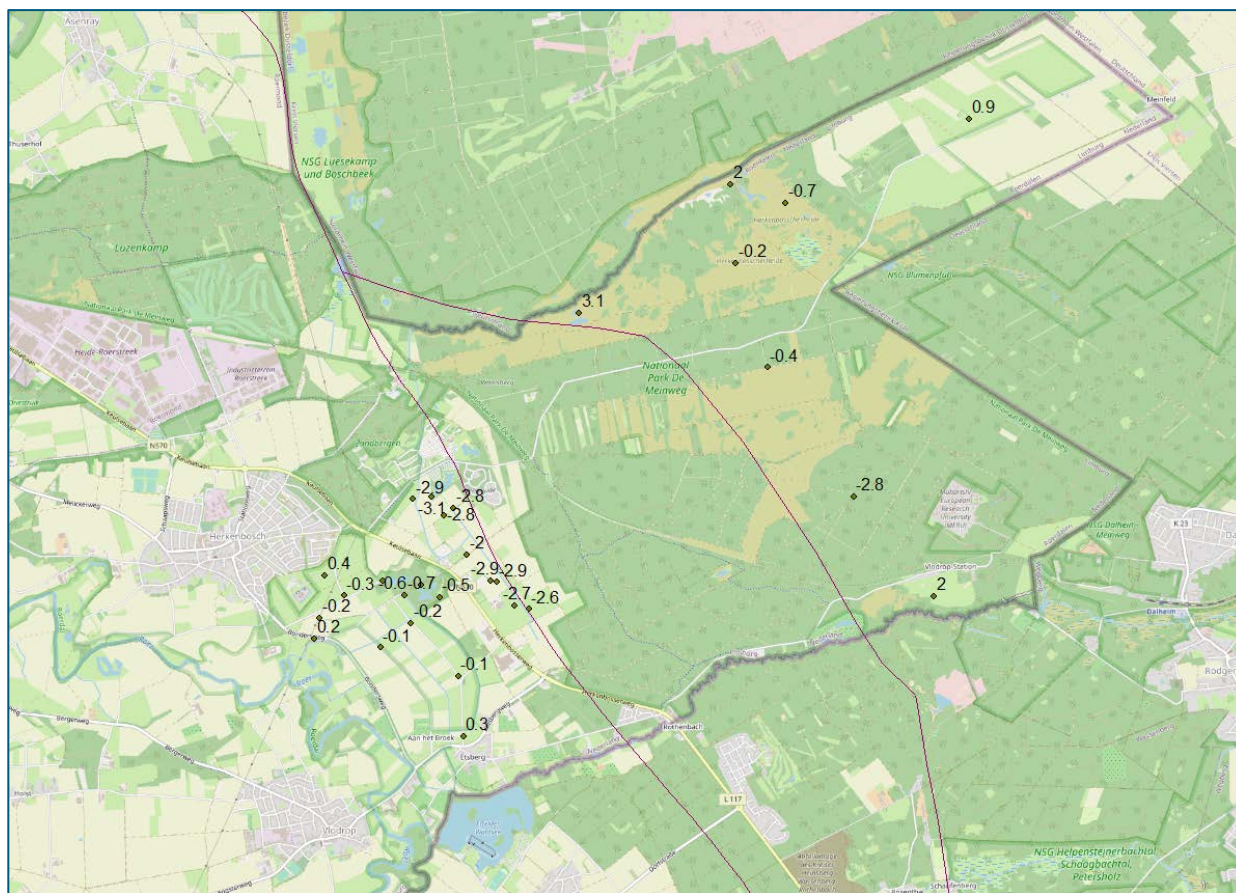
5.3.2 Kalibratiestap 2: handmatige kalibratie Peelrandbreuk en Meinwegstoring

In stap 2 heeft verdere handmatige kalibratie plaatsgevonden van de horizontale doorlatendheid van de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring. In de eerste kalibratiestap is de horizontale doorlatendheid ter plaatse van de breuken verminderd. Dit resulteerde voor de Roerdalslenk in een verslechtering van het kalibratieresultaat. Omdat de stijghoogten in het gebied tussen de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring nog iets te hoog uitkwam, is de doorlatendheid van de Peelrandbreuk weer iets verhoogd. Tevens is meer variatie aangebracht in de doorlatendheid over de diepte van de breuk.

Aangenomen is dat de Peelrandbreuk in de diepere modellagen (modellaag 8 en dieper) vrijwel ondoorlatend is, als gevolg van versmering van de Kiezeloöliet kleien (Brunssumkleien). Voor modellagen 4 t/m 7 heeft versmering plaats kunnen vinden door kleilagen binnen de Formatie van Stramproy. Voor deze modellagen is voor de Peelrandbreuk een horizontale doorlatendheid van 1 m²/dag aangenomen. Bovenin, ter hoogte van de Bostel-formatie is de Peelrandbreuk als open gemodelleerd. Figuur 5-3 geeft de horizontale doorlatendheden van de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring weer, na kalibratiestap 2.

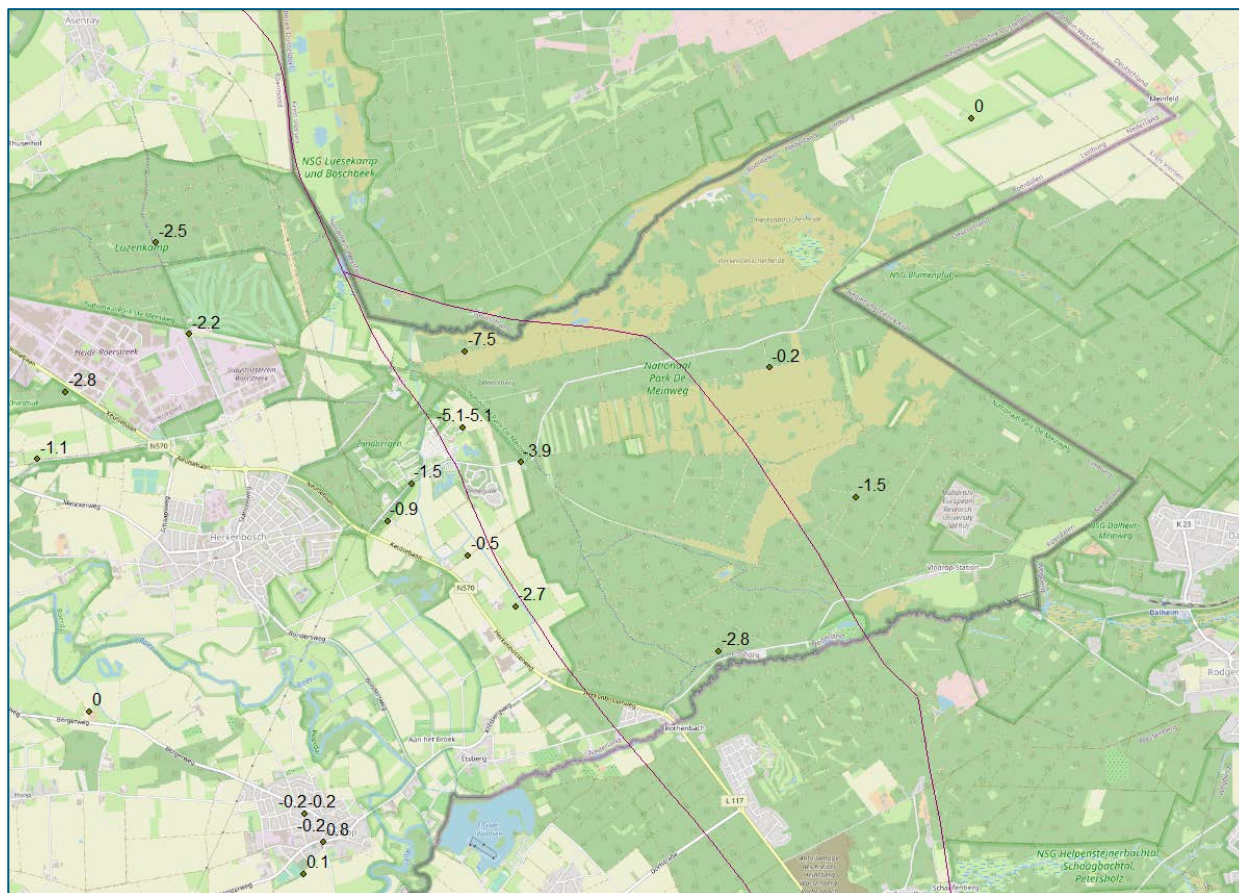


Figuur 5-3: Horizontale doorlatendheden van de Peelrandbreuk en Meinwegstoring, na kalibratiestap 2



Figuur 5-4a: Verschillen tussen berekende en gemeten grondwaterstanden na kalibratiestap 2

Figuren 5-4a en 5-4b geven de resultaten van de tweede kalibratiestap weer. Ten opzichte van de eerste kalibratiestap (Figuren 5-2a en 5-2b) zijn de afwijkingen van grondwaterstanden en stijghoogten iets kleiner geworden. Voor de Roerdalslenk en de zone tussen de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring zijn de afwijkingen nog altijd groter dan die van de initiële modelrun (Figuren 5-1a t/m 5-1d).



Figuur 5-4b: Verschillen tussen berekende en gemeten stijghoogten eerste watervoerend pakket na kalibratiestap 2

5.3.3 Kalibratiestap 3: kalibratie Roerdalslenk

In deze stap heeft verdere kalibratie plaatsgevonden van de Roerdalslenk, waarbij aanpassingen zijn doorgevoerd in de conductance van de Roer en de watergangen in het Herkenboscherbroek en de doorlatendheden van de Formatie van Beegden.

Kalibratiestap 2 resulteerde in de Roerdalslenk vooral in te laag berekende grondwaterstanden en stijghoogten (zie Figuur 5-4). Om deze reden is de doorlatendheid van de Beegden-formatie in deze stap flink verlaagd. Na vergelijking tussen de kD-waarden van de Beegden-formatie in het IBRAHYM v2.1N model met REGIS II v2.2 bleek dat de kD-waarden in het regionale IBRAHYM-model al een factor 4 lager lagen dan in REGIS. Om de stijghoogten in de Roerdalslenk te verhogen, is deze reductie van het doorlaatvermogen ten opzichte van REGIS ook doorgevoerd in het grondwatermodel Turfkoelen-Flinke Ven.

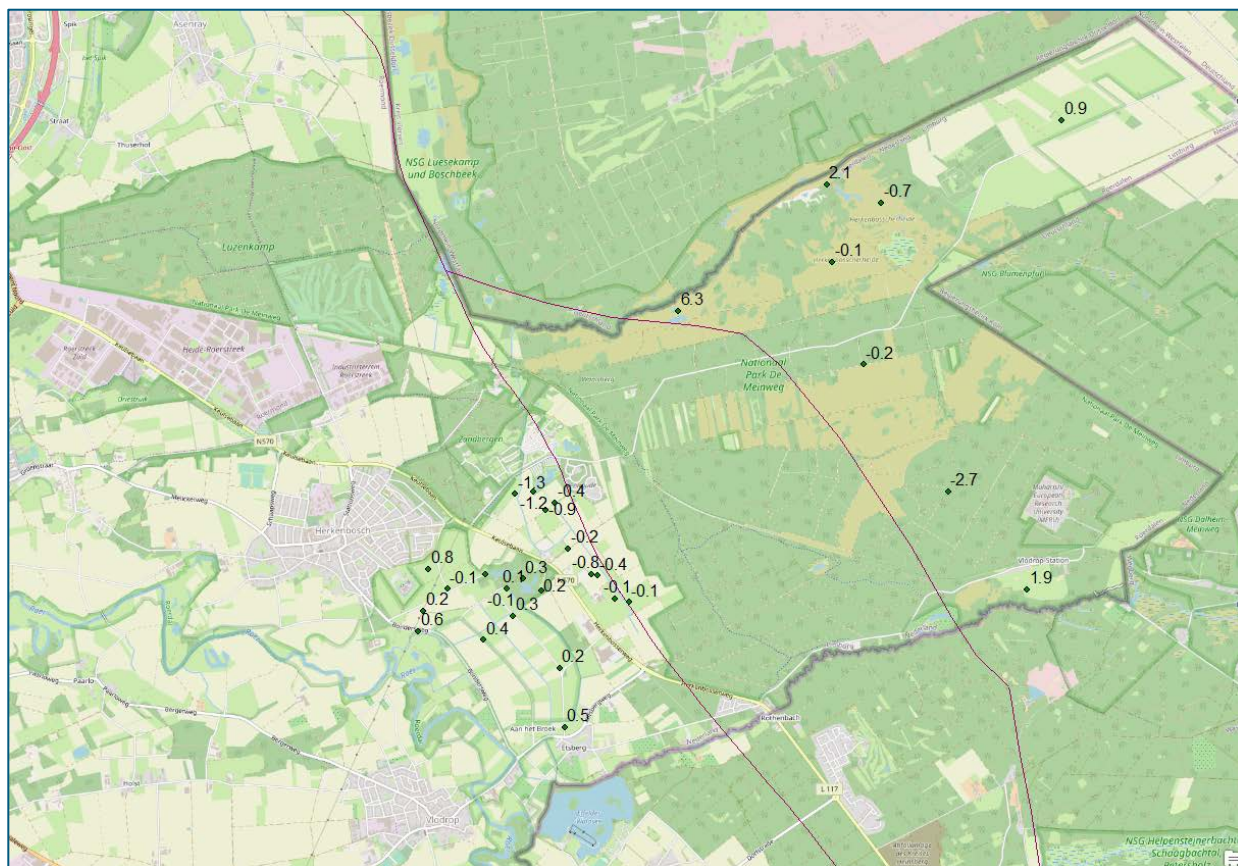
De conductance van de Roer is in het model, ten opzichte van de kalibratiewaarden van IBRAHYM v2.1N met een factor 2 verhoogd. De bodemweerstand van de Roer is daarmee met een weerstand van ongeveer 4 dagen gemodelleerd.

De plassen in de Turfkoelen waren in het initiële model slechts als een smalle watergang opgenomen. De conductance in de Turfkoelen is verlaagd overeenkomstig de daadwerkelijke breedte van de plassen in het gebied. De infiltratieweerstand voor de Turfkoelen was heel hoog (infiltratie was nagenoeg niet mogelijk). Deze is aangepast tot een meer realistische waarde.

Binnen het Herkenboscherbroek waren in het initiële model voor een aantal watergangen conductances aangenomen die horen bij een situatie waarbij de Roer meestroomt door het Herkenboscherbroek. Het water stroomt dan over het maaiveld en de watergang heeft dan een grote breedte. De conductance voor deze watergangen is verlaagd overeenkomstig de werkelijke situatie dat er (het overgrote deel van de tijd) geen sprake is van inundatie vanuit de Roer.

Figuren 5-5a en 5-5b geven de resultaten van de derde kalibratiestap weer. Ten opzichte van de tweede kalibratiestap (Figuren 5-4a en 5-4b) zijn de afwijkingen van grondwaterstanden en stijghoogten aanzienlijk kleiner geworden. Dit geldt met name voor de Roerdalslenk en het gebied tussen de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring. Hier is het ijkresultaat ook aanzienlijk beter geworden dan het initiële model (Figuren 5-1a t/m 5-1d).

Ten oosten van de Meinwegstoring zijn de afwijkingen ongeveer gelijk aan die na de kalibratiestap 2.

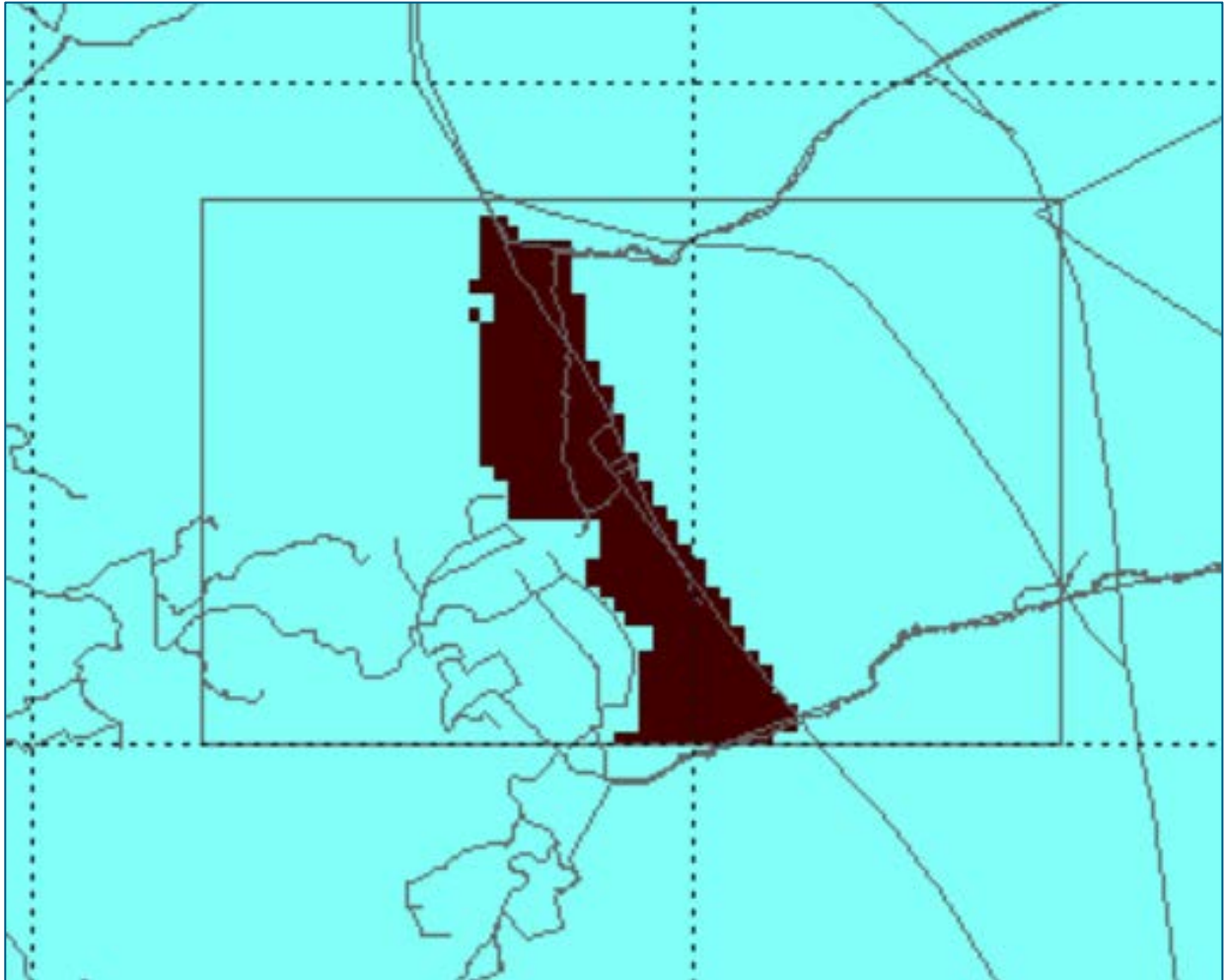


Figuur 5-5a: Verschillen tussen berekende en gemeten grondwaterstanden na kalibratiestap 3



De peilbuisgegevens laten ter plaatse van het Flinkle Ven grote verschillen zien tussen de gemeten freatische grondwaterstanden en de gemeten stijghoogten in het eerste watervoerende pakket.

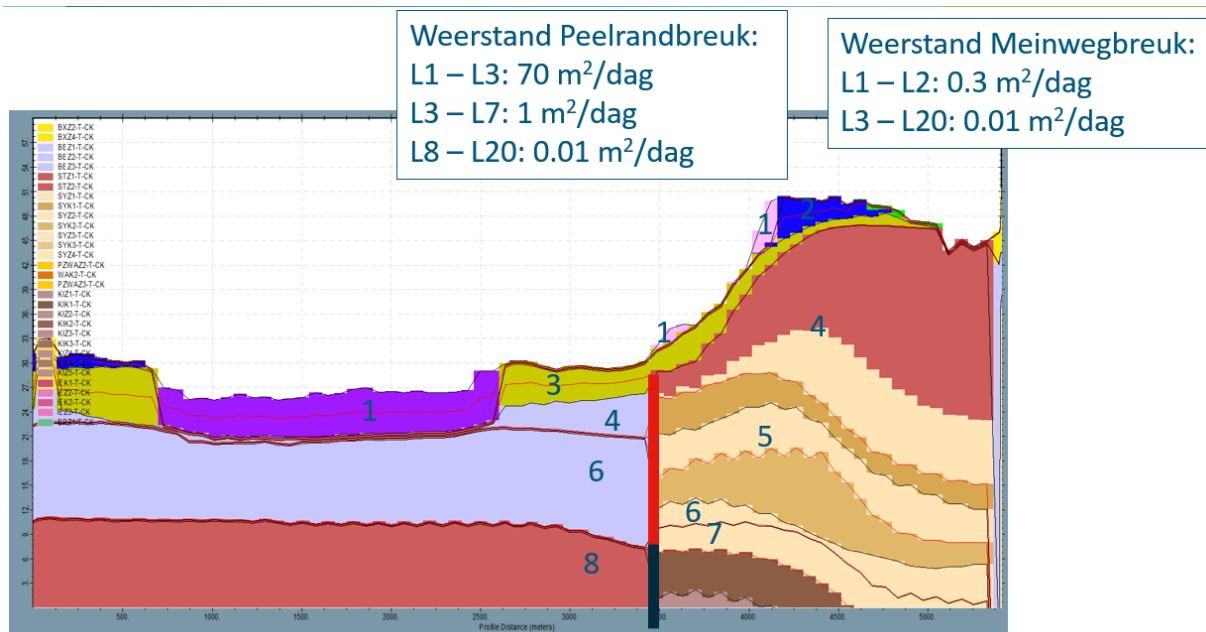
2 februari 2021



Figuur 5-6: Zone waar doorlaatvermogen Bostel-formatie verhoogd is in kalibratiestap 4

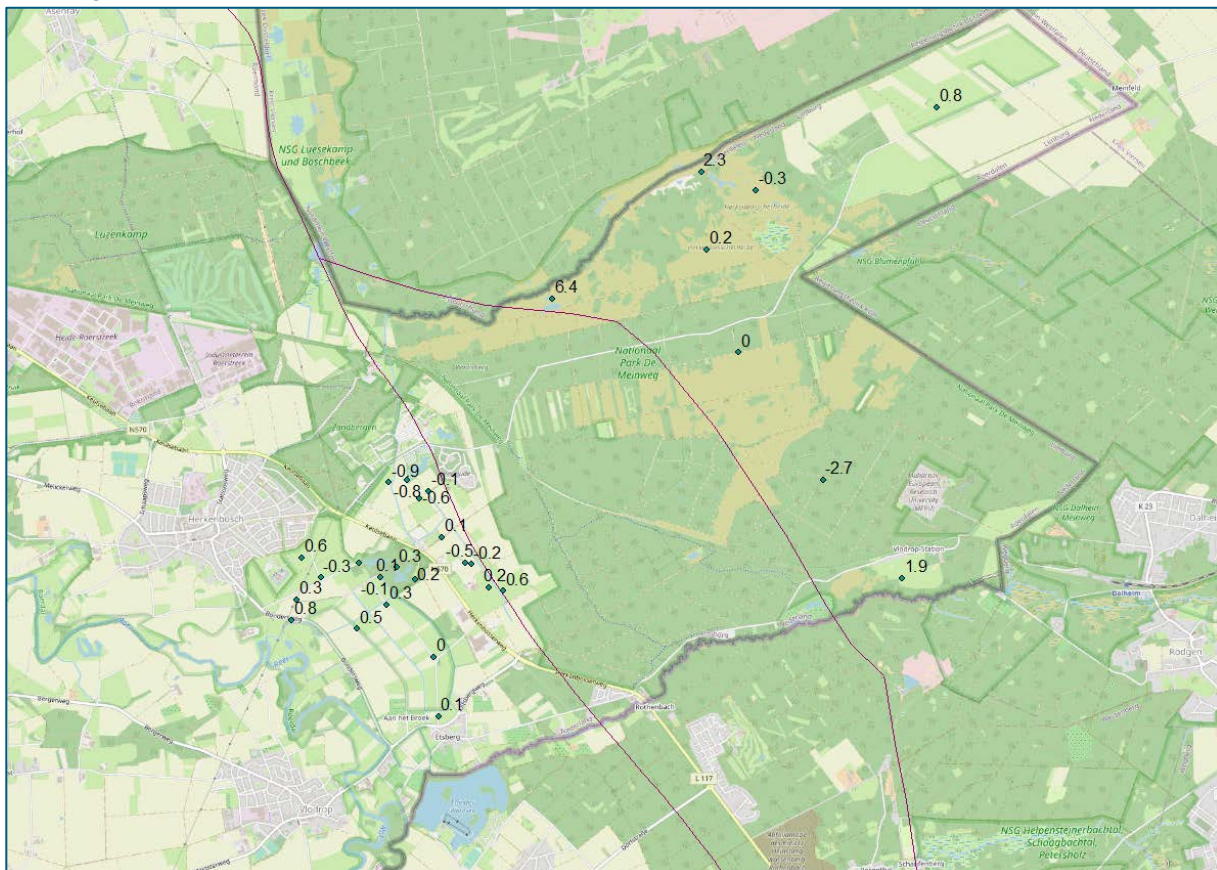
Verder is in deze kalibratiestap het doorlaatvermogen van het eerste watervoerende pakket (Formaties van Beegden en Sterksel) iets verhoogd ten opzichte van kalibratiestap 3. In stap 3 was de doorlatendheid van deze lagen met een factor 4 verkleind ten opzichte van het initiële model (gebaseerd op REGIS II v2.2). Door het doorlaatvermogen weer iets te verhogen ten opzichte van kalibratiestap 3, worden de stijghoogten in het eerste watervoerende pakket iets lager berekend dan na kalibratiestap 3.

Figuur 5-7 geeft de horizontale doorlatendheid van de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring weer, na kalibratiestap 4.

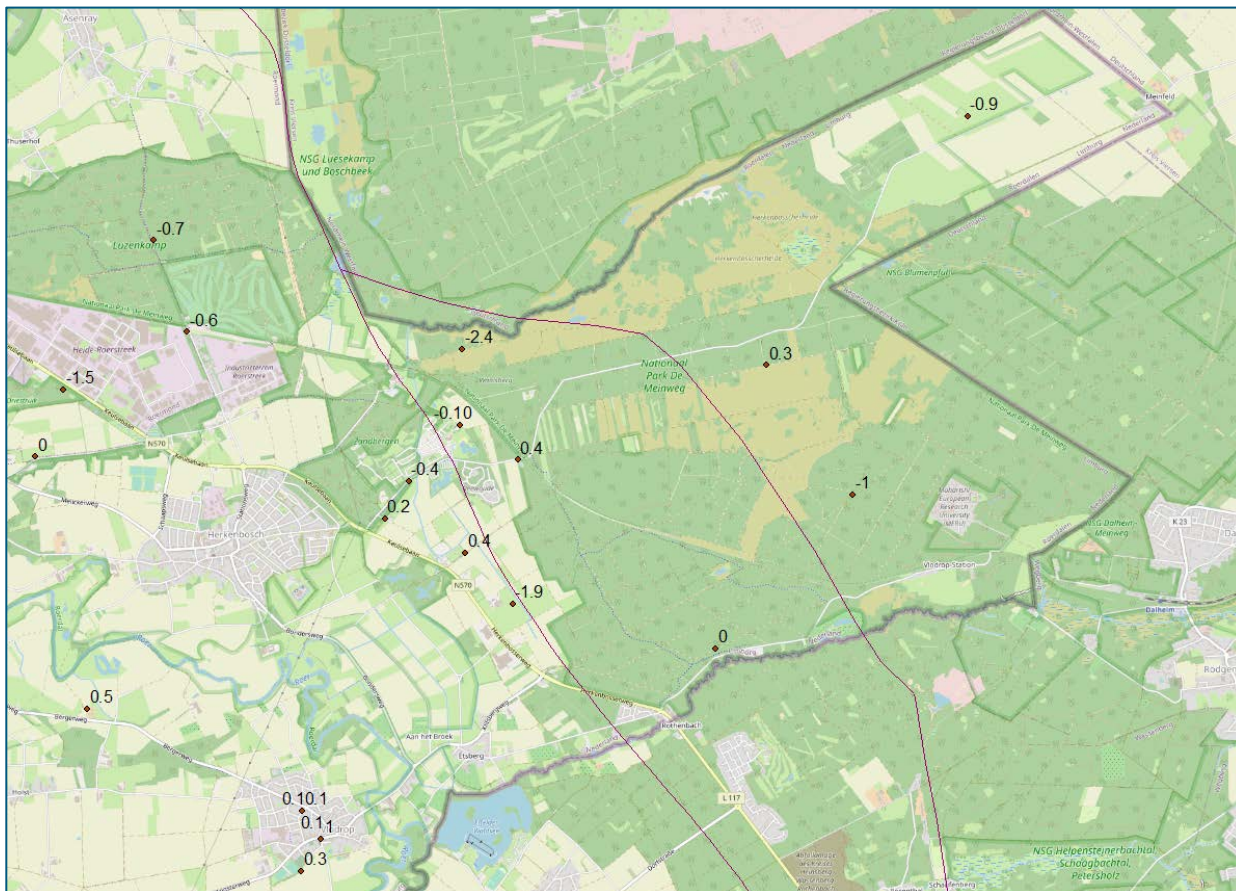


Figuur 5-7: Horizontale doorlatendheden van de Peelrandbreuk en Meinwegstoring, na kalibratiestap 4

Figures 5-8a en 5-8b geven de resultaten van de vierde kalibratiestap weer. Ten opzichte van de derde kalibratiestap (Figures 5-5a en 5-5b) zijn de afwijkingen van grondwaterstanden en stijghoogten iets kleiner geworden.



Figuur 5-8a: Verschillen tussen berekende en gemeten grondwaterstanden na kalibratiestap 4



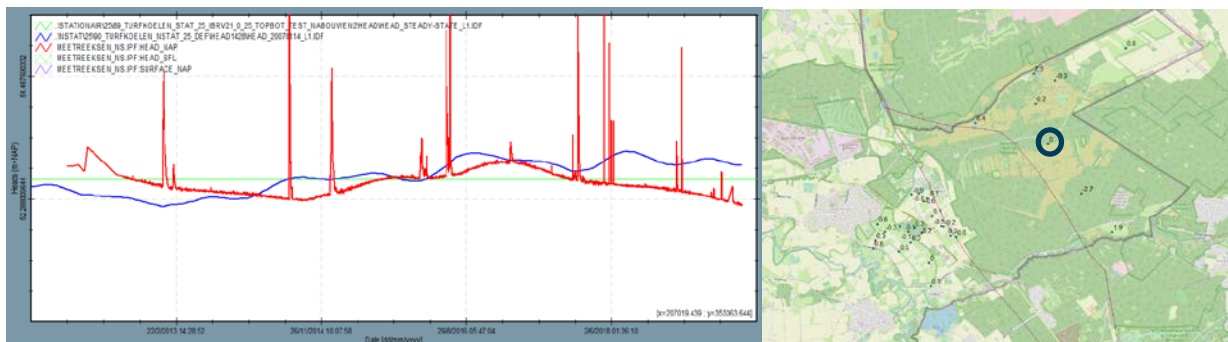
Figuur 5-8b: Verschillen tussen berekende en gemeten stijghoogten eerste watervoerend pakket na kalibratiestap 4

5.4 Tijdsafhankelijke kalibratie

In de tijdsafhankelijke kalibratie zijn de BOFEK-codes (bodemfysische eenheden) van de ondergrond in Duitsland aangepast. Hier werd in het initiële model een bodemtype van “siltige leem” aangenomen. Omdat in het Duitse deel van het modelgebied sprake is van een diepe onverzadigde zone, rekent MetaSWAP voor de gehele onverzadigde zone met dit slecht doorlatende bodemtype. Dit zorgde ervoor dat voor het Duitse deel van het modelgebied nauwelijks variatie (in de tijd) van de grondwateraanvulling werd berekend. Dit is verbeterd door in plaats van siltige leem uit te gaan van zandige leem.

Hieronder worden de resultaten van de tijdsafhankelijke kalibratie gepresenteerd voor de verschillende deelgebieden binnen het modelgebied. Per deelgebied is het resultaat gepresenteerd voor een selectie van één of twee representatieve peilbuizen.

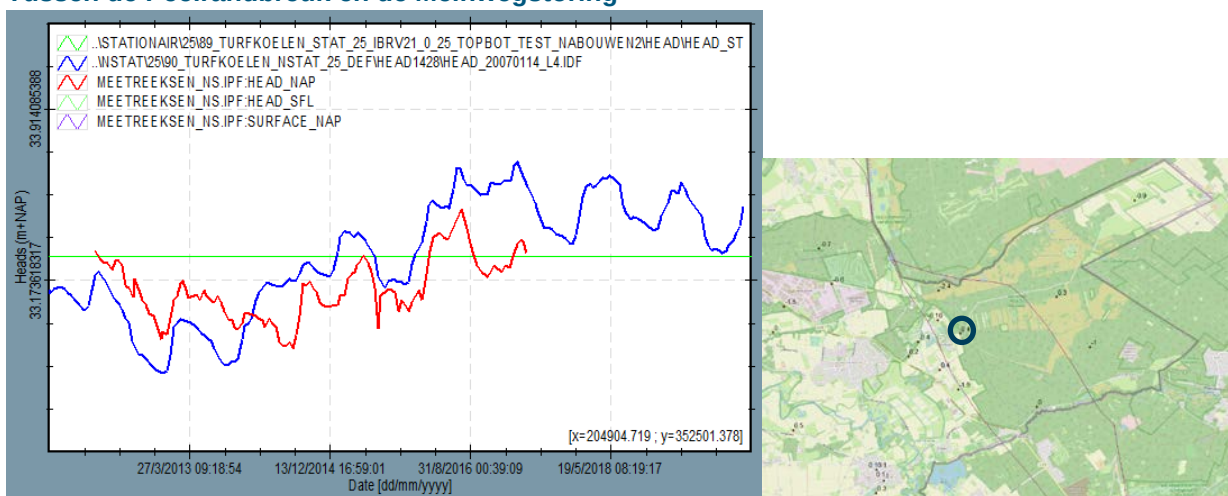
Gebied ten oosten van de Meinwegstoring (Wolfsplateau)



Figuur 5-9: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis ten oosten van de Meinwegstoring. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie van de peilbuis.

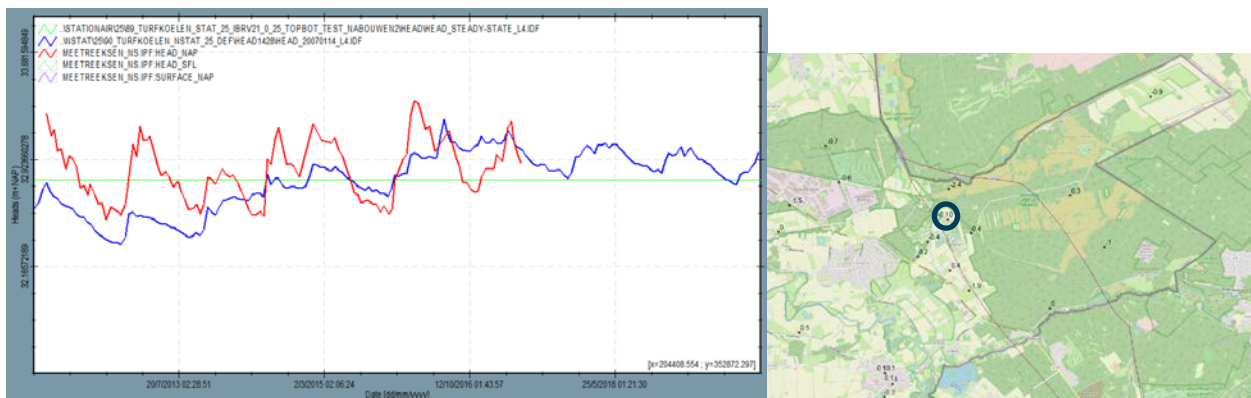
Het maximale verschil tussen de hoogste en laagste stijghoogte gedurende de kalibratieperiode wordt door het model goed gereproduceerd. Het berekende verloop in de tijd komt in dit deel van het model (Peelhorst) niet goed overeen. Het model berekend duidelijk snellere variatie in de tijd dan de meetreeks.

Tussen de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring



Figuur 5-10: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied tussen de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie van de peilbuis.

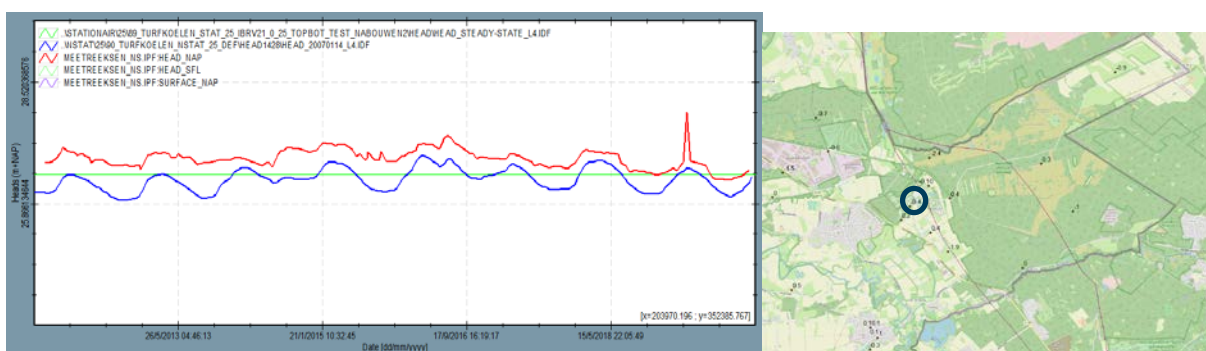
Het maximale verschil tussen de hoogste en laagste stijghoogte gedurende de kalibratieperiode wordt door het model goed gereproduceerd. Het gemeten verloop in de tijd wordt eveneens goed gesimuleerd. De berekende stijghoogten liggen structureel iets hoger dan de gemeten waarden. Deze afwijking bleek ook al tijdens de stationaire kalibratie.



Figuur 5-11: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied tussen de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie van de peilbuis.

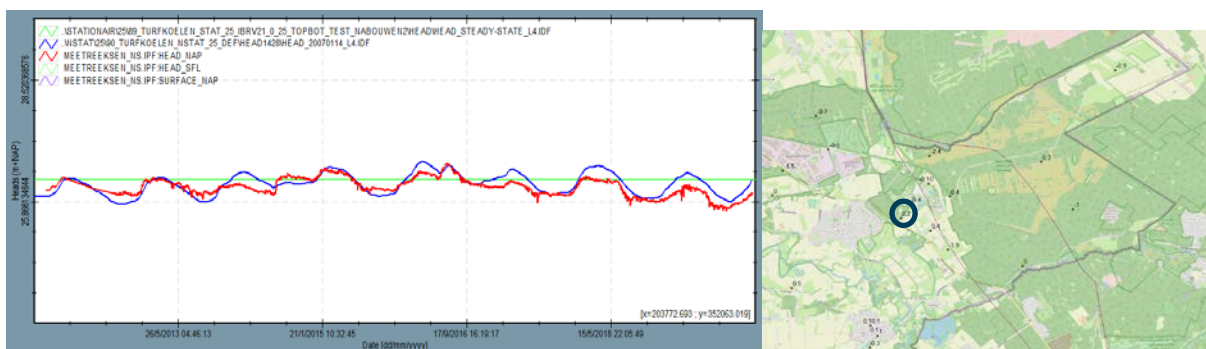
Het maximale verschil tussen de hoogste en laagste stijghoogte gedurende de kalibratieperiode wordt door het model redelijk gereproduceerd. Het gemeten verloop in de tijd wordt eveneens redelijk gesimuleerd. In het begin van de reeks lijkt sprake te zijn van een inspeleffect; het verloop van het tweede deel van de meetreeks wordt iets beter gereproduceerd door het model.

Flinke Ven- eerste watervoerende pakket



Figuur 5-12: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied Flinke Ven, eerste watervoerend pakket. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie peilbuis.

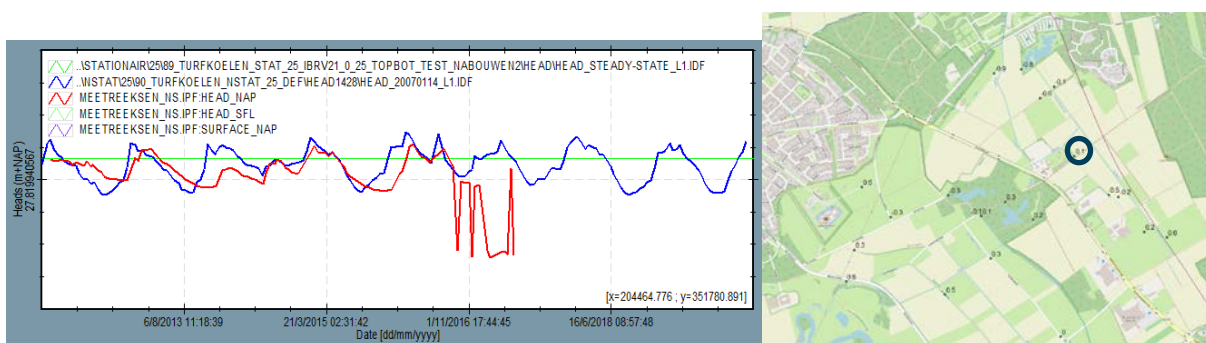
Het maximale verschil tussen de hoogste en laagste stijghoogte gedurende de kalibratieperiode wordt door het model goed gereproduceerd. Ook het gemeten verloop in de tijd wordt goed gesimuleerd. De berekende stijghoogten liggen structureel iets lager dan de gemeten waarden. Deze afwijking bleek ook al tijdens de stationaire kalibratie.



Figuur 5-13: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied Flinke Ven, eerste watervoerend pakket. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie peilbuis.

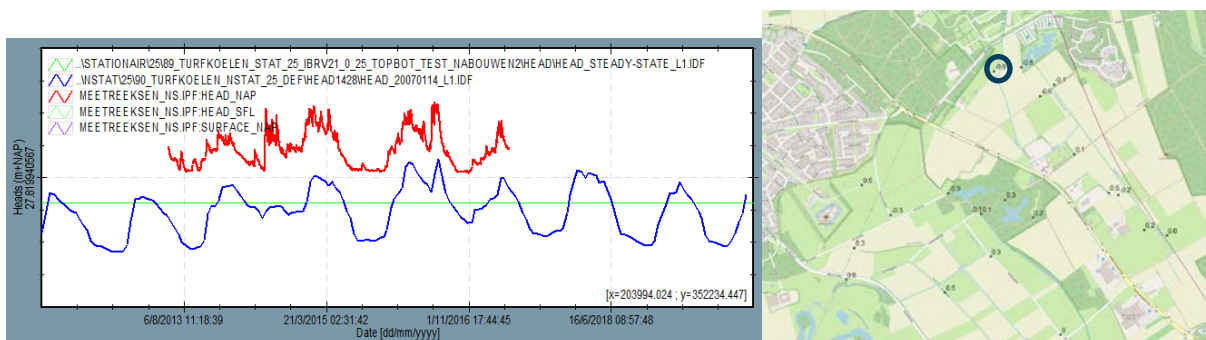
De gemeten dynamiek wordt door het model zeer goed gereproduceerd. Dit geldt zowel voor het maximale verschil tussen de hoogste en laagste stijghoogte in de meetreeks als het verloop in de tijd.

Flinke Ven – freatische grondwaterstand



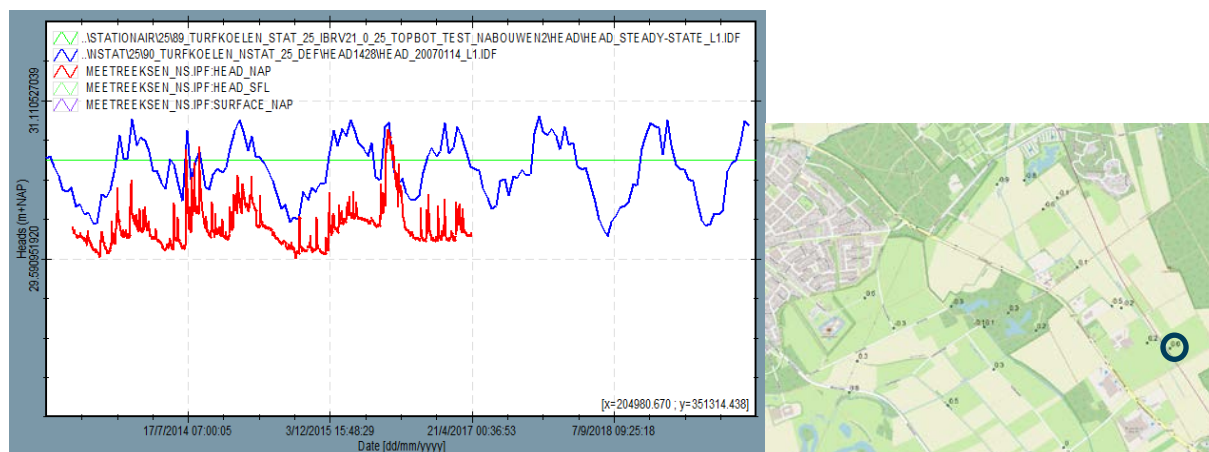
Figuur 5-14: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied Flinke Ven, freatische grondwaterstand. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie peilbuis.

Het maximale verschil tussen de hoogste en laagste grondwaterstand gedurende de kalibratieperiode wordt door het model goed gereproduceerd. Het gemeten verloop in de tijd wordt vrij goed gesimuleerd. De gemeten grondwaterstanden na 1 november 2016 lijken, gezien het afwijkende en vreemde verloop, niet betrouwbaar.



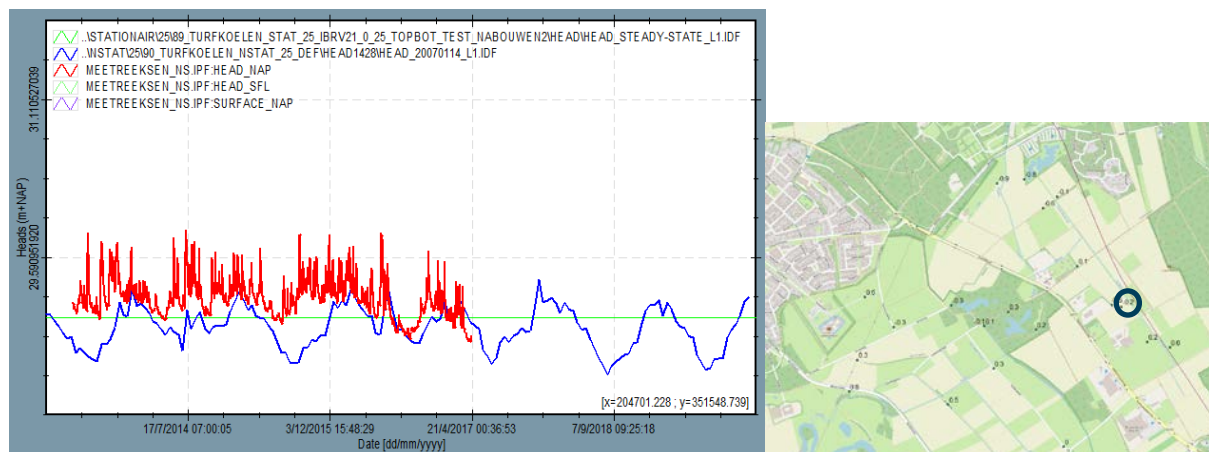
Figuur 5-15: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied Flinke Ven, freatische grondwaterstand. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie peilbuis.

Het maximale verschil tussen de hoogste en laagste grondwaterstand gedurende de kalibratieperiode wordt door het model goed gereproduceerd. Het gemeten verloop in de tijd wordt vrij goed gesimuleerd. De berekende grondwaterstanden liggen structureel lager dan de gemeten waarden. Deze afwijking bleek ook al tijdens de stationaire kalibratie.



Figuur 5-16: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied Flinke Ven, freatische grondwaterstand. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie peilbuis.

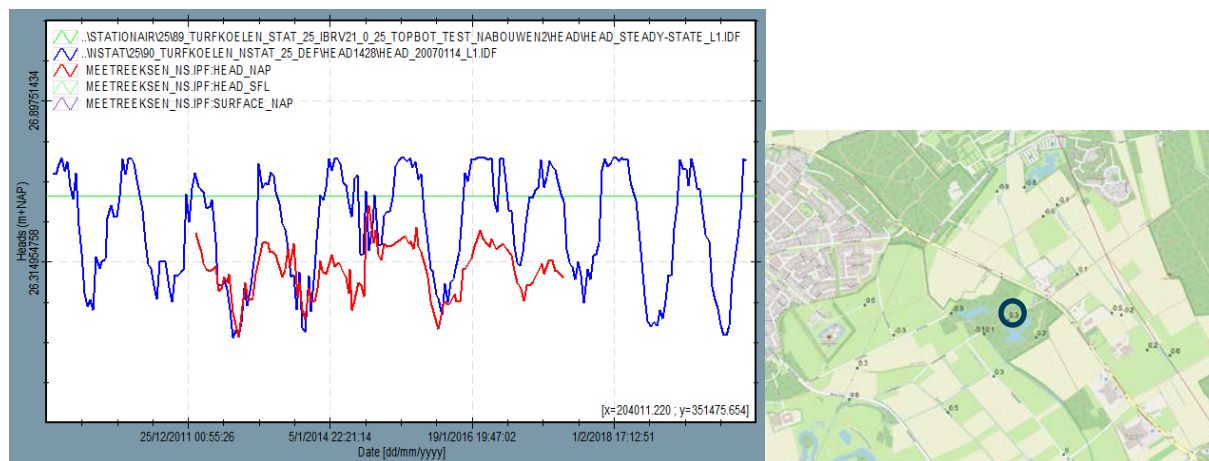
Het maximale verschil tussen de hoogste en laagste grondwaterstand gedurende de kalibratieperiode wordt door het model goed gereproduceerd. Het gemeten verloop in de tijd wordt redelijk gesimuleerd. De berekende grondwaterstanden liggen structureel hoger dan de gemeten waarden. Deze afwijking bleek ook al tijdens de stationaire kalibratie.



Figuur 5-17: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied Flinke Ven, freatische grondwaterstand. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie peilbuis.

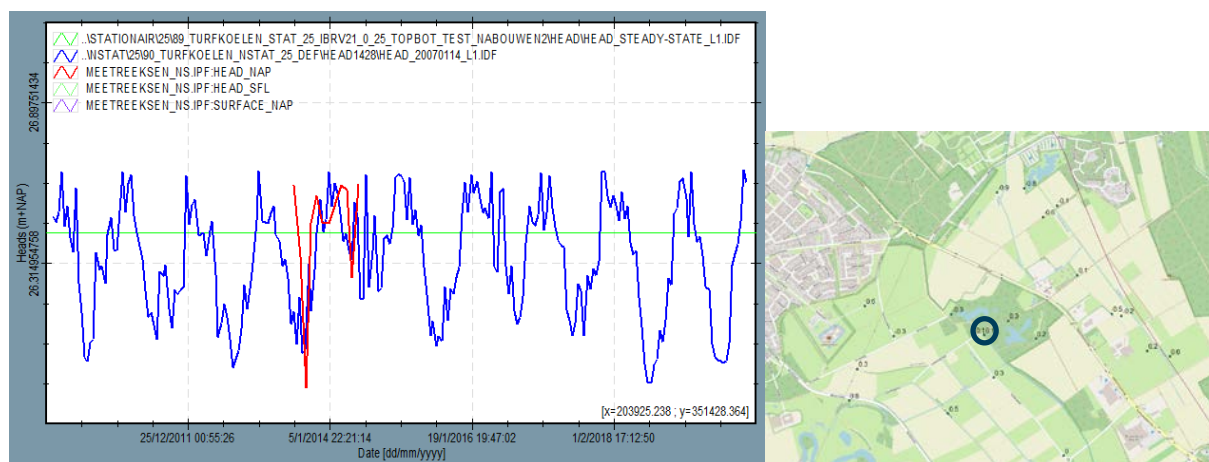
Het maximale verschil tussen de hoogste en laagste grondwaterstand gedurende de kalibratieperiode wordt door het model vrij goed gereproduceerd. Het gemeten verloop in de tijd wordt matig gesimuleerd; de gemeten grondwaterstanden laten veel kortere variaties in de tijd zien dan de berekende grondwaterstanden. De berekende grondwaterstanden liggen structureel lager dan de gemeten waarden. Deze afwijking bleek ook al tijdens de stationaire kalibratie.

Turfkoelen- freatische grondwaterstand



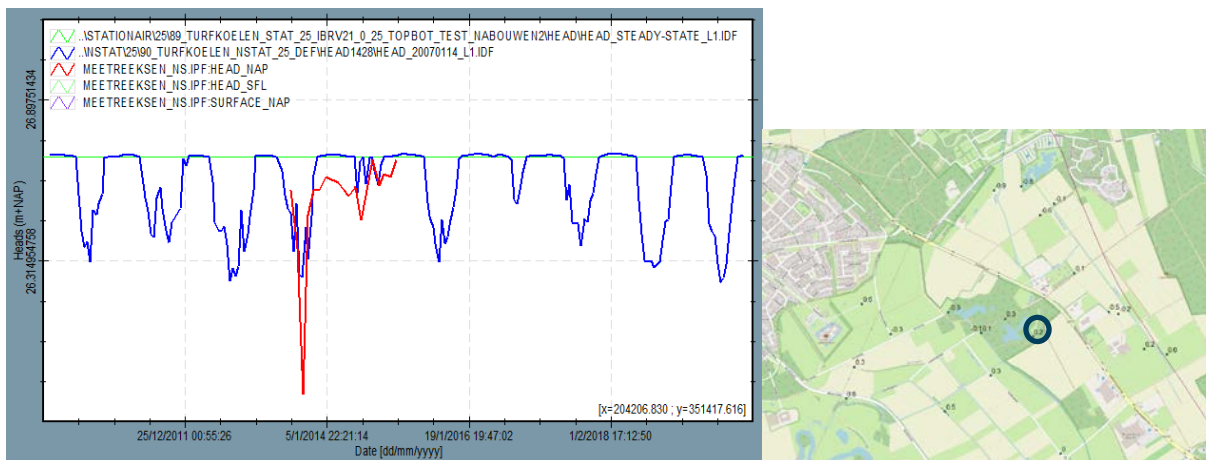
Figuur 5-18: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied Turfkoelen, freatische grondwaterstand. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie peilbuis.

Het model berekent een groter verschil tussen de hoogste en laagste grondwaterstand gedurende de kalibratieperiode dan gemeten (ongeveer 2x zo groot). Het verloop in de tijd wordt vrij goed gesimuleerd.



Figuur 5-19: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied Turfkoelen, freatische grondwaterstand. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie peilbuis.

De gemeten dynamiek wordt door het model goed gereproduceerd. Dit geldt zowel voor het maximale verschil tussen de hoogste en laagste stijghoogte in de meetreeks als het verloop in de tijd. Kanttekening is wel dat de meetreeks erg kort is.



Figuur 5-20: Resultaat tijdsafhankelijke kalibratie voor representatieve peilbuis in het gebied Turfkoelen, freatische grondwaterstand. Rode lijn: gemeten verloop, blauwe lijn: berekend verloop, groene lijn: stationair berekende stijghoogte. Kaart rechts: locatie peilbuis.

De gemeten dynamiek wordt door het model redelijk gereproduceerd. Dit geldt zowel voor het maximale verschil tussen de hoogste en laagste stijghoogte in de meetreeks als het verloop in de tijd. Kanttekening is dat de meetreeks erg kort is.

5.5 Optimalisatieslag met Monte Carlo analyse

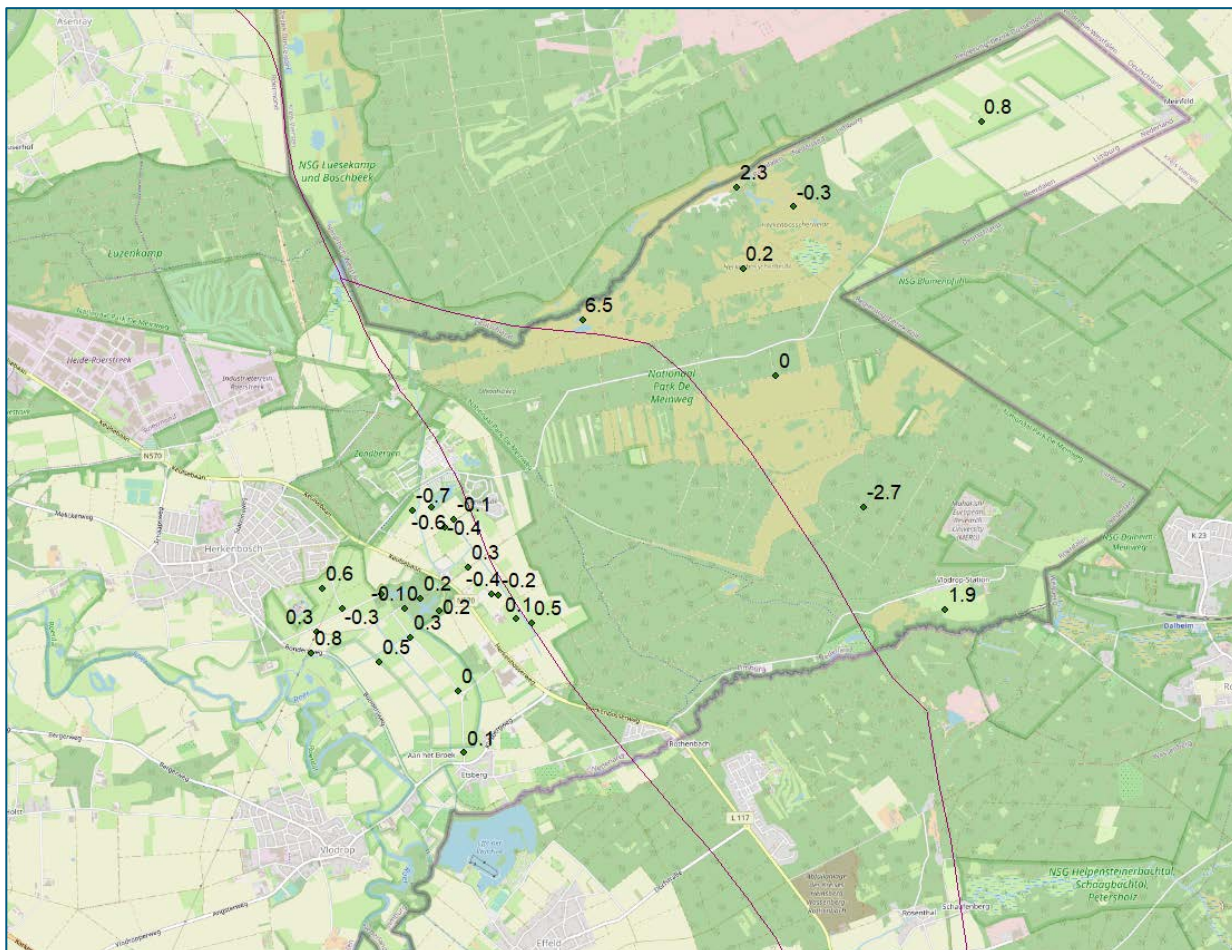
Als laatste optimalisatieslag is een Monte Carlo analyse uitgevoerd. In een Monte Carlo analyse wordt uitgaande van het basismodel (in dit geval het gekalibreerde model na kalibratiestap 4) een groot aantal berekeningen uitgevoerd, waarbij een beperkt aantal invoerparameters wordt gevarieerd binnen een - vooraf door de gebruiker op te geven- interval. Op basis van deze opgegeven parameterverdeling wordt voor elke nieuwe berekening een set met nieuwe parameterwaarden bepaald. De trekking van een waarde uit de parameterverdelingen vindt daarbij plaats met de Latin-Hypercubemethode. Na afloop van alle berekeningen kunnen uit de resultaten de parametercombinaties worden geselecteerd die de geringste afwijking geven tussen de modelresultaten en de meetgegevens.

In de Monte Carlo analyse voor het grondwatermodel Turfkoelen-Flinke Ven zijn in totaal 400 (stationaire) modelberekeningen met willekeurig getrokken parametercombinaties uitgevoerd. Tabel 5-1 geeft de invoerparameters weer, die tijdens de Monte Carlo Analyse zijn gevarieerd. Per parameter is het interval weergegeven in de vorm van een minimale en maximale vermenigvuldigingsfactor (de factor waarmee de waarden uit het gekalibreerde model (eindresultaat na kalibratiestap 4) is vermenigvuldigd. Tevens zijn de vermenigvuldigingsfactoren weergegeven van de Monte Carlo Run met het beste ijkingsresultaat (MC #1).

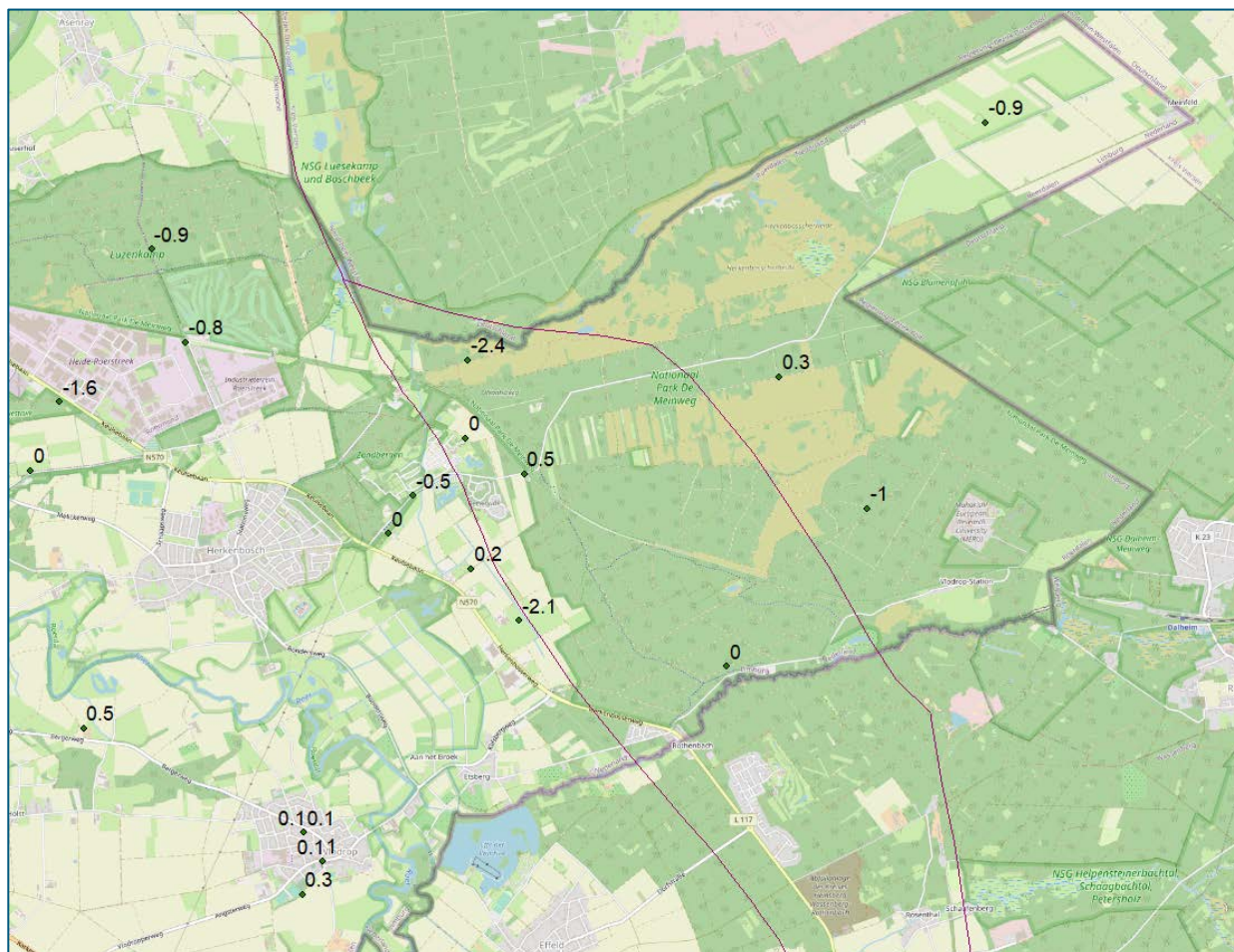
Tabel 5-1: Parameters waarop Monte Carlo Analyse heeft plaatsgevonden, inclusief opgegeven bereik (minimale en maximale vermenigvuldigingsfactor)

Parameter	Minimale factor	Maximale factor	MC #1
Doorlatendheid Peelrandbreuk (in Formatie van Bortel).	0,25	4,00	0,6
Doorlatendheid Peelrandbreuk (in Formaties van Beegden en Sterksel).	0,25	4,00	1,3
Doorlatendheid Formaties van Beegden en Sterksel binnen de Roerdalslenk	0,50	2,00	1,2
Doorlatendheid Bortel ongedefinieerd	0,50	2,00	1,8
Weerstand Bortel ongedefinieerd	0,50	2,00	0,6

Figuren 5-21a en 5-21b geven voor de best scorende run uit de Monte Carlo Analyse de verschillen weer tussen de berekende en gemeten grondwaterstanden en stijghoogten in het eerste watervoerende pakket.



Figuur 5-21a: Verschillen tussen berekende en gemeten grondwaterstanden, best scorende run uit Monte Carlo Analyse



Figuur 5-21b: Verschillen tussen berekende en gemeten stijghoogten eerste wvp, best scorende run uit Monte Carlo Analyse

Vergelijking van Figuren 5-21a en 5-21b met het Figuren 5-8a en 5-8b leert dat de best scorende run uit de Monte Carlo Analyse geen wezenlijke verdere verbetering geeft van het ijkingsresultaat, ten opzichte van het resultaat na kalibratiestap 4. Het grondwatermodel is naar aanleiding van de Monte Carlo Analyse daarom niet verder aangepast.

Wel zijn op basis van de uitkomsten van de Monte Carlo analyse twee alternatieve modellen geselecteerd, die zijn gebruikt voor de betrouwbaarheidsanalyse op de berekende effecten. Het betreft een model met -naar verwachting- de sterkste verbreiding van berekende effecten (grootste doorlatendheid Peelrandbreuk en/of hoogste doorlatendheid Formatie van Beegden) en een model met -naar verwachting- de geringste verbreiding van berekende effecten (geringste doorlatendheid Peelrandbreuk en/of laagste doorlatendheid Formatie van Beegden). Een verdere beschrijving hiervan volgt in hoofdstuk 6.

6 Betrouwbaarheidsanalyse van de modeluitkomsten

6.1 Aanpak betrouwbaarheidsanalyse

In de (theoretische) ideale situatie zijn voor een hydrologische modellering alle benodigde invoerparameters bekend. In de praktijk is dit vrijwel nooit het geval en is er een flink aantal onbekenden. In het deelgebied Turfkoelen – Flinke Ven zit de belangrijkste onzekerheid in de ligging en de eigenschappen van de Peelrandbreuk. Door deze onzekerheid en andere onzekerheden, bijvoorbeeld de verbreiding van leemlagen in de Bostel-formatie en de ruimtelijke verdeling van de doorlatendheden in de Formatie van Beegden, is het aannemelijk dat er meerdere combinaties van modelinvoervariabelen zijn die tot een vergelijkbaar goede reproductie van de gemeten grondwaterstanden en stijghoogten leiden. Om deze reden is aanvullend op de kalibratie van het model een betrouwbaarheidsanalyse uitgevoerd op de -met het model berekende- effecten. Doel hiervan is om de gevolgen van de onzekerheden in de invoerparameters van het model voor de berekende effecten van maatregelen inzichtelijk te maken en te kwantificeren. *De maatregelen zijn dus alleen doorgerekend om het betrouwbaarheidsinterval van de berekende effecten te bepalen en niet om het doelbereik van de maatregelen te analyseren.*

De betrouwbaarheidsanalyse bestond uit de volgende twee stappen:

- Afleiden twee alternatieve geoptimaliseerde hydrologische modellen. Aanvullend op het gekalibreerde hydrologische model zijn twee alternatieve hydrologische modellen afgeleid, één met een verlaagde horizontale doorlatendheid van de Peelrandbreuk en één met een verhoogde horizontale doorlatendheid van de Peelrandbreuk. De alternatieve modellen zijn geselecteerd uit de 75 beste parametercombinaties uit de Monte Carlo analyse (zie paragraaf 5.5). Uit deze top-75 best scorende “kandidaat” modellen is het model geselecteerd waarmee -naar verwachting- de sterkste verbreiding van effecten wordt berekend (grootste doorlatendheid Peelrandbreuk en/of hoogste doorlatendheid Formatie van Beegden) en het model met -naar verwachting- de geringste verbreiding van effecten (geringste doorlatendheid Peelrandbreuk en/of laagste doorlatendheid Formatie van Beegden).
- Vervolgens is met de drie modellen (het gekalibreerde model en twee alternatieve modellen met sterkste en geringste verbreiding effecten) een tweetal generieke maatregelen doorgerekend, te weten:
 - Aanleg van subirrigatie over de volledige oppervlakte van het Flinke Ven.
 - Aanpassen ontwatering in het Flinke Ven conform het scenario “landbouw met beperkingen” dat eerder is doorgerekend door Arcadis (2019). Dempen van een aantal waterlopen en peil van de Flinke Ven Lossing naar 70 cm onder maaiveld.

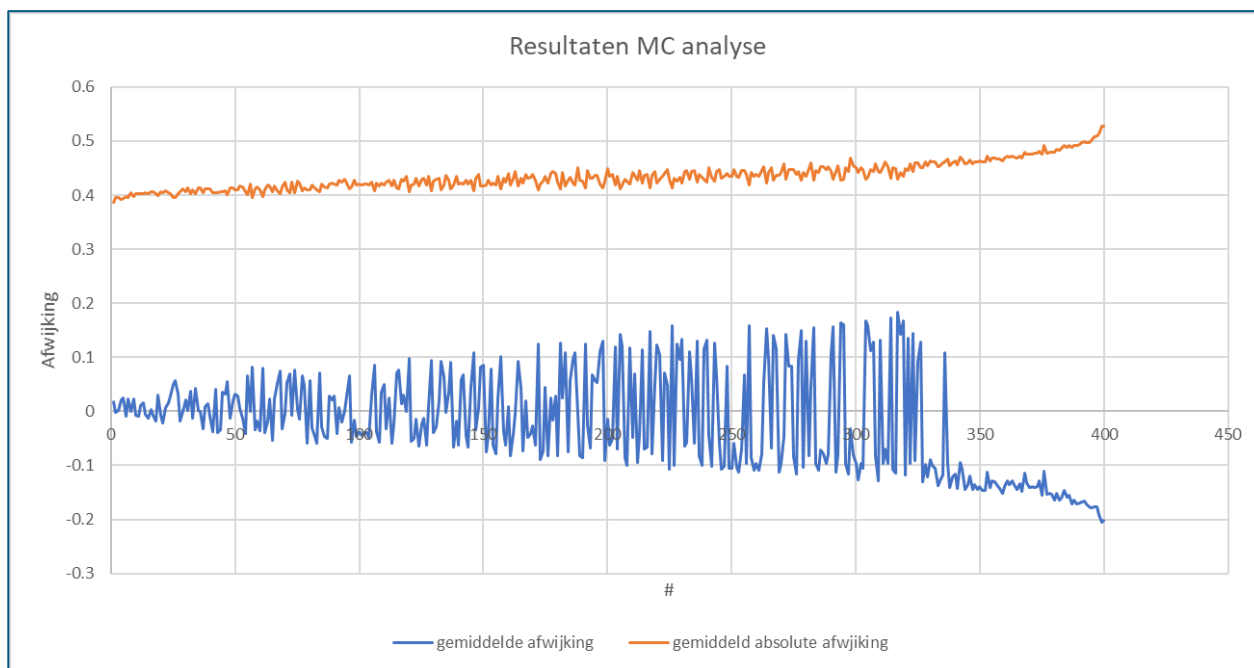
In beide effectberekeningen is het dempen van de Schuttecampsgraaf meegenomen (reeds geplande maatregel). Door de berekende effecten van de drie modellen met elkaar te vergelijken ontstaat inzicht in de mate waarin modelonzekerheden doorwerken in de berekende effecten op de Turfkoelen en omgeving. Op basis hiervan is een eerste indicatie gegeven van het betrouwbaarheidsinterval in de berekende effecten.

6.2 Selectie twee alternatieve modellen

Figuur 6-1 geeft voor alle 400 uitgevoerde modelruns van de Monte Carlo Analyse de gemiddelde afwijking en de gemiddeld absolute afwijking tussen berekende en gemeten grondwaterstanden en stijghoogten weer. Van links naar rechts in de figuur nemen beide parameters geleidelijk toe en wordt het kalibratieresultaat dus slechter.

Uit de 400 Monte Carlo Runs is een selectie gemaakt van alle modelruns met een gemiddelde afwijking tussen -5 en +5 cm en een gemiddeld absolute afwijking van maximaal 45 cm. Dit zijn in totaal 75

modelruns (van in totaal 400). Uit deze 75 modelruns zijn twee alternatieve modellen afgeleid, één met -naar verwachting- de sterkste verbreiding van de berekende effecten (Monte Carlo Run 5) en één met -naar verwachting- de geringste verbreiding van de berekende effecten (Monte Carlo Run 325).



Figuur 6-1: Kalibratieresultaat 400 Monte Carlo Runs, beoordeeld aan de hand van gemiddelde afwijking en gemiddeld absolute afwijking

Tabel 6-1 geeft de vermenigvuldigingsfactoren weer voor de -in de Monte Carlo analyse gevarieerde- modelinvoerparameters weer voor beide modellen: het model met -naar verwachting- de sterkste verbreiding van berekende effecten (MC Run 5; grootste doorlatendheid Peelrandbreuk en/of hoogste doorlatendheid Formatie van Beegden) en het model met -naar verwachting- de geringste verbreiding van effecten (MC Run 325; geringste doorlatendheid Peelrandbreuk en/of laagste doorlatendheid Formatie van Beegden). De vermenigvuldigingsfactoren geven de mate aan waarin de invoerparameters zijn gevarieerd ten opzichte van het gekalibreerde model (eindresultaat kalibratiestap 4).

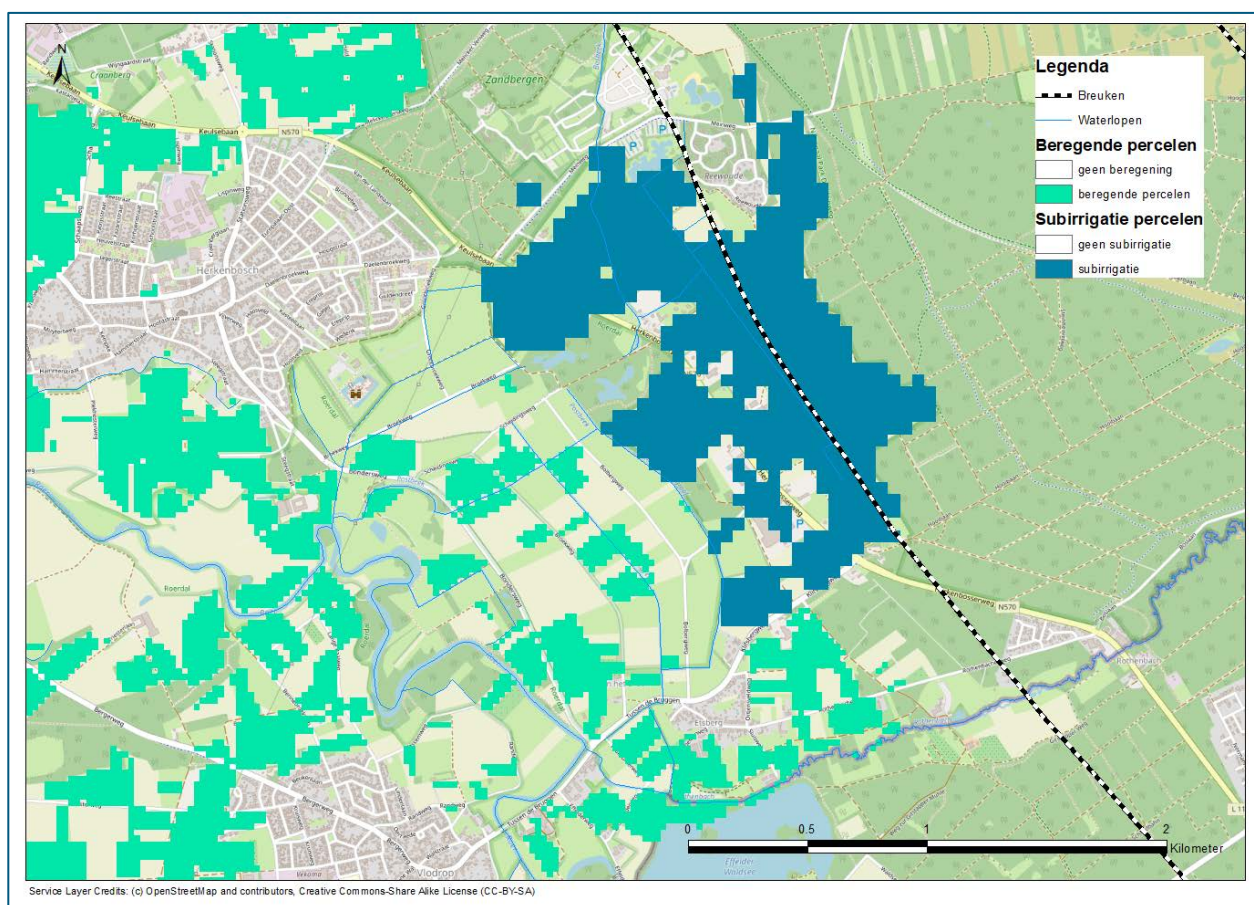
Tabel 6-1: Vermenigvuldigingsfactoren kalibratiemodel na stap 4 (=1,0), beste modelrun uit Monte Carlo Analyse (MC #1), het alternatieve modellen met maximale verwachte verbreiding effecten (run 5) en minimale verwachte verbreiding effecten (run 325)

Parameter	Kalibratie-model	Run 5	Run 325
Doorlatendheid Peelrandbreuk (in Formatie van Bostel).	1,0	0,4	0,7
Doorlatendheid Peelrandbreuk (in Formaties van Beegden en Sterksel).	1,0	0,7	0,3
Doorlatendheid Formaties van Beegden en Sterksel binnen de Roerdalslenk	1,0	1,6	1,1
Doorlatendheid Bostel ongedefinieerd	1,0	0,7	1,8
Weerstand Bostel ongedefinieerd	1,0	0,6	1,2

6.3 Betrouwbaarheidsinterval berekende effecten

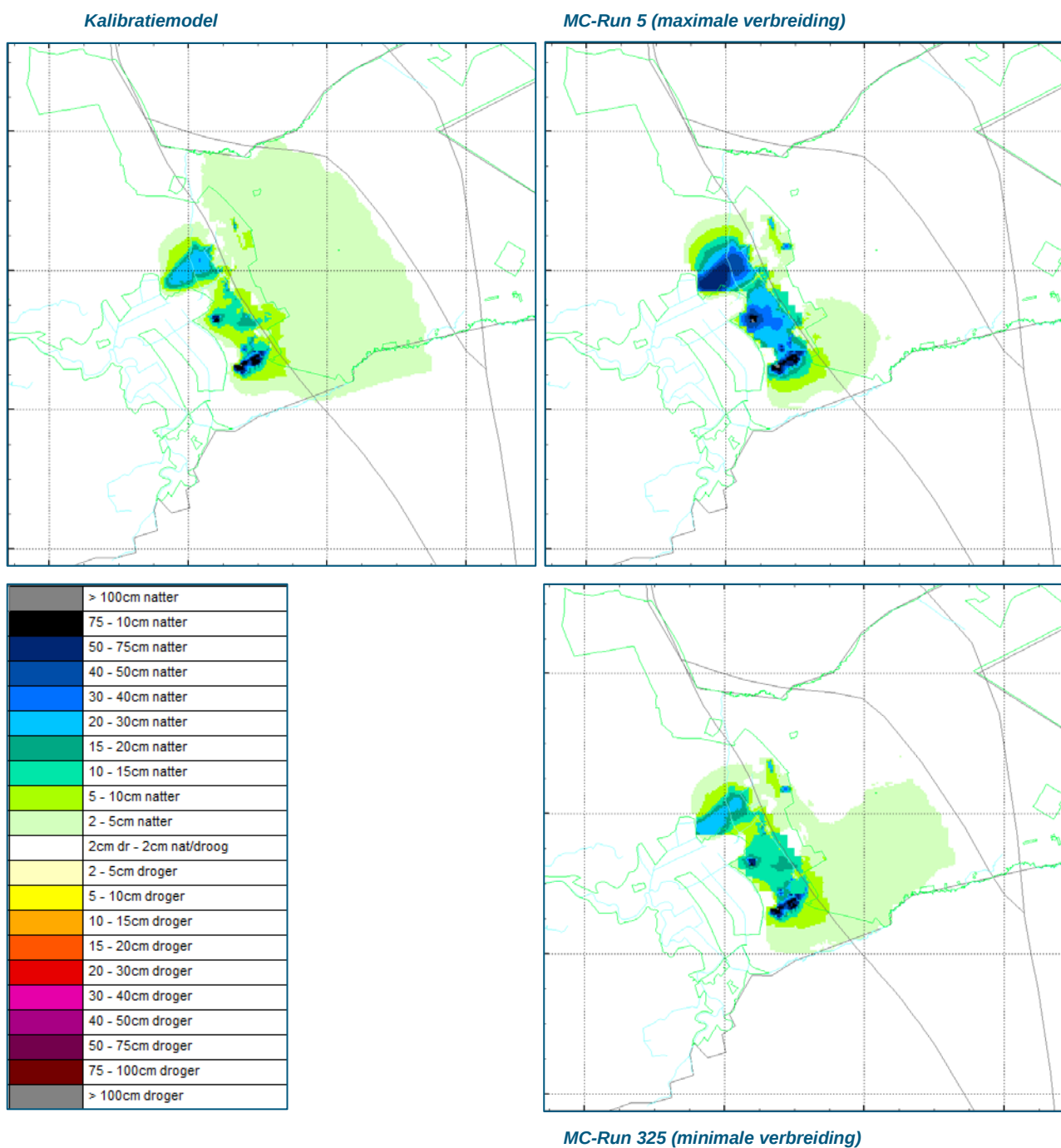
6.3.1 Aanleg van subirrigatie Flinke Ven

Met het kalibratiemodel (resultaat na kalibratiestap 4) en de twee alternatieve modellen MC-run 5 (model met verwachte sterkste verbreiding effecten) en MC-run 325 (model met verwachte geringste verbreiding effecten) zijn de effecten berekend van aanleg van subirrigatie over de volledige oppervlakte van het Flinke Ven. Bij de subirrigatie is gestuurd op een streefpeil van 50 cm onder maaiveld. Dit streefpeil is in het model opgelegd voor de periode van 1 maart tot 1 september. De infiltratieflux vanuit de drains met subirrigatie is in het model gemaximeerd op 2,5 mm/d. Figuur 6-2 geeft de oppervlakte weer, waar in het model subirrigatie is doorgerekend.

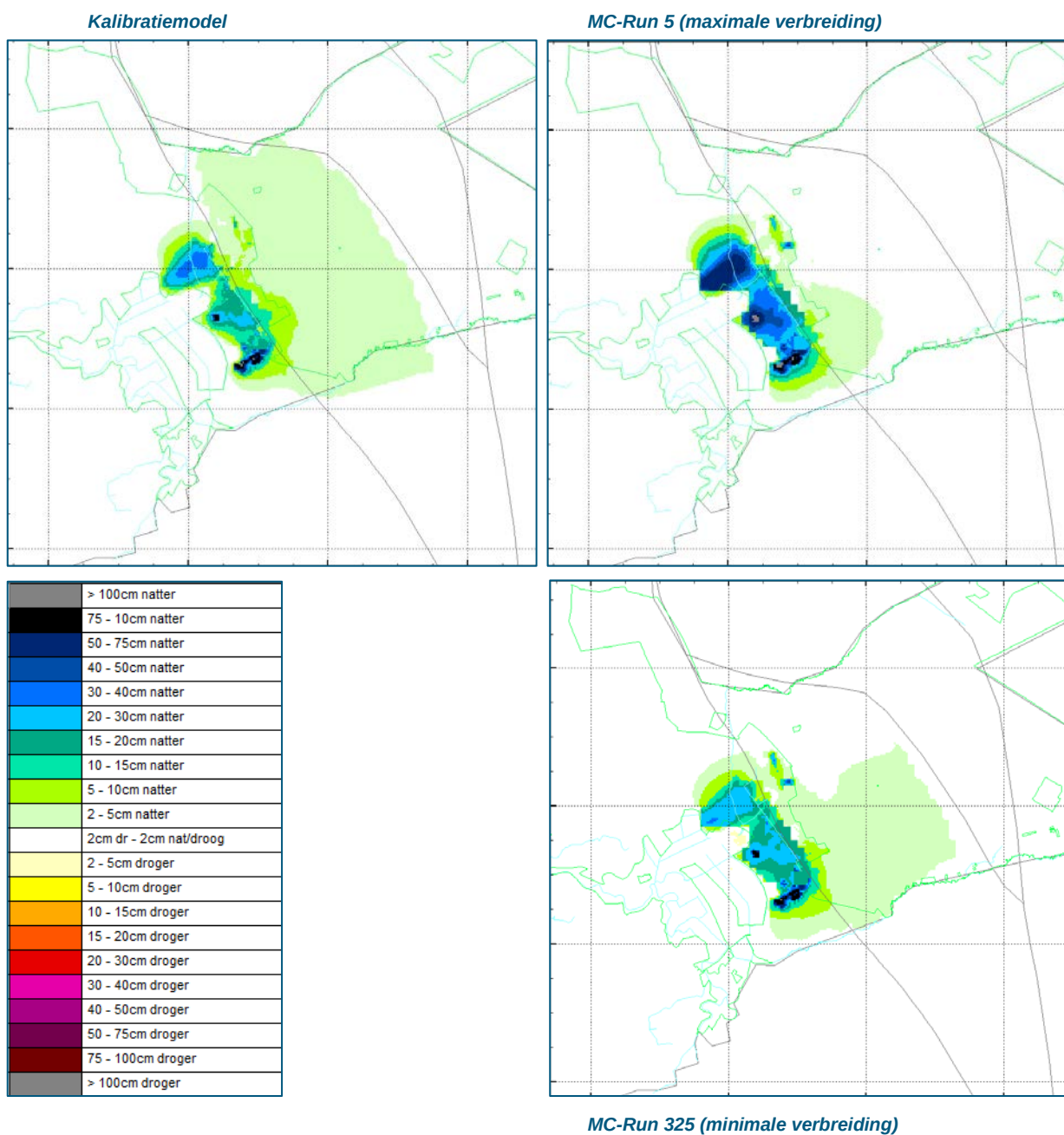


Figuur 6-2: Subirrigatie zoals doorgevoerd in het grondwatermodel

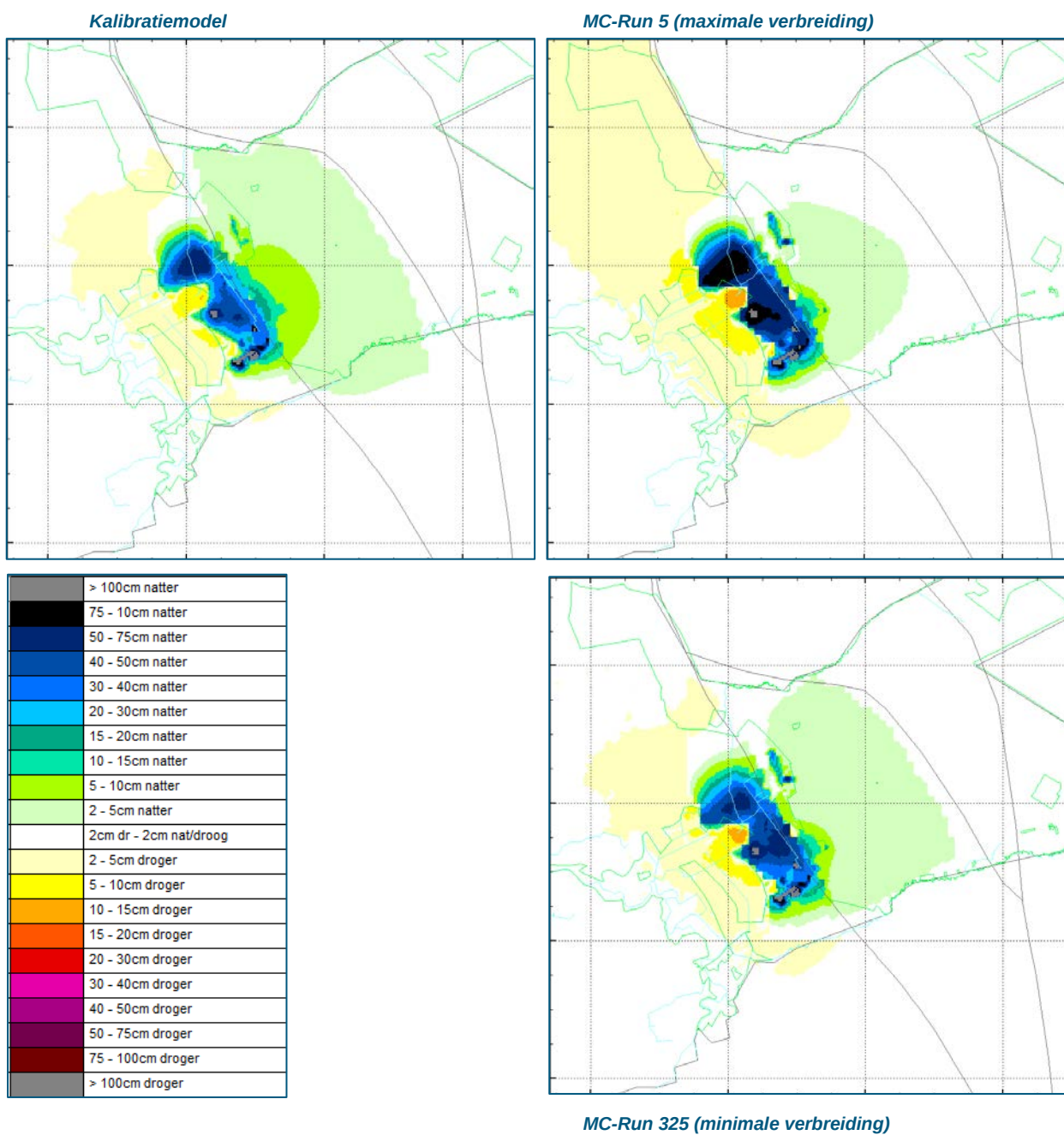
Figuren 6-3 tot en met 6-6 geven voor het kalibratiemodel en Monte Carlo Runs 5 en 325 de berekende veranderingen weer in respectievelijk de GHG, GVG, GLG en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket.



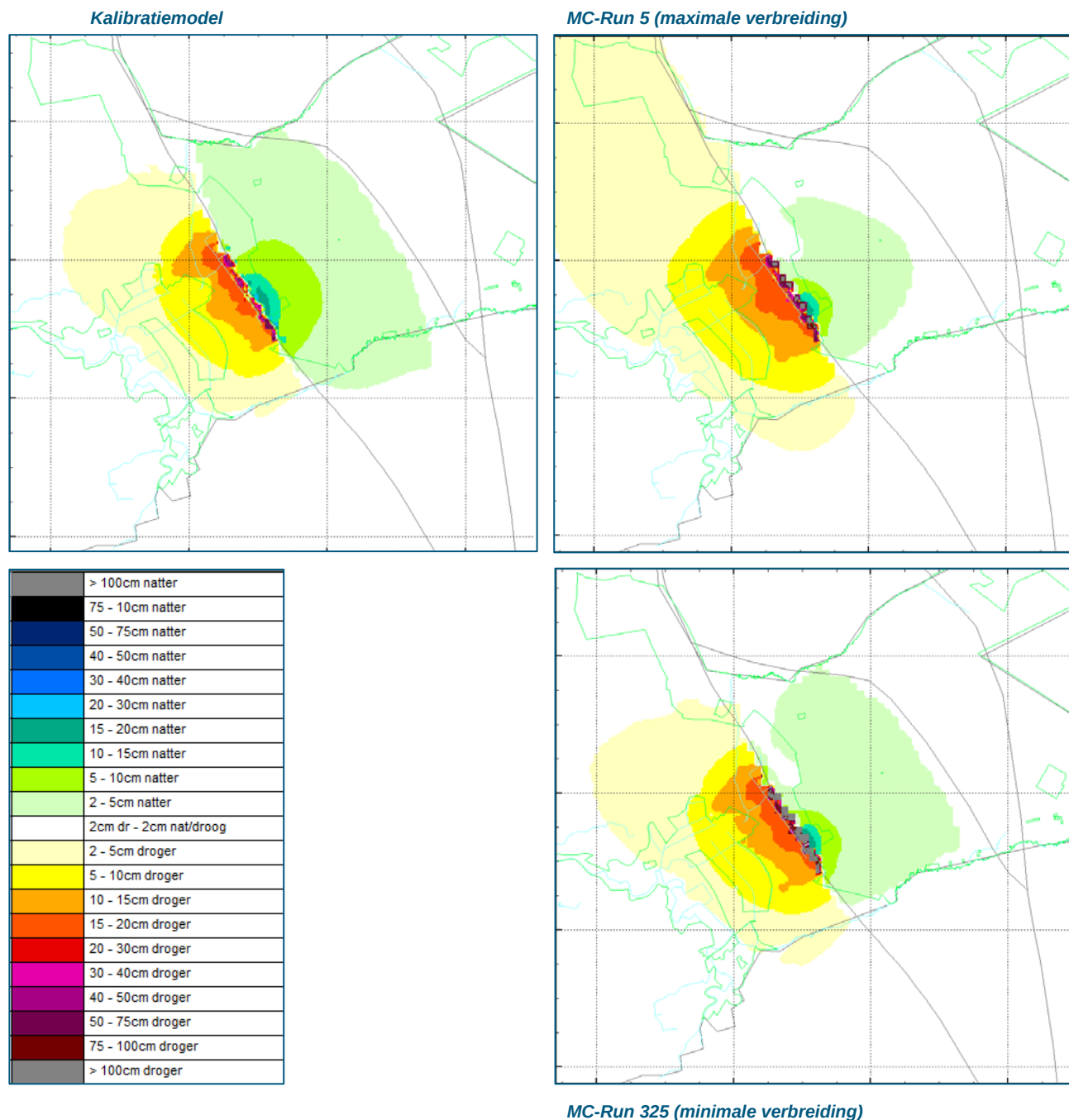
Figuur 6-3: Berekende verandering GHG als gevolg van scenario Aanleg Subirrigatie. Kalibratiemodel, MC-Run 5 en MC-Run 325



Figuur 6-4: Berekende verandering GVG als gevolg van scenario Aanleg Subirrigatie. Kalibratiemodel, MC-Run 5 en MC-Run 325



Figuur 6-5: Berekende verandering GLG als gevolg van scenario Aanleg Subirrigatie. Kalibratiemodel, MC-Run 5 en MC-Run 325



Figuur 6-6: Berekende verandering stijghoogte eerste watervoerend pakket in de zomer als gevolg van scenario Aanleg Subirrigatie. Kalibratiemodel, MC-Run 5 en MC-Run 325

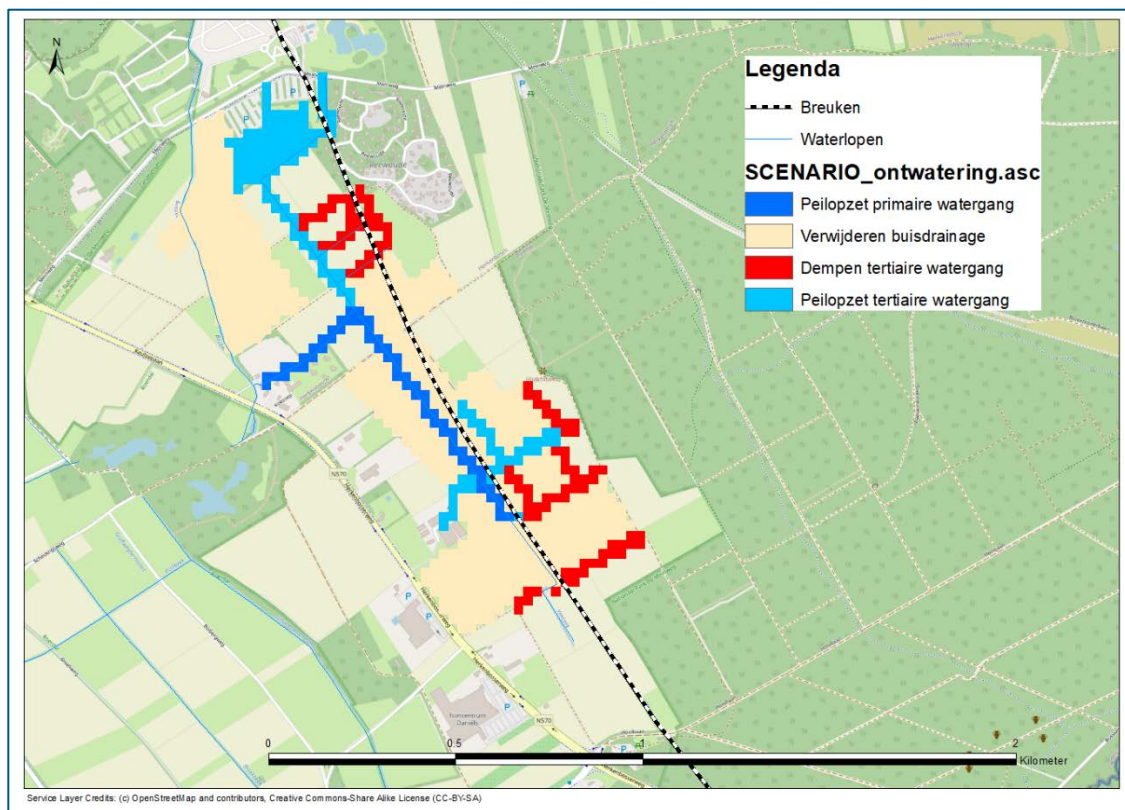
Ten aanzien van de bandbreedte in de berekende effecten vallen de volgende zaken op:

- De modellen geven geen eenduidig beeld voor wat betreft de uitstraling van de effecten. De verwachting was dat modelrun 5 de meeste ruimtelijke verbreiding van effecten zou geven, modelrun 325 de minste en het kalibratiemodel er tussenin zou zitten. De effecten zijn echter wisselend per variabele (GHG, GVG, GLG of stijghoogte), het deelgebied (Roerdalslenk of Peelhorst) en de richting van het uitstralingseffect.
- Desondanks geven de uitgevoerde berekeningen wel een goed beeld van de bandbreedte in te verwachten effecten.

- De subirrigatie leidt vooral tot flinke verhogingen van de grondwaterstanden in het Flinke Ven. De sterkste verhogingen zijn te verwachten voor de GLG, waarbij modelrun 5 de meeste verhogingen geeft, daarna modelrun 325 en het kalibratiemodel de minste verhoging. De verhogingen van de GHG en GVG zijn aanzienlijk minder dan die van de GLG. Dit is logisch omdat de subirrigatie alleen in de periode van 1 maart tot 1 september wordt toegepast. De effecten op de GHG en GVG zijn dus voor het overgrote deel resteffecten van het zomerseizoen ervoor.
- De verhogingen van de GHG en GVG in het Flinke Ven werken nauwelijks door tot in de Turfkoelen. De verhogingen van de GHG en GVG blijven vrijwel overal in de Turfkoelen beperkt tot minder dan 2 cm (tegenover verhogingen in het Flinke Ven in de orde van 30 cm tot meer dan één meter). Voor wat betreft de effecten op de GHG en GVG in de Turfkoelen zijn de drie modelruns ook vrijwel eenduidig.
- In de zomersituatie (GLG) leidt de subirrigatie tot verlagingen in de Turfkoelen. Deze verlagingen zijn het gevolg van de grondwateronttrekkingen ten behoeve van subirrigatie en werken door via het eerste watervoerende pakket. Vergelijking van Figuren 6-5 en 6-6 leert dat de stijghoogteverlagingen in het eerste watervoerend pakket groter zijn dan de GLG-verlagingen. Dit betekent dat de subirrigatie in het Flinke Ven ook leidt tot vermindering van de kwel in de Turfkoelen. De verlagingen van de GLG en de vermindering van de kwel in de Turfkoelen zijn het sterkst in modelrun 5 en het geringst bij het kalibratiemodel. De effecten van modelrun 325 liggen hier tussenin. In modelrun 5 worden in de Turfkoelen GLG-verlagingen berekend van 5 tot maximaal 15 cm. Het kalibratiemodel berekent in het meest oostelijke deel van de Turfkoelen GLG-verlagingen van 2 tot 10 cm.

6.3.2 Aanpassen van de ontwatering in het Flinke Ven

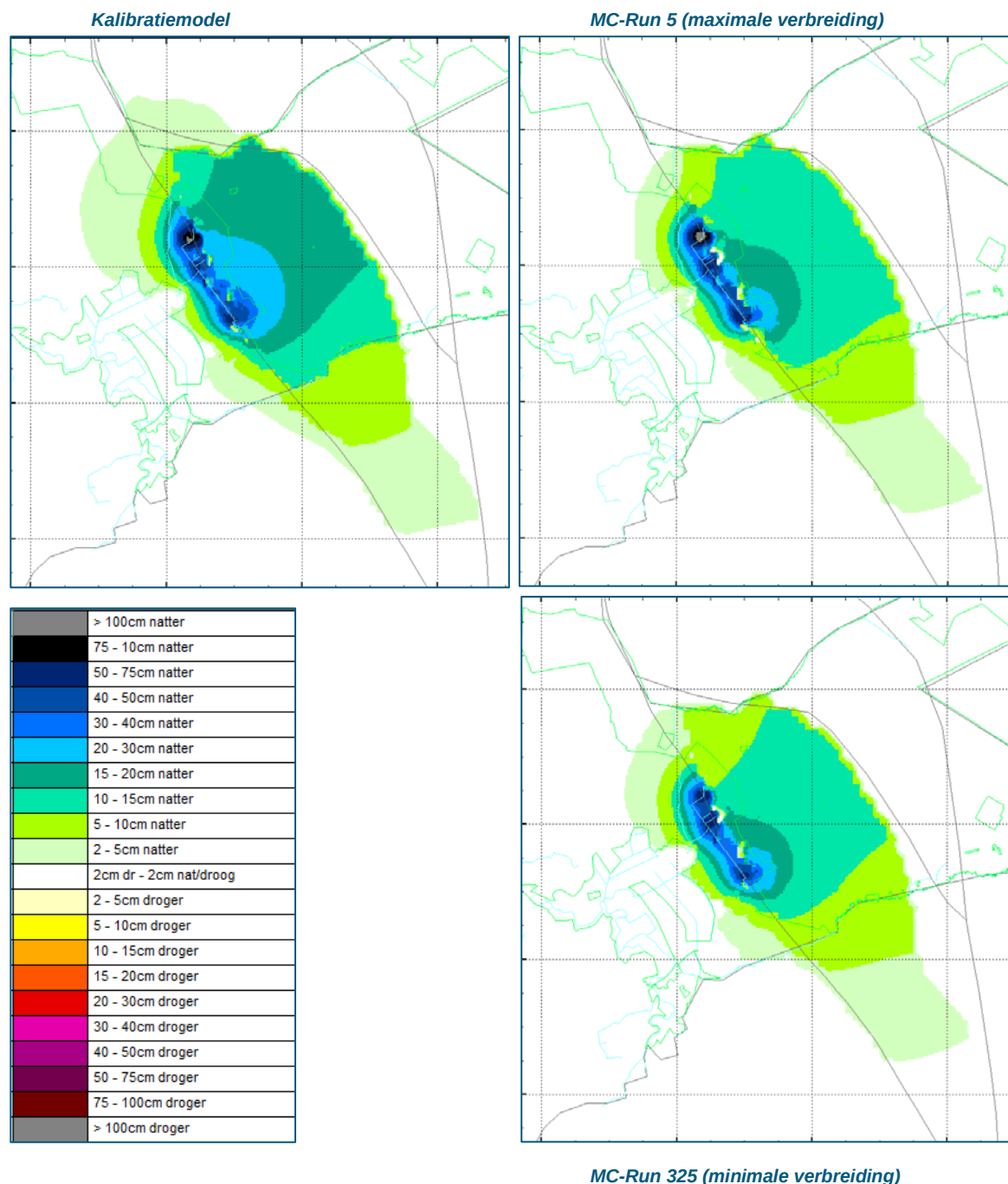
Met het kalibratiemodel (resultaat na kalibratiestap 4) en de twee alternatieve modellen MC-run 5 en MC-Run 325 zijn de effecten berekend van aanpassing van de ontwatering in het Flinke Ven. Figuur 6-7 geeft de doorgerekende maatregelen op kaart weer.



Figuur 6-7: Aanpassing ontwatering in het Flinke Ven, zoals doorgerekend met grondwatermodel (scenario Landbouw met Beperkingen uit onderzoek Arcadis, 2019)

In de verkennende berekening is uitgegaan van aanpassing van de ontwatering in het Flinke Ven conform het scenario “landbouw met beperkingen” dat eerder is doorgerekend door Arcadis (2019). Dit omvatte dempen van een aantal waterlopen en het verhogen van het peil van de Flinke Ven Lossing naar 70 cm onder maaiveld.

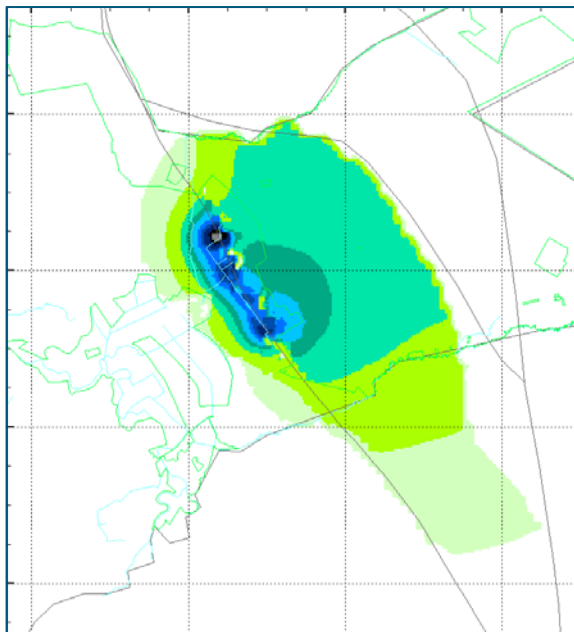
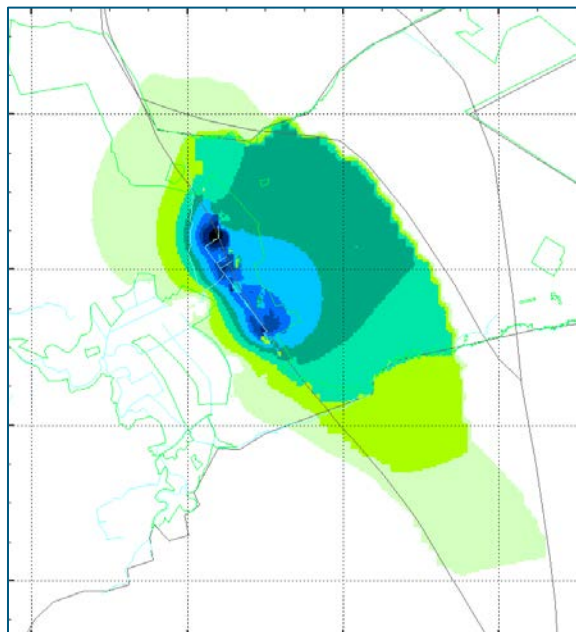
Figuren 6-8 tot en met 6-11 geven voor het kalibratiemodel en Monte Carlo Runs 5 en 325 de berekende veranderingen weer in respectievelijk de GHG, GVG, GLG en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket.



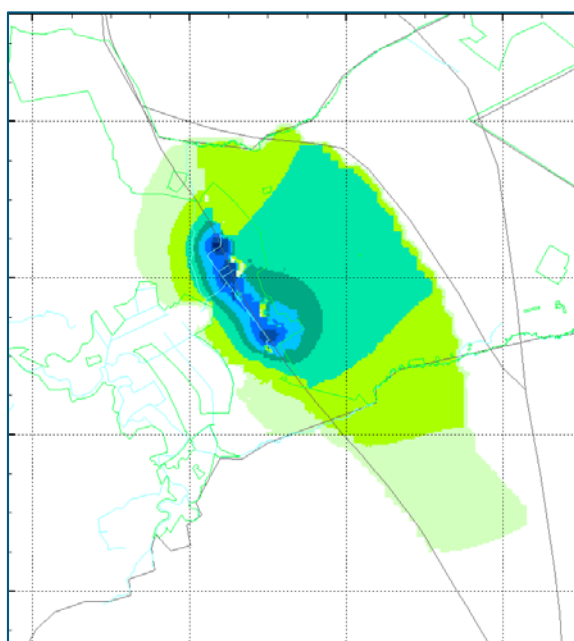
Figuur 6-8: Berekende verandering GHG als gevolg van scenario Aanpassing ontwatering Flinke Ven. Kalibratiemodel, MC-Run 5 en MC-Run 325

Kalibratiemodel

MC-Run 5 (maximale verbreiding)

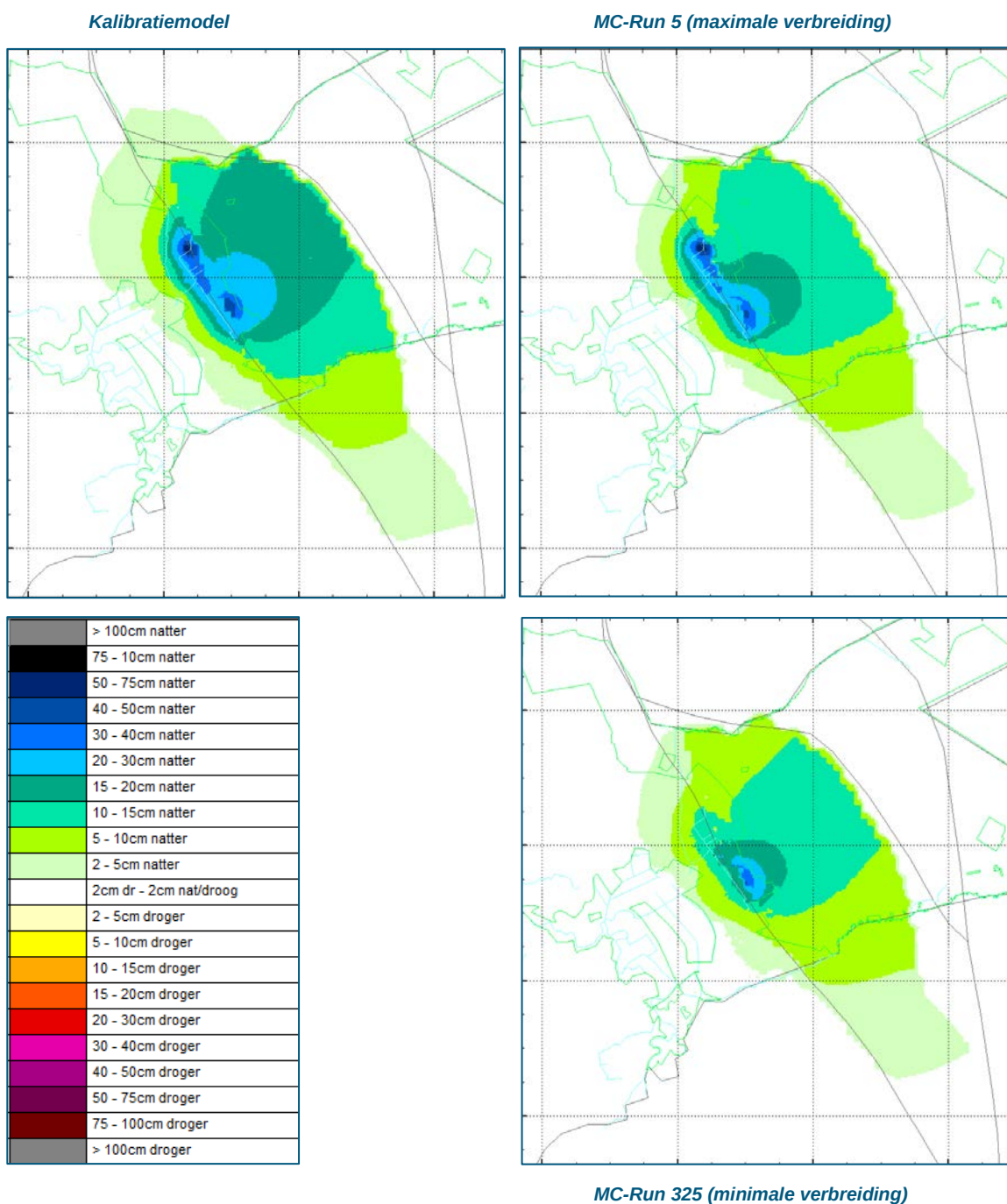


	> 100cm natter
	75 - 10cm natter
	50 - 75cm natter
	40 - 50cm natter
	30 - 40cm natter
	20 - 30cm natter
	15 - 20cm natter
	10 - 15cm natter
	5 - 10cm natter
	2 - 5cm natter
	2cm dr - 2cm nat/droog
	2 - 5cm droger
	5 - 10cm droger
	10 - 15cm droger
	15 - 20cm droger
	20 - 30cm droger
	30 - 40cm droger
	40 - 50cm droger
	50 - 75cm droger
	75 - 100cm droger
	> 100cm droger

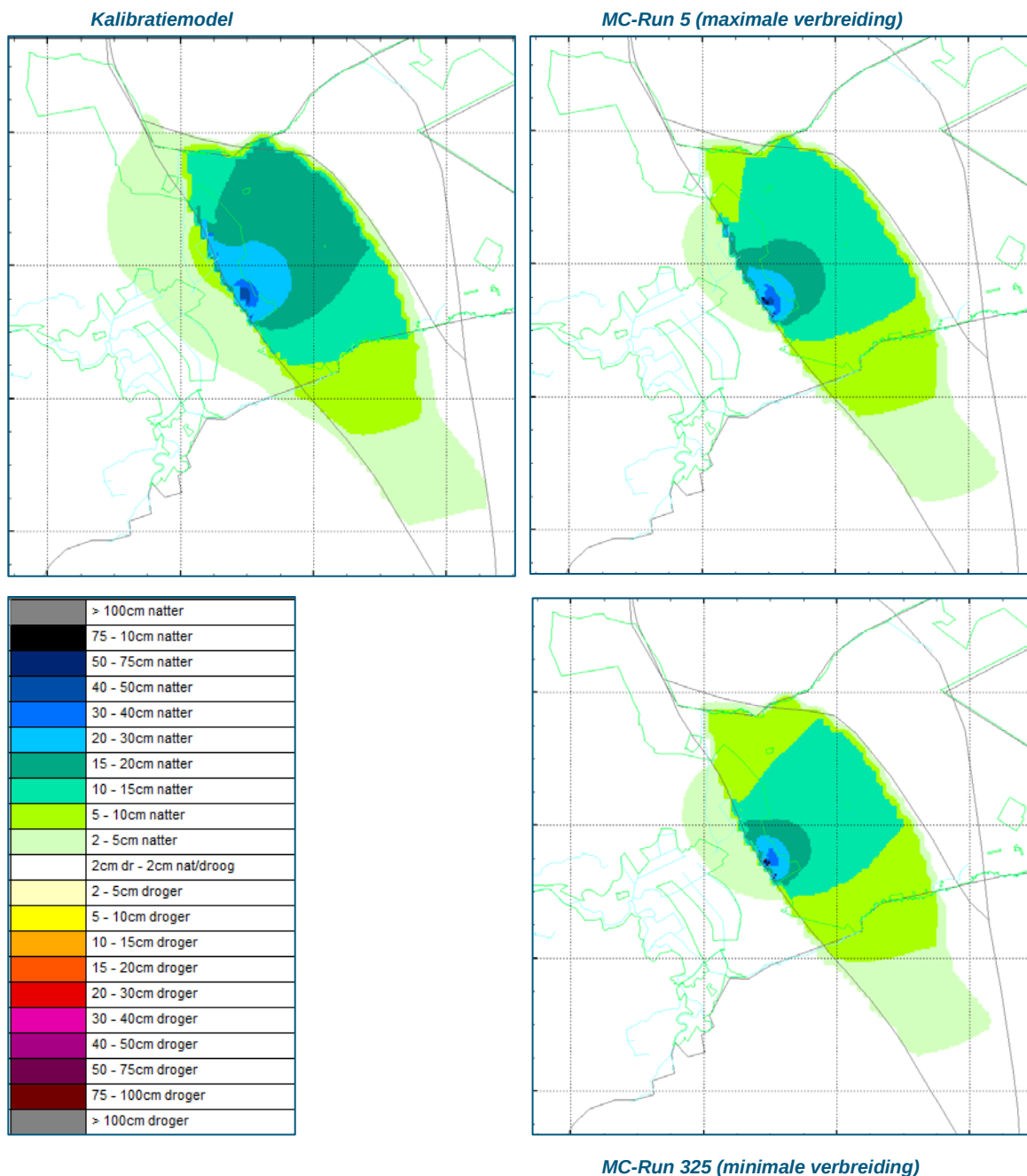


MC-Run 325 (minimale verbreiding)

Figuur 6-9: Berekende verandering GVG als gevolg van scenario Aanpassing ontwatering Flinke Ven. Kalibratiemodel, MC-Run 5 en MC-Run 325



Figuur 6-10: Berekende verandering GLG als gevolg van scenario Aanpassing ontwatering Flinke Ven. Kalibratiemodel, MC-Run 5 en MC-Run 325



Figuur 6-11: Berekende verandering stijghoogte eerste watervoerend pakket in de zomer als gevolg van scenario Aanpassing ontwatering Flinker Ven. Kalibratiemodel, MC-Run 5 en MC-Run 325

Ten aanzien van de bandbreedte in de berekende effecten vallen de volgende zaken op:

- De modellen geven geen eenduidig beeld voor wat betreft de uitstraling van de effecten. De verwachting was dat modelrun 5 de meeste ruimtelijke verbreiding van effecten zou geven, modelrun 325 de minste en het kalibratiemodel er tussenin zou zitten. De effecten zijn echter wisselend per variabele (GHG, GVG, GLG of stijghoogte), het deelgebied (Roerdalslenk of Peelhorst) en de richting van het uitstralingseffect.
- Desondanks geven de uitgevoerde berekeningen wel een goed beeld van de bandbreedte in te verwachten effecten.

- De aanpassing van de af- en ontwatering leidt vooral tot flinke verhogingen van de grondwaterstanden in het Flinke Ven. De sterkste verhogingen zijn te verwachten voor de GHG en de GVG. Deze variëren van ongeveer 10 cm tot lokaal meer dan één meter. De sterkste effecten en ruimtelijke verbreiding worden berekend door modelrun 5, de geringste effecten en verbreiding door modelrun 325 en het kalibratiemodel ligt hier tussenin.
- De GLG stijgt aanzienlijk minder dan de GHG en de GVG. In de zomersituatie (GLG) is het drainerende effect van de watergangen, sloten en drains aanzienlijk minder dan in de winter- en voorjaarssituatie (GHG en GVG). Vermindering van de drainagecapaciteit heeft daarom in de zomersituatie minder effect op de grondwaterstanden (GLG) dan in de winter of het voorjaar (GHG of GVG). De GLG-stijgingen variëren van ongeveer 10 cm tot lokaal ruim 50 cm. De sterkste effecten en ruimtelijke verbreiding worden berekend door het kalibratiemodel, de geringste effecten en verbreiding door modelrun 325 en de effecten van modelrun 5 lijken sterk op die van het kalibratiemodel (slechts iets minder).
- De verhogingen van de GHG en GVG in het Flinke Ven werken nauwelijks door tot in de Turfkoelen. De verhogingen van de GHG en GVG blijven vrijwel overal in de Turfkoelen beperkt tot minder dan 2 cm (tegenover verhogingen in het Flinke Ven tot meer dan één meter). Alleen modelrun 5 geeft lokaal in het oostelijke deel van de Turfkoelen verhogingen van de GHG en GVG van 2 tot 5 cm. De andere 2 runs resulteren vrijwel nergens binnen de Turfkoelen in GHG- en GVG-verhogingen van meer dan 2 cm.
- In de Turfkoelen zijn de effecten op de GLG groter dan de veranderingen van de GHG en GVG. Alledrie de modelruns resulteren in het meest oostelijke deel van de Turfkoelen in GLG-stijgingen van 2 tot 5 cm. De grootste verbreiding van effecten wordt berekend door het kalibratiemodel, gevolgd door modelrun 325 en daarna modelrun 5.

7 Conclusies en aanbevelingen

Doel van fase 1 van het hydrologisch onderzoek Turfkoelen was het opzetten en kalibreren van een hydrologisch model waarmee de effecten van haspelberegening en subirrigatie op het Natura 2000-gebied Turfkoelen kunnen worden gekwantificeerd met de nauwkeurigheid die noodzakelijk is voor de onderbouwing van een Passende Beoordeling in het kader van Natura 2000.

Opzet van het grondwatermodel

In de opzet van het grondwatermodel zijn ten opzichte van de eerdere modelleringen met name verbeteringen doorgevoerd in:

- De modelschematisatie van de ondergrond. Deze is opgezet op basis van de meest actuele beschikbare informatie, namelijk REGIS II v2.2, H3O Rose en GeoTOP.
- De schematisatie en parameterisatie van het ontwateringssysteem:
 - De peilen van de primaire watergangen zijn overgenomen uit het IBRAHYM-model gemaakt voor de Limburgse Integrale Watersysteemanalyse (LIWA). In het kader van LIWA heeft een update plaatsgevonden van de schematisatie van de primaire en secundaire watergangen op basis van alle -begin 2019- beschikbare oppervlaktewatermodellen van Waterschap Limburg.
 - Aanvullend zijn de peilen van de Roer op twee locaties vergeleken met metingen en op vier locaties beoordeeld op basis van expert judgement;
 - De ligging en peilen van de watergangen in het Flinke Ven en het Herkenbosscherbroek zijn beoordeeld op basis van gebiedskennis van het Waterschap Limburg en de Provincie Limburg en waar nodig aangepast.
 - De stuwstanden in het Flinke Ven zijn gecontroleerd aan de legger van Waterschap Limburg.
 - Voor de buisdrainage is in eerste instantie uitgegaan van het LIWA-model. Vervolgens is de ligging van de buisdrainage gecontroleerd op basis van gebiedskennis van Waterschap Limburg en de Provincie Limburg. Waar nodig zijn aanpassingen doorgevoerd in de modelinvoer.
- De modellering van beregening is verder geoptimaliseerd. Specifiek voor het modelgebied is een vergelijking uitgevoerd tussen de berekende en geregistreerde beregeningshoeveelheden (voor de jaren 2016 t/m 2018). Om de berekening in het model beter aan te laten sluiten op de landbouwkundige praktijk, is de aangenomen terugkeerfrequentie in MetaSWAP aangepast: voor alle gewassen 14 dagen (was eerder 10 dagen voor gras en 7 dagen voor overige landbouwgewassen).

Stationaire en tijdsafhankelijke ijking

Vervolgens is een uitgebreide stationaire en tijdsafhankelijke ijking uitgevoerd. Daarin hebben de volgende optimalisatieslagen plaatsgevonden:

- Kalibratie van de stijghoogten in het gebied ten oosten van de Peelrandbreuk (Peelhorst). In eerdere modellen werden hier veel te lage stijghoogten berekend.
- Kalibratie van de doorlatendheid van de Peelrandbreuk en de Meinwegstoring.
- Kalibratie van de Roerdalslenk (voor zover gelegen binnen het modelgebied).
- Verdere fijnregeling kalibratieresultaat rondom Flinke Ven en Turfkoelen.

Dit resulteerde in een grondwatermodel voor de Turfkoelen, het Flinke Ven en wijdere omgeving, dat door de projectgroep als voldoende betrouwbaar is beoordeeld voor het kwantificeren van de effecten van herstelmaatregelen, als onderbouwing van een Passende Beoordeling in het kader van Natura2000. Het stationaire ijkresultaat is ten opzichte van eerdere modellen (o.m. eerder model Arcadis, IBRAHYM Roerdalslenk) zeer aanzienlijk verbeterd in het oostelijke deel van het modelgebied (ten oosten van de Peelrandbreuk). In de andere delen van het modelgebied is het stationaire kalibratieresultaat vergelijkbaar met dat van het eerder door Arcadis opgezette grondwatermodel. In de tijdsafhankelijke kalibratie kon het tijdverloop van de gemeten grondwaterstanden en stijghoogten voor de meeste peilbuizen goed worden gereproduceerd.

Betrouwbaarheidsanalyse berekende effecten.

Aansluitend op de opzet en ijking van het grondwatermodel is een betrouwbaarheidsanalyse uitgevoerd. Met een Monte Carlo Analyse zijn aanvullend op het gekalibreerde hydrologische model twee alternatieve hydrologische modellen afgeleid, die allebei een vergelijkbaar kalibratieresultaat hebben:

- Een model waarmee -naar verwachting- de sterkste verbreiding van effecten wordt berekend (grootste doorlatendheid Peelrandbreuk en/of hoogste doorlatendheid Formatie van Beegden);
- Een model met -naar verwachting- de geringste verbreiding van effecten (geringste doorlatendheid Peelrandbreuk en/of laagste doorlatendheid Formatie van Beegden).

Vervolgens is met de drie modellen (gekalibreerd model en twee alternatieve modellen met sterkste en geringste verbreiding effecten) een tweetal *generieke* maatregelen doorgerekend, te weten:

- Aanleg van subirrigatie over de volledige oppervlakte van het Flinke Ven.
- Aanpassen ontwatering in het Flinke Ven conform het scenario “landbouw met beperkingen” dat eerder is doorgerekend door Arcadis (2019). Dempen van een aantal waterlopen en peil van de Flinke Ven Lossing naar 70 cm onder maaiveld.

Door de berekende effecten van de drie modellen met elkaar te vergelijken is getracht inzicht te krijgen in de mate waarin modelonzekerheden doorwerken in de berekende effecten op de Turfkoelen en omgeving.

De maatregelen zijn uitsluitend doorgerekend om het betrouwbaarheidsinterval van de berekende effecten te bepalen en niet om het doelbereik van de maatregelen te analyseren.

De betrouwbaarheidsanalyse leidde tot de volgende conclusies:

- De modellen geven geen eenduidig beeld voor wat betreft de uitstraling van de effecten. De verwachting was een duidelijk onderscheid in een model met veel uitstraling van effecten, een model met weinig uitstraling van effecten en het kalibratiemodel, dat daar tussenin zit. De berekende effecten bleken echter wisselend per variabele (GHG, GVG, GLG of stijghoogte), het deelgebied (Roerdalslenk of Peelhorst) en de richting van het uitstralingseffect.
- Desondanks geven de uitgevoerde berekeningen wel een goed beeld van de bandbreedte in te verwachten effecten.

Aanbevelingen voor fase 2 Turfkoelen

Voor de toepassing van het hydrologisch model in fase 2 Turfkoelen, bevelen wij het volgende aan:

- Pas de in fase 1 uitgewerkte aanpak van de betrouwbaarheidsanalyse ook toe voor het doorrekenen, analyseren, uitwerken en onderbouwen van maatregelen(pakketten) in fase 2.
- Besteed in de definitieve uitwerking van herstelmaatregelen voor Turfkoelen ook aandacht aan de aanvoer van oppervlaktewater vanuit de zone rond de Peelrandbreuk (in het Flinke Ven) naar de Turfkoelen en maak daarbij onderscheid naar de kwantiteit (debieten en verdeling ervan over het jaar) en de waterkwaliteit (onder meer nutriënten en basenrijkdom).
- Beschouw in fase 2 ook alternatieven om meer water in het gebied te kunnen houden, bijvoorbeeld door overtollig water vanuit het Flinke Ven terug te pompen naar hoger gelegen percelen om daar te laten infiltreren.

8 Referenties

- Arcadis, 2019. Hydrologisch onderzoek Flinke Ven en de Turfkoelen. Rapportnummer 079789012B. Arcadis Nederland B.V. 19 augustus 2019.
- Deltares, 2019. Het model IBRAHYM-Roerdalslenk.
- Grontmij, 2014. Vernattingsproject Schuttecampsgraaf / Turfkoelen. IBRAHYM grondwatermodel effectberekening. Rapportnummer 335652. Grontmij Nederland B.V., Arnhem. 7 april 2014.
- Laperre R., Balen van R., 2016. VU veldonderzoek 2016 Peelrandbreuk bij de Venbeek.
- Provincie Limburg, 2013. Verslaglegging OGOR-meetnet 2011 en 2012. 48 gebieden TOP-lijst verdrogingsbestrijding Limburg. September 2013.
- Sweco, 2018. Effectbepaling vernattingsmaatregelen Herkenboscherbroek. Projectnummer 361873. Referentienummer SWNL0226012. Sweco Nederland B.V. 18 mei 2018.
- TNO, 2019a. GeoTOP Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg. TNO, 2019.
- TNO, 2019b. H3O-ROSE. De grensoverschrijdende kartering van de Roerdalslenk.
- TNO, 2019c. Totstandkomingsrapport hydrogeologisch model (REGIS II). Rapport TNO R11654. TNO, 6 december 2019.
- Waterschap Limburg en Provincie Limburg, 2020. Limburgse Integrale Watersysteemanalyse (LIWA). Sweco en Royal HaskoningDHV in opdracht van Waterschap Limburg. I-Report <http://rhk.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=2d8498eea245436c969686fd41aba93c>
- Wit, K.E., Rees van, E., Wijnsma. M (mei 1985). Geohydrologisch onderzoek in de omgeving van Herkenbosch (COAL publikatie nr. 19. ICW nota 1624 (<https://edepot.wur.nl/209921>)).

Bijlage 1: Tabellen t.b.v. onderbouwing schematisatie ondergrond

Tabel 1: Koppeltabel H3O Rose aan REGIS

	REGIS		H3O Rose	
Formatie	TOP-naam	BOT-naam	TOP naam	BOT naam
hlc	hlc-t-ck	hlc-b-ck	H3OROSE_NTC_T_C	H3OROSE_NTC_B_C
bxz2	bxz2-t-ck	bxz2-b-ck	H3OROSE_BXZ2_T_C	H3OROSE_BXZ2_B_C
bez1	bez1-t-ck	bez1-b-ck	H3OROSE_MTz1_T_C	H3OROSE_MTz1_B_C
stz1	stz1-t-ck	stz1-b-ck	H3OROSE_JHz1_T_C	H3OROSE_JHz1_B_C
stk1	stk1-t-ck	stk1-b-ck	H3OROSE_JHk1_T_C	H3OROSE_JHk1_B_C
stz2	stz2-t-ck	stz2-b-ck	H3OROSE_JHz2_T_C	H3OROSE_JHz2_B_C
syz2	syz2-t-ck	syz2-b-ck	H3OROSE_AHz2_T_C	H3OROSE_AHz2_B_C
syk2	syk2-t-ck	syk2-b-ck	H3OROSE_AHk2_T_C	H3OROSE_AHk2_B_C
syz3	syz3-t-ck	syz3-b-ck	H3OROSE_AHz3_T_C	H3OROSE_AHz3_B_C
syk3	syk3-t-ck	syk3-b-ck	H3OROSE_AHk3_T_C	H3OROSE_AHk3_B_C
syz4	syz4-t-ck	syz4-b-ck	H3OROSE_AHz4_T_C	H3OROSE_AHz4_B_C
pzwaz3	pzwaz3-t-ck	pzwaz3-b-ck	H3OROSE_PZWAZ3_T_C	H3OROSE_PZWAZ3_B_C
kik1	kik1-t-ck	kik1-b-ck	H3OROSE_KIK1_T_C	H3OROSE_KIK1_B_C
kiz2	kiz2-t-ck	kiz2-b-ck	H3OROSE_KIZ2_T_C	H3OROSE_KIZ2_B_C
kik2	kik2-t-ck	kik2-b-ck	H3OROSE_KIK2_T_C	H3OROSE_KIK2_B_C
kiz3	kiz3-t-ck	kiz3-b-ck	H3OROSE_KIZ3_T_C	H3OROSE_KIZ3_B_C
kik3	kik3-t-ck	kik3-b-ck	H3OROSE_KIK3_T_C	H3OROSE_KIK3_B_C
kiz4	kiz4-t-ck	kiz4-b-ck	H3OROSE_KIZ4_T_C	H3OROSE_KIZ4_B_C
kik4	kik4-t-ck	kik4-b-ck	H3OROSE_KIK4_T_C	H3OROSE_KIK4_B_C
kiz5	kiz5-t-ck	kiz5-b-ck	H3OROSE_KIZ5_T_C	H3OROSE_KIZ5_B_C
iek1	iek1-t-ck	iek1-b-ck	H3OROSE_IEK1_T_C	H3OROSE_IEK1_B_C
iez2	iez2-t-ck	iez2-b-ck	H3OROSE_IEZ2_T_C	H3OROSE_IEZ2_B_C
iek2	iek2-t-ck	iek2-b-ck	H3OROSE_IEK2_T_C	H3OROSE_IEK2_B_C
iez3	iez3-t-ck	iez3-b-ck	H3OROSE_IEZ3_T_C	H3OROSE_IEZ3_B_C
brz1	brz1-t-ck	brz1-b-ck	H3OROSE_BRZ1_T_C	H3OROSE_BRZ1_B_C

Tabel 2: Koppeltabel Ibrahim v2 aan REGIS

	REGIS		Ibrahim v2	
Formatie	TOP-naam	BOT-naam	TOP naam	BOT naam
bxz2	bxz2-t-ck	bxz2-b-ck	TOP_I1	BOT_I1
bxx1	bxx1-t-ck	bxx1-b-ck	BOT_I1	TOP_I2
bez1	bez1-t-ck	bez1-b-ck	TOP_I2	BOT_I2
bek1	bek1-t-ck	bek1-b-ck	BOT_I2	TOP_I3
bez2	bez2-t-ck	bez2-b-ck	TOP_I3	BOT_I3
bek2	bek2-t-ck	bek2-b-ck	BOT_I3	TOP_I4
bez3	bez3-t-ck	bez3-b-ck	TOP_I4	BOT_I4
stz1	stz1-t-ck	stz1-b-ck	TOP_I5	BOT_I5
stk1	stk1-t-ck	stk1-b-ck	BOT_I5	TOP_I6
stz2	stz2-t-ck	stz2-b-ck	TOP_I6	BOT_I6
syz1	syz1-t-ck	syz1-b-ck	TOP_I7	BOT_I7
syk1	syk1-t-ck	syk1-b-ck	BOT_I7	TOP_I8
syz2	syz2-t-ck	syz2-b-ck	TOP_I8	BOT_I8
syk2	syk2-t-ck	syk2-b-ck	BOT_I8	TOP_I9
syz3	syz3-t-ck	syz3-b-ck	TOP_I9	BOT_I9
syk3	syk3-t-ck	syk3-b-ck	BOT_I9	TOP_I10
syz4	syz4-t-ck	syz4-b-ck	TOP_I10	BOT_I10
wak2	wak2-t-ck	wak2-b-ck	BOT_I10	TOP_I11
pzwaz3	pzwaz3-t-ck	pzwaz3-b-ck	TOP_I11	BOT_I11
kiz1	kiz1-t-ck	kiz1-b-ck	TOP_I12	BOT_I12
kik1	kik1-t-ck	kik1-b-ck	BOT_I12	TOP_I13
kiz2	kiz2-t-ck	kiz2-b-ck	TOP_I13	BOT_I13
kik2	kik2-t-ck	kik2-b-ck	BOT_I13	TOP_I14
kiz3	kiz3-t-ck	kiz3-b-ck	TOP_I14	BOT_I14
kik3	kik3-t-ck	kik3-b-ck	BOT_I14	TOP_I15
kiz4	kiz4-t-ck	kiz4-b-ck	TOP_I15	BOT_I15
iek1	iek1-t-ck	iek1-b-ck	BOT_I15	TOP_I16
iez2	iez2-t-ck	iez2-b-ck	TOP_I16	BOT_I16
iek2	iek2-t-ck	iek2-b-ck	BOT_I16	TOP_I17
iez3	iez3-t-ck	iez3-b-ck	TOP_I17	BOT_I17
brz1	brz1-t-ck	brz1-b-ck	BOT_I17	BOT_I19

Tabel 3: k-waarden H3O Rose

REGIS-brondata	k-waarden (m/d) voor H3O Rose	
REGIS-laag	kh-waarde (m/d)	kv-waarde (m/d)
hlc	1	0.01
bxz2	5.3	
bxx1		0.008
bxz3	5.1	
bxz4	5.2	
bez1	99	
bek1		0.016
bez2	127	
bek2		0.023
bez3	127	
stz1	65	
stk1		0.035
stz2	69	
syz1	10	
syk1		0.042
syz2	14	
syk2		0.047
syz3	13	
syk3		0.014
syz4	12	
wak1		0.0008
pzwaz2	25	
wak2		0.011
pzwaz3	36	
pzwaz4	40	
kiz1	32	
kik1		0.0005
kiz2	38	
kik2		0.0007
kiz3	47	
kik3		0.0006
kiz4	40	
kik4		0.001
kiz5	43	
iek1		0.0003
iez2	40	
iek2		0.0002
iez3	38	
brz1	3.7	

Tabel 4: Vertaling naar modellagen (mapping)

Name	Roerdalslenk	Peelhorst en tussen Peelrandbreuk en Mijnwegstroing
Antopogeen	1	1
Holoceen uit REGIS (buiten aandachtsgebied) bovenste 50%	1	1
Boxtel Singraven (aandachtsgebied) bovenste 50%	1	
Holoceen uit REGIS (buiten aandachtsgebied) onderste 50%	-1	-1
Boxtel Singraven (aandachtsgebied) onderste 50%	-1	
BXWIKO_s1	2	2
BXDEKO_s1	2	2
bxz2	2	2
BXWIKO_s2	-2	-2
BXDEKO_s2	-2	-2
bxk1	-2	-2
BXz_geotop_s1	3	3
BXz_geotop_s2	-3	-3
bxz3	4	3
bxz4	4	3
bez1	4	3
bek1	-4	-3
bez2	5	3
bek2	-5	-3
bez3	6	3
stz1	7	3
stk1	-7	-3
stz2	8	4
syz1		4
syk1	-8	-4
syz2	9	5
syk2	-9	-5
syz3	10	6
syk3	-10	-6
syz4	11	7
pzwaz2	12	
wak2	-12	
pzwaz3	13	7
kiz1	14	7
kik1	-14	-7
kiz2	15	8
kik2	-15	-8
kiz3	16	9
kik3	-16	-9
kiz4	17	10
kik4	-17	-10
kiz5	18	11
iek1	-18	-11
iez2	19	12
iek2	-19	-12
iez3	20	13
brz1_s1		14
brz1_s2		15
brz1_s3		16
brz1_s4		17
brz1_s5		18
brz1_s6		19
brz1_s7		20