

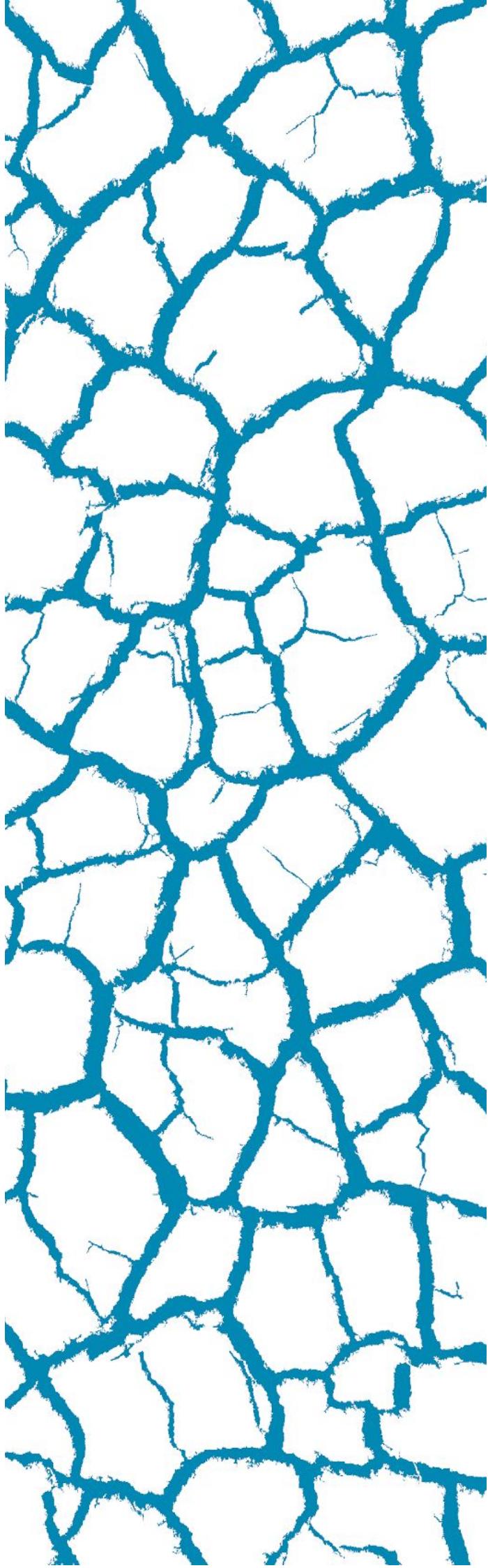


WATER RESEARCH UNLIMITED

## Bouwsteen Oppervlaktewater

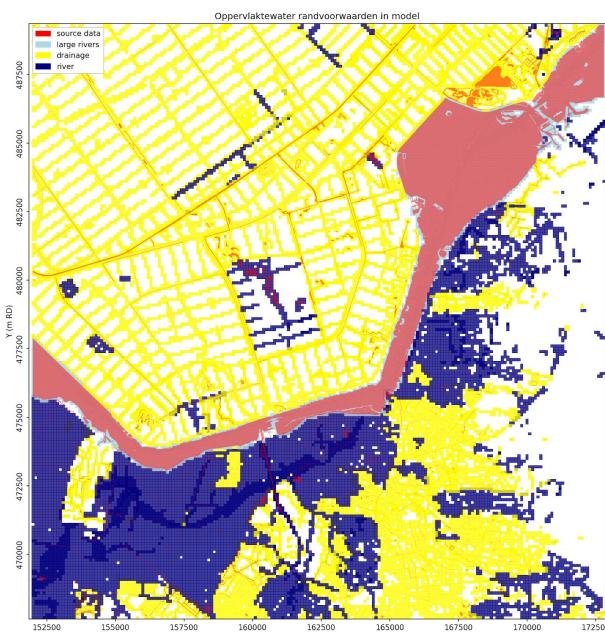
---

*Utrechts Grondwatermodel*



## Bouwsteen Oppervlaktewater

*Utrechts Grondwatermodel*



**Opdrachtgever:**

**Vitens**

**Projectnummer:**

**19.49.39**

**Datum:**

**9 oktober 2020**

**Auteur(s):**

**David Brakenhoff (Artesia)**

**Daniel Tollenaar (D2Hydro)**

**Borging:**

**Ruben Caljé (Artesia)**

**Siebe Bosch (Hydroconsult)**

© 2020 Artesia B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

## Inhoud

<b>1 Inleiding .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Ophalen en validatie oppervlaktewatergegevens .....</b>	<b>6</b>
2.1 Samenvoegen GIS-bestanden .....	6
2.2 Voorbereiden voor MODFLOW en datavalidatie .....	8
2.2.1 Validatie peilen (ZP/WP) .....	8
2.2.2 Validatie bodemhoogte (BL) .....	9
2.2.3 Bodembreedte (BB) .....	9
2.2.4 Resultaat-bestanden .....	9
<b>3 Invoerdata voor grondwatermodellen .....</b>	<b>10</b>
3.1 Watervlakken .....	10
3.2 Waterlijnen .....	11
3.3 Bathymetrie .....	11
3.4 AHN .....	11
3.5 REGIS .....	12
3.6 Tijdreeksen stijghoogte .....	12
3.7 Tijdreeksen oppervlaktewaterpeil .....	12
<b>4 Omzetten oppervlaktewater naar MODFLOW 6 invoer .....</b>	<b>13</b>
4.1 Methode ‘individueel’ versus ‘geaggregereerd’ .....	13
4.1.1 Individueel .....	13
4.1.2 Geaggregereerd .....	14
4.2 Categorieën oppervlaktewater .....	15
4.2.1 Grote rivieren en meren onder beheer Rijkswaterstaat .....	16
4.2.2 Overig oppervlaktewater .....	16
4.2.2.1 Voorbewerking overige plassen en meren met bathymetrie .....	16
4.2.2.2 Voorbewerking oppervlaktewater met bodemhelling .....	16

4.2.2.3 Oppervlaktewater met en zonder mogelijkheid tot wateraanvoer .....	17
4.2.3 Niet verwerkt .....	17
<b>5 Toetsing met grondwatermodellen .....</b>	<b>18</b>
5.1 Opbouw grondwatermodellen .....	19
5.1.1 Bodemopbouw .....	19
5.1.2 Begin- en randvoorwaarden .....	19
5.1.3 Grondwateraanzetting .....	20
5.1.4 Tijdsafhankelijk of stationair .....	20
5.1.5 Overzicht Modflow 6 packages .....	20
5.2 Resultaten .....	20
5.2.1 Rekentijden .....	20
5.2.2 Nijkerk (individueel vergeleken met geaggregeerd) .....	21
5.2.3 Heel gebied (geaggregeerd) .....	24
<b>6 Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>28</b>
<b>7 Referenties .....</b>	<b>29</b>
<b>Bijlage 1 – Conductance volgens methode De Lange .....</b>	<b>30</b>
Negatieve conductances .....	31
<b>Bijlage 2 – Rapport verwerking oppervlaktewater gegevens .....</b>	<b>33</b>
<b>Bijlage 3 – Datavalidatie oppervlaktewater .....</b>	<b>54</b>

# 1 Inleiding

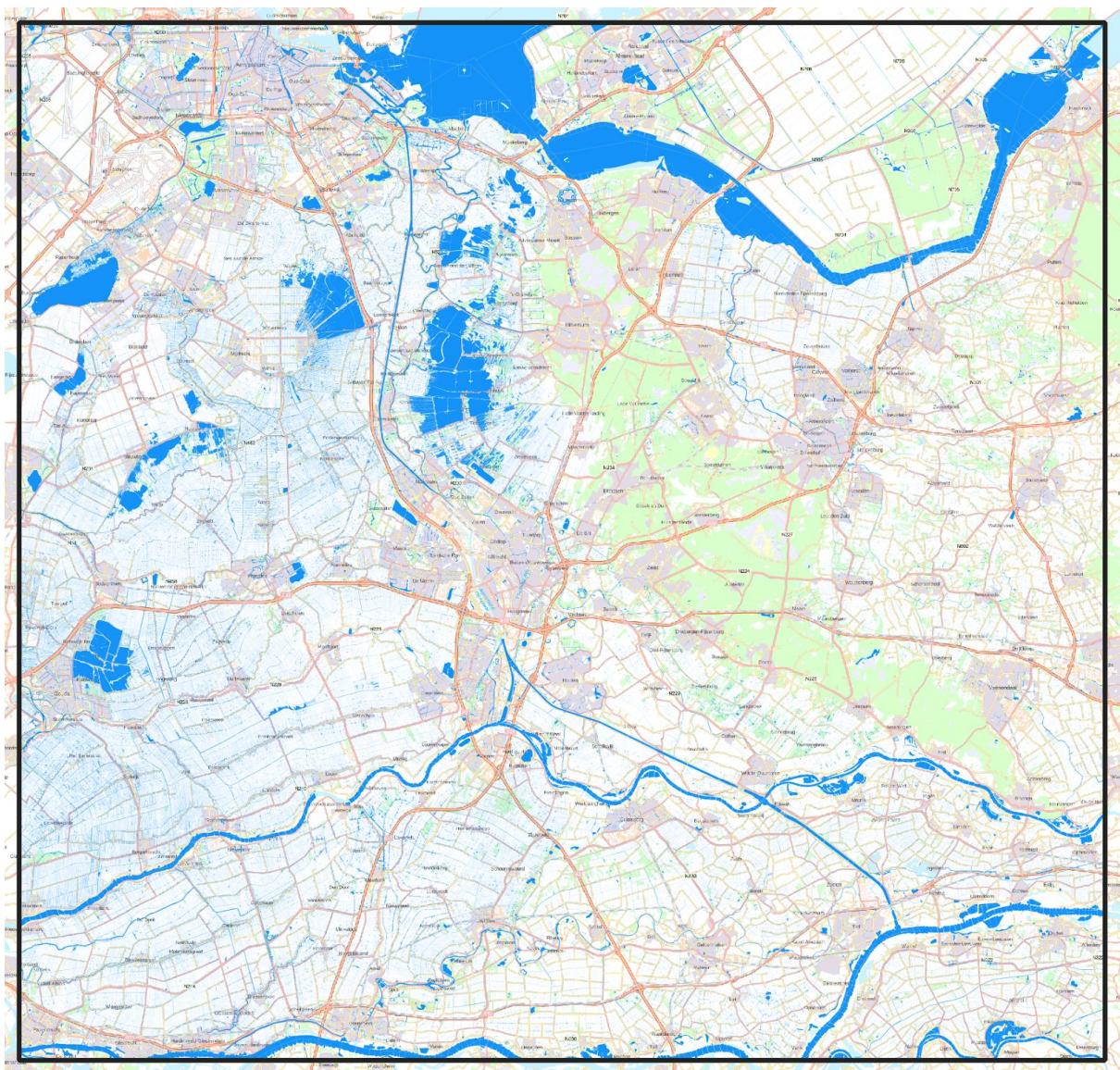
Vitens, Provincie Utrecht en Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden maken een grondwaterinstrumentarium voor de provincie Utrecht. In het kader van dat project is een toolbox ontwikkeld voor het omzetten van oppervlaktewater naar invoer voor een grondwatermodel. Deze "bouwsteen" bestaat uit Python scripts, waarmee vanuit brondata, afhankelijk van de gekozen periode en celgrootte de benodigde MODFLOW-packages gemaakt worden. Het interessegebied is weergegeven de kaart op de volgende bladzijde. Binnen dit project zijn Python scripts ontwikkeld om voor een willekeurige selectie uit dit gebied en voor een willekeurige periode invoerbestanden te genereren voor een MODFLOW 6 model. Deze bouwsteen bestaat uit twee componenten:

1. Het verwerken van bronbestanden met betrekking tot oppervlaktewater tot een dataset met alle relevante informatie voor het grondwatermodel.
2. Het vertalen van deze dataset naar invoer voor een MODFLOW grondwatermodel voor een willekeurig gebied (binnen het interessegebied) met een willekeurige gridgrootte.

In de eerste stap worden bestanden aangemaakt die alle relevante informatie bevatten met betrekking tot oppervlaktewater binnen het interessegebied. Er is zoveel mogelijk aangesloten op bestaande online databronnen, maar er zijn ook handmatige stappen gemaakt om gegevens te kunnen gebruiken. Dit omdat bepaalde datasets met elkaar conflicteren of omdat gegevens niet digitaal beschikbaar waren. De herkomst van de gegevens, inclusief de benodigde handmatige stappen zijn beschreven in hoofdstuk 2. Een belangrijk onderdeel van deze stap is de validatie van de gegevens. Daarin wordt o.a. getoetst of de peilen, bodemhoogte en bodembreedte hydrologisch plausibel zijn. Het resultaat van de validatie kan visueel geïnspecteerd worden op kaart.

In de tweede stap wordt de uitkomst van stap 1 (een bestand met alle relevante informatie m.b.t. het oppervlaktewater) verwerkt tot invoer voor een MODFLOW grondwatermodel. Daarin worden verschillende categorieën oppervlaktewater onderscheiden en ieder op een eigen manier verwerkt tot een randvoorwaarde voor in het model. De verschillende categorieën zijn: oppervlaktewater dat water kan aanvoeren (kan infiltreren), oppervlaktewater dat alleen drainerend werkt, oppervlaktewater waarvoor bathymetrische informatie beschikbaar is, en hellende waterlopen. De resulterende modelinvoer is getest met behulp van modellen van bepaalde gebieden met verschillende gridgroottes.

De code en scripts die zijn beschreven in dit rapport zijn beschikbaar via Github (Brakenhoff, 2020). De link naar de code is opgenomen in de referenties.



*Figuur 1 – Interessegebied en watervlakken*

In hoofdstuk 2 is het inlezen en de validatie van de gegevens beschreven. In hoofdstuk 3 is beschreven welke data benodigd is voor de omzetting van het oppervlaktewater naar een grondwatermodel. In hoofdstuk 4 zijn de verschillende methodes beschreven waarmee verschillende categorieën oppervlaktewater omgezet worden naar modelinvoer. In hoofdstuk 5 zijn de resultaten opgenomen van de testmodellen. Daarbij zijn automatisch grondwatermodellen gegenereerd voor verschillende gebieden met verschillende gridgroottes. In hoofdstuk 6 zijn tenslotte de conclusies en aanbevelingen opgenomen.

## 2 Ophalen en validatie oppervlaktewatergegevens

In dit project combineren we de oppervlaktewatergegevens van zeven waterschappen met die van Rijkswaterstaat tot een uniforme gevalideerde basisdataset voor MODFLOW. Naast Rijkswaterstaat zijn ontsloten: Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden, Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard en de waterschappen Rijnland, Rivierenland, Vallei en Veluwe, Waternet en Zuiderzeeland.

Een gebiedsdekkende set watervlakken vormt de basis van de samengevoegde basisdataset. Deze vlakken zijn voor het Hoogheemraadschap van Rijnland direct beschikbaar, en voor de overige waterschappen en Rijkswaterstaat gebruiken we de Basisregistratie Grootchalige Topografie (BGT). Van alle waterschappen voegen we tevens de peilvakken uit de vigerende peilbesluiten samen evenals de aslijnen van de waterlopen. Relevante kenmerken voor de bouw van MODFLOW modellen voegen we toe aan de watervlakken vanuit de ruimtelijk overlappende aslijnen en peilvakken. Wanneer er in de aslijnen een helling beschikbaar is, uitgedrukt in bovenstroomse en benedenstroomse bodemhoogte, dan worden deze ook beschikbaar gesteld voor de bouw van MODFLOW-modellen.

Deze methode is schaalbaar opgezet, waardoor ook andere waterschappen in de toekomst relatief eenvoudig aangesloten kunnen worden.

### 2.1 Samenvoegen GIS-bestanden

Binnen dit project onderscheiden we de volgende gegevensbronnen:

- ArcREST services. De meeste waterschappen publiceren via deze route de legger en peilbesluiten online
- Web Feature Services. Vergelijkbaar met ArcREST services. Bijvoorbeeld [HyDAMO](#) is via deze route online beschikbaar
- Basisregistratie Grootchalige Topografie (BGT). Deze ontsluiten we via een specifieke API ontwikkeld door PDOK voor het ophalen van BGT-gegevens: <https://download.pdok.io/lv/bgt/viewer/>.
- Web Coverage Service (WCS). Via de WCS van PDOK downloaden we het digitaal terrein model van het Actueel Hoogtebestand Nederland 3 (AHN3)
- Lokale bestanden. Alle gegevens die (nog) niet beschikbaar zijn via het web, worden lokaal ingelezen via een GIS-formaat. Dit zijn vooralsnog GeoTiffs, GMLs en ESRI-shapefiles)

Een aantal bronbestanden betreft door ons met scripts bewerkte gegevens. Het gaat hier om:

- Administratieve eenheden van waterschappen en Rijkswaterstaat, waarbij we overlappende delen hebben weggesneden
- De basisdata voor Flevoland, waar de gegevens niet meer digitaal beschikbaar waren
- Bodemhoogtes Rivierenland, waar deze bodemhoogtes niet op een watervlak of aslijn beschikbaar zijn.

Deze bewerkingen zijn in meer detail uitgewerkt in bijlage 2

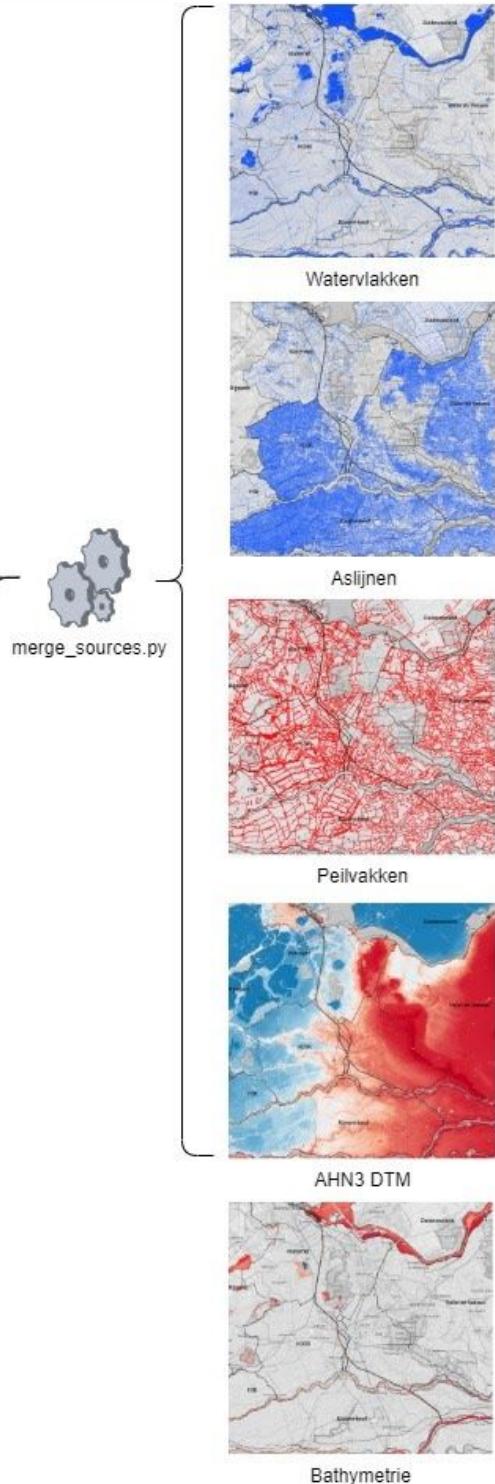
Via Python-code (*merge\_sources.py*) worden de gegevensbronnen samengevoegd tot een aantal uniforme GIS-bestanden (ESRI-shapefiles):

- watervlakken (*water\_areas.shp*)
- aslijnen van de waterloop (*water\_lines.shp*)
- peilvakken (*water-level\_areas.shp*)
- ahn3 DTM (*ahn3\_5m\_dtm.tif*)

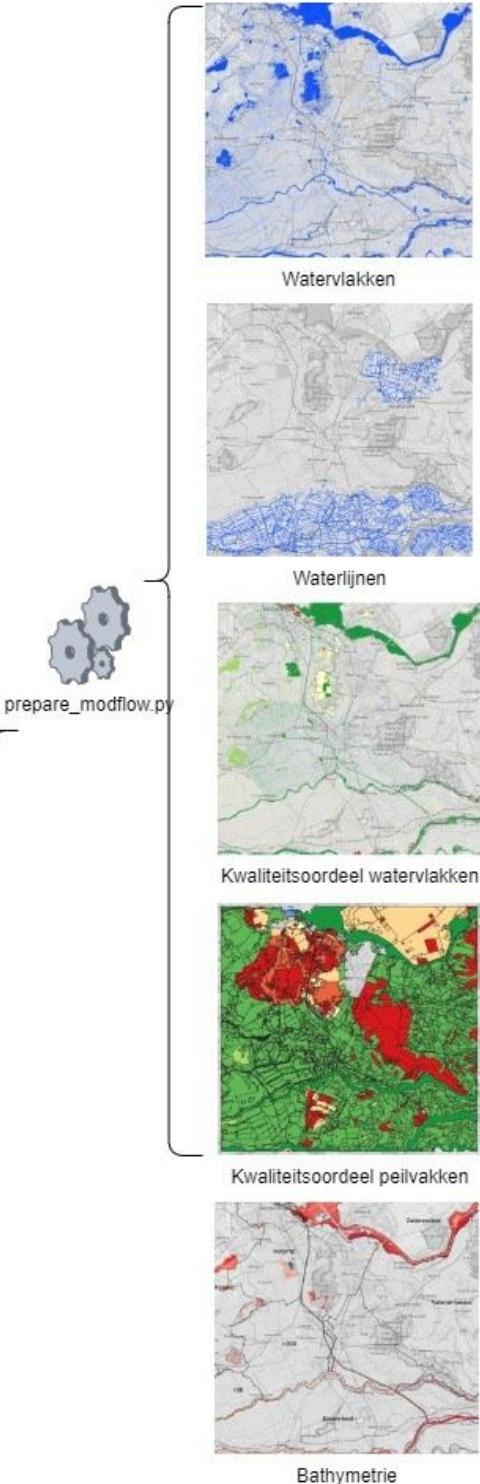
### Gegevensbronnen

- ArcREST/WFS services
- BGT (PDOK/NGR)
- AHN (PDOK/NGR)
- Lokale bestanden

### Uniforme GIS-bestanden



### Basis-invoer voor ModFLOW



Figuur 2 – workflow ophalen en valideren oppervlakte-data

Het uniformeren van deze data gebeurd in twee stappen:

1. De data van de specifieke bron wordt uitgesneden voor de bijbehorende administratieve eenheid (waterschap of rijkswaterstaat). De uitzondering hierop is de BGT en de AHN. De BGT wordt in een keer gedownload voor alle administratieve eenheden, met uitzondering van Rijnland, waar de watervlakken inclusief relevante parameters online beschikbaar zijn. Het AHN wordt in een keer gedownload voor het hele projectgebied.
2. De attribuutnamen worden geuniformeerd. Bijvoorbeeld: attribuutnaam *BODEMBREEDTE* uit de legger van Rijnland en attribuutnaam *IWS\_W\_BODBR* uit de hydro-objecten van HDSR worden beiden hernoemd naar de attribuutnaam BB (Bodembreedte) welke wordt gebruikt in het uniforme GIS-bestand.

De bewerkingen staan meer gedetailleerd uitgewerkt in bijlage 2.

## 2.2 Voorbereiden voor MODFLOW en datavalidatie

Het voorbereiden van de data voor MODFLOW en de datavalidatie worden tegelijk uitgevoerd. Zowel het voorbereiden als het valideren in hydrologische context vereist het combineren van verschillende hydrologische parameters.

De voorbereiding voor MODFLOW en validatie (*prepare\_modflow.py*) wordt in de volgende stappen uitgevoerd:

1. De peilen in de peilvakken worden gevalideerd op onderlinge consistentie en relatieve hoogte ten opzichte van het maaiveld. Wanneer een peil niet valide is, wordt deze geschat uit de maaiveldhoogte (zie Validatie peilen hieronder).
2. De attributen van de gevalideerde peilvakken en van de aslijnen worden met een spatial join toegevoegd aan de watervlakken. Wanneer meerdere aslijnen of peilvakken een watervlak doorkruisen wordt gekeken welke aslijn of peilvak de grootste lengte (aslijn) of het grootste oppervlak (peilvak) heeft binnen het watervlak,. Op dezelfde manier wordt gekeken of watervlakken de [bathymetrie](#)-data doorkruisen.
3. De watervlakken worden nu gevalideerd door de peilen, het maaiveld en de bodemhoogtes met elkaar te vergelijken (zie onderstaande stappen). Ongeldige data wordt weer opgevuld met schattingen.
4. Het waterlijnenbestand wordt opgeruimd. Alleen wanneer er een bovenstroomse (BLU) en benedenstroomse (BLD) bodemhoogte beschikbaar is, worden deze lijnen bewaard en gebruikt als data voor MODFLOW.

De bewerkingen staan meer gedetailleerd uitgewerkt in bijlage 2.

De volgende validatiecriteria worden gehanteerd in de verschillende validatie stappen:

### 2.2.1 Validatie peilen (ZP/WP)

Voor peilen worden de volgende controles uitgevoerd:

1. is peil > 50% maaiveld in peilvak, dan twijfelachtig: melding in validatie-shape
2. is peil > 90% maaiveld in peilvak, dan is deze zeker fout en wordt deze verwijderd
3. is zomerpeil < winterpeil, dan is de data twijfelachtig: melding in validatie-shape

Missende of verwijderde zomerpeilen (ZP) of winterpeilen (WP) worden als volgt ingevuld relatief ten opzichte van mediaan maaiveld (Z)

- ZP = Z - 0.5
- WP = Z - 0.7

## 2.2.2 Validatie bodemhoogte (BL)

De bodemhoogte (BL) wordt gevalideerd aan de mediaan van het maaiveld geldend voor het peilvak (Z), winterpeil (WP) en zomerpeil (ZP). De uitkomsten van de validatie zijn afhankelijk van de categorie van de watergang

1. is de categorie 1 hoofdwater, dan dient de bodemhoogte lager te zijn dan het winterpeil en het zomerpeil ( $BL < WP < ZP$ ). Zo niet, dan is deze onwaarschijnlijk en wordt deze verwijderd.
2. is de categorie onbekend of 2;
  - a.  $BL < Z$ , zo niet, dan wordt deze verwijderd
  - b.  $BL < WP < ZP$ . Zo niet, dan is de waterloop niet van categorie 2, maar categorie 3 (droge sloot)

Missende of verwijderde bodemhoogtes (BL) worden als volgt ingevuld relatief ten opzichte van winterpeil (WP), wanneer er een waterdiepte (WD) bekend is:

- $BL = WP - WD$

Wanneer waterdiepte niet bekend is, óf de berekening met waterdiepte ook geen valide bodemhoogte oplevert:

- $BL = WP - 1.5$ , wanneer de categorie waterloop = 1 (hoofdwaterloop/primaire waterloop, A-waterloop, ... afhankelijk van het waterschap)
- $BL = WP - 0.3$ , wanneer categorie > 1 (overige watergangen)

## 2.2.3 Bodembreedte (BB)

Bodembreedte (BB) wordt gevalideerd aan een plausibel minimum en het geometrisch oppervlak (A):

1.  $BB > 0.5$ , anders verwijderen
2.  $BB < A / \pi$

Ontbrekende bodembreedtes worden niet aangevuld

## 2.2.4 Resultaat-bestanden

Het voorbereiding script levert de volgende ESRI-shapefiles:

- **waterareas.shp**: het bestand met de watervlakken en bijbehorende attributen zoals beschreven in het hoofdstuk [data](#).
- **waterareas\_verdict.shp**: het oordeel over de parameters uit het bestand **waterareas.shp**
- **waterlines.shp**: het bestand met de aslijnen wanneer er een beneden- en bovenstroomse bodemhoogte bekend is
- **water-levelareas\_verdict.shp**: het oordeel over de peilen

De resultaten van de oordeel-shapes staan in Bijlage 3.

### 3 Invoerdata voor grondwatermodellen

In dit hoofdstuk is de invoerdata beschreven voor het grondwatermodel. In onderstaande tabel is een kort overzicht gepresenteerd van de benodigde gegevens met daarin het bestands formaat, de bron en een korte omschrijving van de inhoud.

Data	Bestandstype	Bron	Omschrijving
Watervlakken	Shapefile	Script	Polygonen van al het oppervlaktewater
Waterlijnen	Shapefile	Script	Lijnen met een helling voor bepaalde waterlopen
AHN	Raster (Geotiff)	Online	Maaiveldhoogte
Bathymetrie	Raster (Geotiff)	Handmatige downloads/ opvraging	Bodemdiepte van grote waterlopen
REGIS	NetCDF	Online	(hydro)geologische informatie over de bodem
Stijghoogte tijdreeksen	CSV	Online	Tijdreeksen van grondwaterstand en stijghoogte vanuit DINOloket
Waterstand tijdreeksen	CSV	Online aanvraag	Tijdreeksen van waterstand voor de grotere waterlopen via WaterInfo.

#### 3.1 Watervlakken

De oppervlaktewatergegevens van de verschillende waterschappen zijn samengevoegd tot een shapefile met watervlakken met behulp van Python-scripts. De omschrijving van de stappen in deze scripts zijn opgenomen in hoofdstuk 2 of in meer detail in bijlage 2. De watervlakken shape is in figuur 1 weergegeven. Elk van deze watervlakken heeft bepaalde kenmerken die vanuit brondaten zijn opgehaald:

- **admin:** naam van de bronhouder van de data (b.v. Waterschap Vallei en Veluwe, RWS, etc.)
- **admin\_id:** nummer van de bronhouder
- **name:** naam van de waterloop, indien bekend
- **Z:** mediaan maaiveldhoogte van het peilgebied (m NAP)
- **ZP:** zomerpeil (m NAP)
- **WP:** zomerpeil (m NAP)
- **WD:** waterdiepte (m)
- **BL:** bodemhoogte (m NAP)
- **BB:** bodembreedte (m)
- **CAT:** categorie waterloop (1 = primair, 2=secundair/tertiair, 3=drooggallend)
- **SUB:** waternaam mogelijk ja (=1) of nee (=0)
- **has\_bath:** bathymetrische info beschikbaar voor dit watervlak? 1=ja, 0=nee
- **has\_slope:** helling van de bodembeschikbaar voor dit watervlak? 1=ja, 0=nee
- **src\_wa:** gegevensbron van het watervlak
- **src\_id\_wa:** bron-id van het watervlak
- **src\_wla:** gegevensbron van het peilvak

- **src\_id\_wla:** bron-id van het peilvak
- **src\_wl:** gegevensbron van de waterlijn
- **src\_id\_wl:** bron-id van de waterlijn

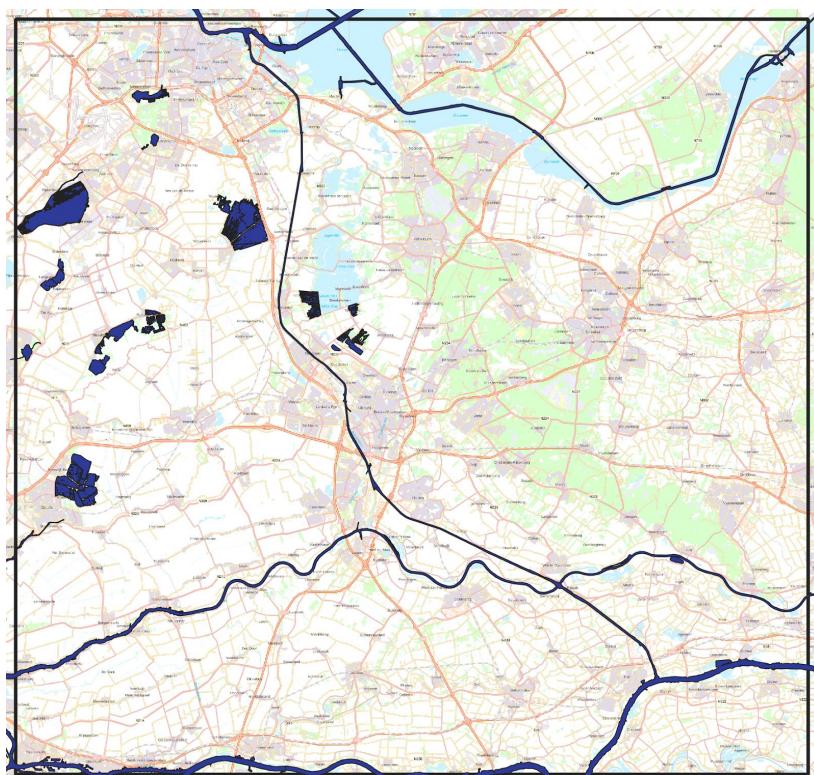
Met deze informatie worden de watervlakken opgedeeld in verschillende types oppervlaktewater en kan het oppervlaktewater omgezet worden naar MODFLOW invoer.

### 3.2 Waterlijnen

De waterlijnen shapefile bevat informatie over de helling van de bodemhoogte van waterlopen. Deze lijnen bevatten een referentie aan de watervlakken waaraan ze gekoppeld zijn. Verder bevatten ze een boven- en benedenstroomse bodemhoogte.

### 3.3 Bathymetrie

Bathymetrische informatie is beschikbaar als rasterdata. Via Rijkswaterstaat is bathymetrische informatie beschikbaar van de vaargeulen op de grote meren (Markermeer, IJsselmeer, Randmeren), en de grote rivieren. Voor plassen en meren is bathymetrische informatie beschikbaar vanuit Waternet en het Hoogheemraadschap Rijnland. In onderstaande figuur is aangegeven waar bathymetrische informatie beschikbaar is.



Figuur 3 – Locaties waar bathymetrische informatie beschikbaar is (donkerblauwe vlakken). Waar geen bathymetrische informatie beschikbaar is is gebruik gemaakt van het AHN indien beschikbaar en anders het maaiveld in REGIS.

### 3.4 AHN

Maaiveldhoogte van AHN3 wordt direct opgehaald (en lokaal opgeslagen) via de geodata portal van het Nationaal Georegister. Deze gegevens worden gebruikt voor het opvullen van de bathymetrie. Daar waar geen bathymetrie beschikbaar is wordt het AHN gebruikt om op te vullen.

### **3.5 REGIS**

Regis wordt automatisch gedownload als NetCDF via de OpenDAP portal van Dinoloket.

### **3.6 Tijdreeksen stijghoogte**

Tijdreeksen van de stijghoogte worden automatisch van DINOLoket gedownload.

### **3.7 Tijdreeksen oppervlaktewaterpeil**

Tijdreeksen van het oppervlaktewaterpeil moeten worden aangevraagd via de Waterinfo portal van Rijkswaterstaat.

## 4 Omzetten oppervlaktewater naar MODFLOW 6 invoer

In dit hoofdstuk is beschreven hoe het oppervlaktewater vanuit de beschikbare data omgezet wordt naar een randvoorwaarde voor een MODFLOW 6 model. Er zijn twee manieren om oppervlaktewater te vertalen naar modelinvoer: de individuele methode, of de geaggregeerde methode. In het eerste geval wordt elke waterloop afzonderlijk in het model opgenomen. In het tweede geval worden per gridcel representatieve parameters berekend (op meerdere manieren). In de invoer voor het grondwatermodel worden verschillende typen oppervlaktewater onderscheiden, afhankelijk van de hydrologische eigenschappen en de beschikbare gegevens. Per type waterloop en per parameter wordt een van deze methodes toegepast.

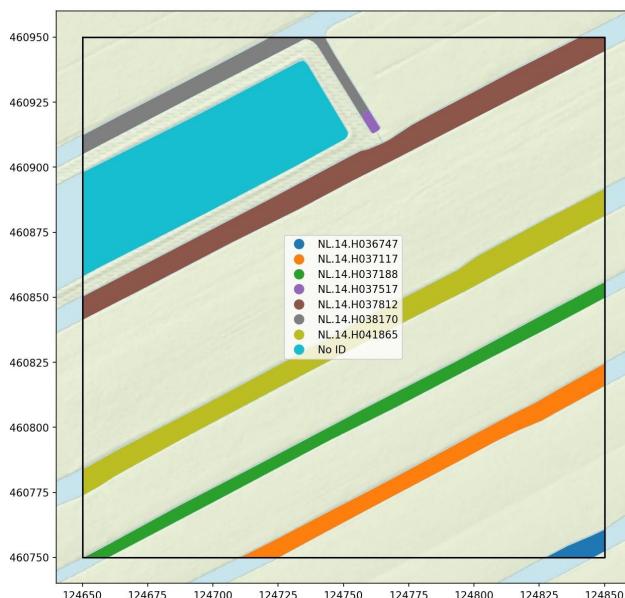
Eerst wordt het verschil tussen de twee methodes toegelicht. Vervolgens worden de verschillende types oppervlaktewater beschreven, waarbij per categorie wordt toegelicht hoe deze worden verwerkt tot modelinvoer.

### 4.1 Methode ‘individueel’ versus ‘geaggregeerd’

De watervlakken worden versneden met het modelgrid, zodat er een dataset ontstaat waarin voor elke gridcel bekend is welke waterlopen er in liggen. Dit kan bijvoorbeeld een sloot zijn, maar het kunnen ook meerdere stukjes van allerlei verschillende waterlopen zijn. Dit is de basis dataset waaruit de modelinvoer wordt gemaakt. Er worden twee methodes onderscheiden om waterlopen in een numeriek grondwatermodel op te nemen: individueel en geaggregeerd. De eerste methode is vooral geschikt voor kleinere modellen met fijne grids omdat elke waterloop individueel in het model wordt opgenomen. De tweede methode is vooral geschikt voor grotere modellen met grovere grids. Deze twee methodes worden in de volgende subparagrafen toegelicht.

#### 4.1.1 Individueel

In de eerste methode wordt elk stukje water individueel in het model opgenomen. Dit betekent dus dat elk stuk water vertegenwoordigd is in de modelinvoer. In een gridcel kunnen meerdere waterlopen aanwezig zijn, en voor elk van deze stukken oppervlaktewater worden de parameters (peil, conductance, en bodemniveau) meegegeven die gelden voor dat stuk oppervlaktewater. In onderstaande figuur is een gridcel weergegeven waar meerdere sloten in aanwezig zijn. Met de individuele methode wordt elke sloot (aangegeven met de verschillende vlakken) los opgenomen in het model.



Figuur 4 – voorbeeld oppervlaktewater in een gridcel

Met toepassing van de individuele methode voor deze gridcel zou de invoer van het oppervlaktewater eruit komen te zien zoals de lijst hieronder. De gridcel (ilay, irow, icol) is voor alle items hetzelfde maar het peil, de conductance en het bodemniveau kunnen per waterloop verschillen.

```
[[ (ilay, irow, icol), peil_1, conductance_1, bodemniveau_1],
 [(ilay, irow, icol), peil_2, conductance_2, bodemniveau_2],
 [(ilay, irow, icol), peil_3, conductance_3, bodemniveau_3],
 [(ilay, irow, icol), peil_4, conductance_4, bodemniveau_4],
 [(ilay, irow, icol), peil_5, conductance_5, bodemniveau_5],
 [(ilay, irow, icol), peil_6, conductance_6, bodemniveau_6],
 [(ilay, irow, icol), peil_7, conductance_7, bodemniveau_7],
 [(ilay, irow, icol), peil_8, conductance_8, bodemniveau_8]]
```

#### 4.1.2 Geaggregeerd

In de tweede methode wordt al het oppervlaktewater binnen een gridcel geaggregeerd. Dat wil zeggen dat er per gridcel een representatief peil, conductance en bodemhoogte wordt berekend zodat er per gridcel een representatieve randvoorwaarde wordt opgenomen. In het voorbeeld uit de vorige paragraaf zou de invoer voor MODFLOW er nu zo uit komen te zien:

```
[(ilay, irow, icol), repr_peil, repr_conductance, repr_bodemniveau]]
```

Er is dus voor elke gridcel maar één regel in de invoer met representatieve parameters die zijn afgeleid van de oorspronkelijke data. Deze representatieve parameters kunnen op verschillende manieren worden berekend. Er zijn drie methodes beschikbaar: 'max\_area', 'area\_weighted' en 'de\_lange'. Binnen deze methodes worden verschillende formules gebruikt om de parameters te bepalen (de naamgeving wil dus niet zeggen dat alle parameters op dezelfde manier worden berekend).

- 'max\_area':
  - **peil:** het grootste oppervlak binnen een gridcel bepaalt het peil
  - **cond:** conductance is wateroppervlak gedeeld door bodemweerstand
  - **rbot:** voor de bodemdiepte geldt de diepst gelegen waterbodem

- 'area\_weighted':
  - **peil:** er wordt een oppervlak-gewogen peil berekend
  - **cond:** conductance is wateroppervlak gedeeld door bodemweerstand
  - **rbot:** voor de bodemdiepte geldt de diepst gelegen waterbodem
- 'de\_lange':
  - **peil:** het grootste oppervlak binnen een gridcel bepaalt het peil
  - **cond:** conductance wordt berekend met de opschalingsformule van De Lange (Deltares, 2008)
  - **rbot:** voor de bodemdiepte geldt de diepst gelegen waterbodem

De opschalingsformule van De Lange voor de conductance is in bijlage 1 opgenomen.

## 4.2 Categorieën oppervlaktewater

In dit project zijn de volgende categorieën voor oppervlaktewater gedefinieerd:

- **Grote rivieren en meren onder beheer Rijkswaterstaat:** voor deze waterlopen of waterpartijen is bodemdiepte informatie beschikbaar in de vorm van rasters. Dit zijn de grotere waterlichamen (Markermeer, de Lek, etc.) die onder het beheer van Rijkswaterstaat vallen.
- **Overig oppervlaktewater:** categorie voor al het oppervlaktewater dat niet in bovenstaande categorie valt. Er vallen ook twee types oppervlaktewater in waarvoor een voorbewerkingsstap wordt uitgevoerd om alle benodigde informatie voor verwerking in het grondwatermodel te verzamelen. Het oppervlaktewater in deze categorie wordt verder opgedeeld volgens de mogelijkheid tot waternaanvoer.
  - **Categorieën met voorbewerking:** voor deze categorieën wordt een voorbewerkingsstap uitgevoerd voordat ze worden opgenomen in het grondwatermodel. Vervolgens wordt dit oppervlaktewater ook opgedeeld naar de mogelijkheid tot waternaanvoer.
    - **Overige plassen en meren met bathymetrie:** plassen en meren waarvoor bathymetrie beschikbaar is maar die niet onder het beheer van Rijkswaterstaat vallen. Dit zijn bijvoorbeeld plassen en meren die onder het beheer van de waterschappen vallen. Voor deze categorie wordt de bodemdiepte bepaald op basis van de bathymetrie data.
    - **Oppervlaktewater met bodemhelling:** voor sommige waterlopen is informatie over de bodemhelling beschikbaar via een lijnenbestand. Voor deze categorie wordt de bodemdiepte bepaald aan de hand van de bodemhelling in het lijnenbestand.
  - **Oppervlaktewater met waternaanvoer:** dit zijn waterlopen die in staat zijn om water aan te voeren. Deze waterlopen kunnen in droge periodes water infiltreren.
  - **Drainerend oppervlaktewater:** dit zijn waterlopen die alleen een drainerende werking hebben. Deze waterlopen kunnen "drooggallen" en infiltreren geen water in droge periodes.

Elk van deze categorieën wordt in het grondwatermodel verwerkt, maar de methode verschilt per categorie. Er zijn drie types randvoorwaarden in het uiteindelijke grondwatermodel:

- **GHB:** Grote rivieren en meren (beheer Rijkswaterstaat)
- **DRN:** Overig oppervlaktewater (drainerend)
- **RIV:** Overig oppervlaktewater (drainerend en infiltrerend)

De eerste categorie, oppervlaktewater met bathymetrie en onder beheer van Rijkswaterstaat wordt als GHB in het grondwatermodel opgenomen. Deze waterlopen kunnen niet drooggallen, het waterpeil ligt altijd boven de bodemdiepte van het oppervlaktewaterlichaam. Al het overige oppervlaktewater wordt via de andere twee randvoorwaarden opgenomen (RIV of DRN) afhankelijk van de mogelijkheid tot waternaanvoer. Indien de geaggregeerde methode gebruikt wordt, zal al het overige oppervlaktewater, bijvoorbeeld waterlopen met een helling, waterlopen met bathymetrie data en waterlopen die kunnen infiltreren, allemaal samengevoegd worden tot een randvoorwaarde per gridcel. Hieronder wordt de gehanteerde methode per categorie beschreven.

#### **4.2.1 Grote rivieren en meren onder beheer Rijkswaterstaat**

Deze categorie betreft oppervlaktewater waarvoor bathymetrische informatie beschikbaar is en dat onder het beheer van Rijkswaterstaat valt. Deze waterlopen worden altijd via de individuele methode aan het model toegevoegd omdat de waterlopen in deze categorie relatief groot zijn. Ze zijn in het MODFLOW model opgenomen als een vaste stijghoogte randvoorwaarde (General Head Boundary, of afgekort, GHB).

Het peil wordt bepaald aan de hand van interpolatie tussen de gemeten oppervlaktewaterstanden. Deze data kan gedownload worden via het Waterinfo portaal van Rijkswaterstaat. In een stationair model wordt het gemiddelde peil gebruikt in plaats van een tijdsreeks. De "conductance" van deze randvoorwaarde wordt bepaald door het oppervlakte van het water binnen een modelcel te delen door de bodemweerstand. Voor de bodemweerstand wordt standaard een waarde van 1 dag aangenomen. De bodemhoogte wordt alleen gebruikt om te bepalen aan welke modellagen het oppervlaktewater wordt toegevoegd.

Dit oppervlaktewater kan in de watervlakken shapefile geïdentificeerd worden met:

- het attribuut "src\_wla" is gelijk aan "rws\_krw" (Rijkswaterstaat is de beherende instantie)
- het attribuut "has\_bath" is gelijk aan 1 (bathymetrische informatie is beschikbaar)

#### **4.2.2 Overig oppervlaktewater**

Deze categorie oppervlaktewater bevat al het oppervlaktewater dat niet in de vorige categorie is opgenomen. Het oppervlaktewater in deze categorie wordt verder opgedeeld aan de hand van de mogelijkheid om water aan te voeren (en dus om water te infiltreren). Voor twee types oppervlaktewater wordt nog een voorbewerkingsstap uitgevoerd om de benodigde gegevens te berekenen. Deze stappen staan hieronder beschrijven.

##### **4.2.2.1 Voorbewerking overige plassen en meren met bathymetrie**

Deze categorie bevat al het oppervlaktewater waar bathymetrische informatie beschikbaar is dat niet onder beheer van Rijkswaterstaat valt. Voor deze categorie wordt in een voorbewerkingsstap eerst de bodemdiepte bepaald op basis van de bathymetrie. Vervolgens wordt dit oppervlaktewater verwerkt volgens dezelfde methode als al het overige oppervlaktewater.

De bodemdiepte wordt bepaald door in elke modelcel de minimale bodemdiepte per watervlak te bepalen. Binnen elke polygoon wordt de minimale waarde van het raster met bathymetrie data berekend. Deze berekende bodemdiepte worden toegevoegd aan de algemene dataset voor verdere verwerking in het model.

Deze categorie kan in de watervlakken shapefile geïdentificeerd worden met:

- het attribuut "has\_bath" gelijk is aan 1 (bathymetrische informatie is beschikbaar)
- het attribuut "src\_wla" is niet gelijk aan "rws\_krw" (Rijkswaterstaat is niet de beherende instantie)

##### **4.2.2.2 Voorbewerking oppervlaktewater met bodemhelling**

De informatie over de bodemhelling van bepaalde waterlopen is opgenomen in een losse lijnen shapefile. Elke lijn heeft een bovenstroomse en benedenstroomse bodemhoogte. Voor deze categorie wordt in een voorbewerkingsstap de bodemdiepte bepaald in elke gridcel van de waterlopen waar deze helling gedefinieerd is. Vervolgens wordt dit oppervlaktewater volgens dezelfde methode als het overige oppervlaktewater verwerkt tot modelinvoer.

Per gridcel en per polygoon wordt de bodemhoogte berekend op het middelpunt van de watervlakken (de zogenaamde 'centroid'). De bodemhoogte wordt berekend via interpolatie van de boven- en benedenstroomse bodemhoogte op het punt op de lijn die het dichtst bij het midden van het watervlak ligt.

Waterlopen met een bodemhelling zijn in de watervlakken shapefile aangegeven met:

- het attribuut "has\_slope" is gelijk aan 1 (lijnen shapefile met bodemhelling is beschikbaar)

#### **4.2.2.3 Oppervlaktewater met en zonder mogelijkheid tot wateraanvoer**

Al het overige oppervlaktewater wordt opgedeeld aan de hand van de mogelijkheid tot wateraanvoer. De verwerking van deze twee typen waterlopen (met of zonder wateraanvoer) is identiek, alleen de package waarmee ze aan MODFLOW worden toegevoegd is anders. De waterlopen met wateraanvoer worden via de River (RIV) package aan het model toegevoegd (met een bodemhoogte). De waterlopen zonder wateraanvoer worden via de Drain (DRN) package toegevoegd.

Daarbij wordt het oppervlaktewater uit de vorige twee categorieën, met bodemhelling en met bathymetrie maar niet onder beheer van Rijkswaterstaat, ook in deze stap verwerkt tot modelinvoer. Voor die categorieën is een voorbewerkingsstap uitgevoerd om de bodemdieptes te bepalen.

De gebruiker kan kiezen op welke manier dit oppervlaktewater verwerkt wordt in het model: met de "individuele" methode of de "geaggregeerde" methode. De opties zijn hier nogmaals kort opgesomd (zie paragraaf "methode 'individueel' versus 'geaggregeerd'" voor een uitgebreidere uitleg).

- **individueel:** elk watervlak wordt individueel aan het model toegevoegd.
- **geaggregeerd:** per gridcel 1 randvoorraarde met representatieve parameters. Er zijn verschillende opties voor de bepaling van de representatieve parameters:
  - 'max\_area': grootste oppervlak bepaalt peil
  - 'area\_weighted': oppervlak-gewogen peil
  - 'de\_lange': opschalingsformule van De Lange voor conductance

In de watervlakken shapefile kan het onderscheid tussen deze twee types oppervlaktewater (drainerend versus infiltrerend) gemaakt worden aan de hand van het 'SUB' attribuut. Bij een waarde van 1 is er sprake van wateraanvoer, bij een waarde van 0 is er geen mogelijkheid tot wateraanvoer.

#### **4.2.3 Niet verwerkt**

Door ontbrekende informatie kunnen sommige waterlopen niet verwerkt worden in het huidige script. Voor deze waterlopen is aanvullende data nodig om ze te kunnen verwerken. Er zijn in totaal 283.096 polygonen in de watervlakken shapefile. Van deze set kunnen er 5.112 (~2%) niet verwerkt worden in het grondwatermodel om onderstaande redenen. Er zit overlap tussen de categorieën die niet verwerkt kunnen worden.

- Er zijn 4.637 waterlopen waarvoor geen bodenniveau beschikbaar is in de watervlakken shapefile. Deze waterlopen worden niet in het model opgenomen omdat niet bepaald kan worden in welke modellaag deze moeten liggen.
- Er zijn 5.101 waterlopen die niet aan een peilgebied zijn gekoppeld. Dit kan komen doordat deze informatie ontbreekt of omdat er geen peilgebied is gedefinieerd op die locatie. Daardoor is er geen zomer/winterpeil bekend voor deze waterlopen en worden ze niet in het model opgenomen.

## 5 Toetsing met grondwatermodellen

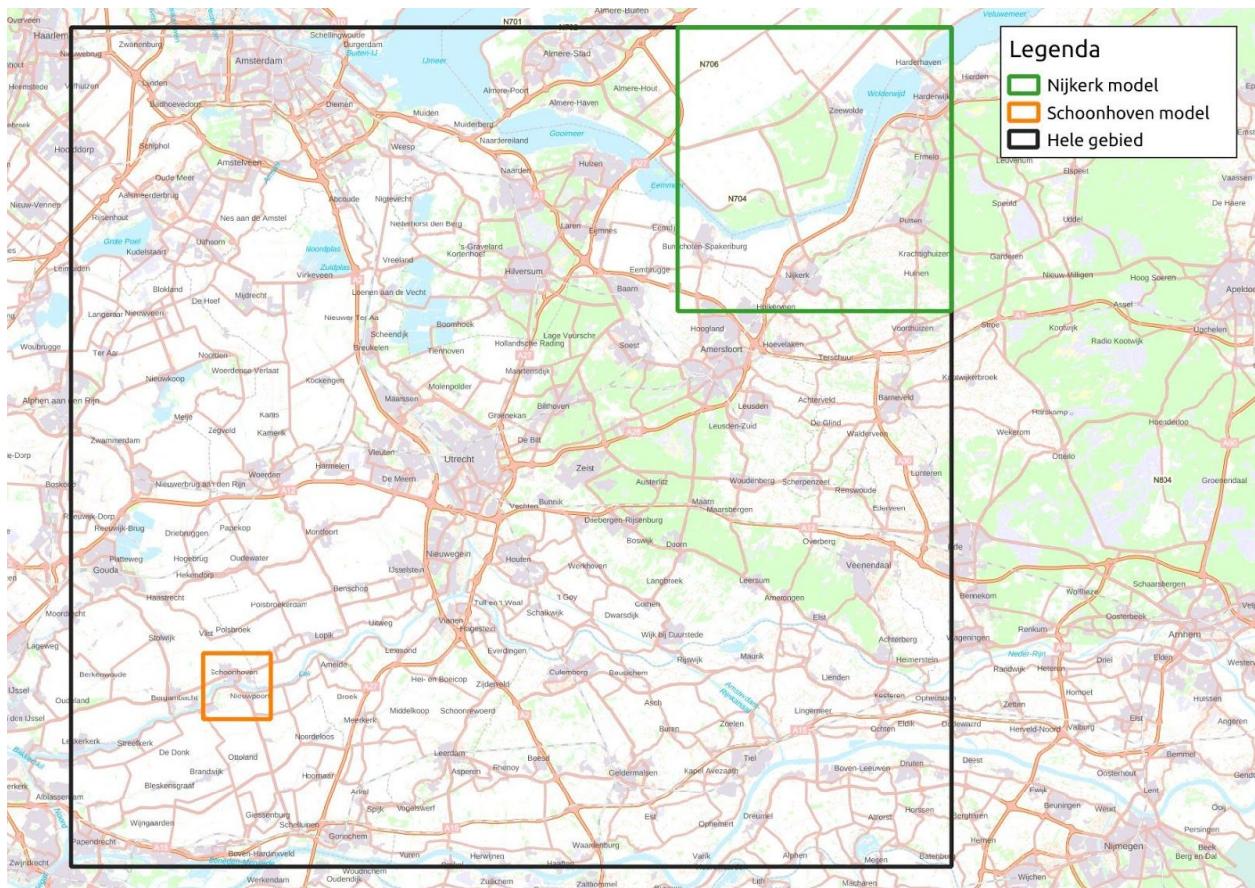
In dit hoofdstuk is beschreven hoe de grondwatermodellen zijn opgebouwd om de "bouwsteen oppervlaktewater" te testen en zijn de resultaten van enkele modellen opgenomen om de plausibiliteit van de resultaten te analyseren. Met behulp van de tools voor de omzetting van oppervlaktewater naar modelinvoer zijn voor drie verschillende gebieden modellen doorgerekend. De verschillende modellen zijn in onderstaande tabel samengevat.

#	Modelgebied	Methode oppervlaktewater	Gridgrootte (m)	Tijds-discretisatie
1A	Schoonhoven	Geaggregeerd (De Lange)	50 x 50	stationair
1B	Schoonhoven	Individueel	50 x 50	stationair
2A	Nijkerk	Geaggregeerd (De Lange)	100 x 100	stationair
2B	Nijkerk	Individueel	100 x 100	stationair
3A	Hele gebied	Geaggregeerd (De Lange)	500 x 500	stationair
3B	Hele gebied	Individueel	500 x 500	stationair

Niet alle resultaten worden in dit hoofdstuk besproken. Voor het Nijkerk model zijn de berekende stijghoogtes en fluxen van en naar het oppervlaktewater beschouwd voor zowel de geaggregeerde als de individuele methode. Deze twee modellen worden ook onderling vergeleken. Voor het hele gebied zijn de resultaten van het geaggregeerde model gepresenteerd:

- de berekende grondwaterstand,
- de flux van en naar het oppervlaktewater,
- en een vergelijking tussen de gemiddelde gemeten stijghoogte en de stijghoogte berekend met het model.

Voor de overige modellen is alleen de benodigde voorbereidingstijd en modelrekentijd opgenomen om inzicht te geven in de rekentijden van het script voor verschillende modellen.



Figuur 5 – Overzicht begrenzing testmodellen

## 5.1 Opbouw grondwatermodellen

De grondwatermodellen zijn met Modflow 6 doorgerekend. Dit levert enkele voordeelen op ten opzichte van een Modflow 2005 model. Het lagenmodel kan veel complexer ingevoerd worden door gebruik te maken de IDOMAIN functionaliteit waarmee uitwiggende lagen eenvoudig ingevoerd kunnen worden. Ook in het horizontale vlak biedt Modflow 6 meer flexibiliteit, zoals lokale gridverfijning of flexibele grids. Een ander voordeel is dat het mogelijk is om veranderingen in het oppervlaktewaterpeil weg te schrijven als losse tijdreeksen waardoor de bestandsgrootte beperkt blijft.

Om de oppervlaktewater-component te kunnen testen, is een werkend grondwatermodel opgesteld voor het interessegebied. In deze paragraaf is de opbouw van de modellen verder beschreven.

### 5.1.1 Bodemopbouw

De bodemopbouw is direct overgenomen uit REGIS. Uitwiggende lagen (met een dikte van 0 m) zijn "uitgezet" met behulp van de IDOMAIN functionaliteit. Daarmee kan een laag als "doorgeef laag" worden gedefinieerd die water wel doorlaat maar verder niet meedoet in het model. De horizontale en verticale doorlatendheid zijn gebaseerd op de waarden uit REGIS. Voor lagen waarvoor REGIS geen informatie bevat over de doorlatendheid is een vaste waarde van 1 m/dag gehanteerd voor de horizontale doorlatendheid. De anisotropiefactor is op 10 gezet (de verticale doorlatendheid is 10x kleiner dan de horizontale doorlatendheid).

### 5.1.2 Begin- en randvoorwaarden

Voor de initiële stijghoogtes is het niveau van het maaiveld ingevoerd. De randen van het model zijn ondoorlatend beschouwd.

### 5.1.3 Grondwaternaamvulling

De grondwaternaamvulling is ingesteld op 1 mm/dag.

### 5.1.4 Tijdsafhankelijk of stationair

De testmodellen zijn stationair doorgerekend. Het is ook mogelijk om ze tijdsafhankelijk door te rekenen door in het script het aantal tijdstappen en de lengte van die stappen te definiëren.

In het geval van een tijdsafhankelijk model biedt Modflow 6 de mogelijkheid om parameters van bepaalde packages (zoals het waterpeil van de GHB, RIV of DRN packages) weg te schrijven als tijdreeksen. Het voordeel hiervan is dat je maar een keer hoeft aan te geven waar het oppervlaktewater ligt, en de veranderingen aan die randvoorwaarde met een tijdreeks kan beschrijven. Dit wordt bijvoorbeeld gebruikt voor het oppervlaktewater binnen een peilgebied. Die waterlopen volgen allemaal dezelfde veranderingen in zomer- en winterpeil. In bijvoorbeeld de RIV package wordt aangegeven waar het oppervlaktewater ligt, en wordt voor het peil de naam van het peilgebied ingevoerd. Vervolgens wordt er een tijdreeks gegenereerd met de naam van het peilgebied om de afwisseling tussen zomer- en winterpeil aan te geven voor alle waterlopen binnen dat peilgebied.

### 5.1.5 Overzicht Modflow 6 packages

De volgende packages zijn gebruikt in de Modflow 6 modellen:

- **SIM:** simulatie
- **TDIS:** tijd discretisatie
- **IMS:** numerieke solver
- **GWF:** grondwatermodel
  - **DIS:** ruimtelijke discretisatie
  - **NPF:** doorlatendheid/weerstand
  - **IC:** initiële condities
  - **STO:** bergingscoëfficiënten (alleen nodig als model tijdsafhankelijk wordt doorgerekend)
  - **RCH:** grondwaternaamvulling
  - **OC:** specificatie van de modeluitvoer
  - **Oppervlaktewater randvoorwaarden:**
    - **GHB:** grote waterlopen met bathymetrie
    - **DRN:** overige waterlopen zonder waternaamvulling
    - **RIV:** overige waterlopen met waternaamvulling

## 5.2 Resultaten

In deze paragraaf zijn de rekentijden van het script voor de verschillende testmodellen opgenomen. Voor twee modelgebieden zijn de berekende resultaten (grondwaterstand en infiltratie/kwel) van de modellen gepresenteerd.

### 5.2.1 Rekentijden

Om inzicht te geven in de rekentijden van de scripts en het grondwatermodel is in onderstaande tabel per model de pre-processing tijd en de model rekentijd weergegeven. De scripts maken waar mogelijk gebruik van caching (het opslaan van tussenresultaten) om het script de volgende keer sneller te kunnen uitvoeren. De stappen die tussentijds opgeslagen worden zijn stappen die in veel gevallen maar één keer uitgevoerd hoeven worden zolang het modelgrid onveranderd blijft. In deze resultaten zijn de volgende resultaten tussentijds opgeslagen:

- AHN informatie voor het modelgebied op 5 meter schaal
- Resultaat van de versnijding van de watervlakken-shapefile met het modelgrid
- REGIS lagenmodel voor het modelgebied

Als deze informatie niet beschikbaar is wordt deze automatisch opgehaald.

De scripts zijn gedraaid op een Dell XPS 15 laptop met core i7 (8th gen) processor, 32 GB RAM en een 1TB M.2 SSD.

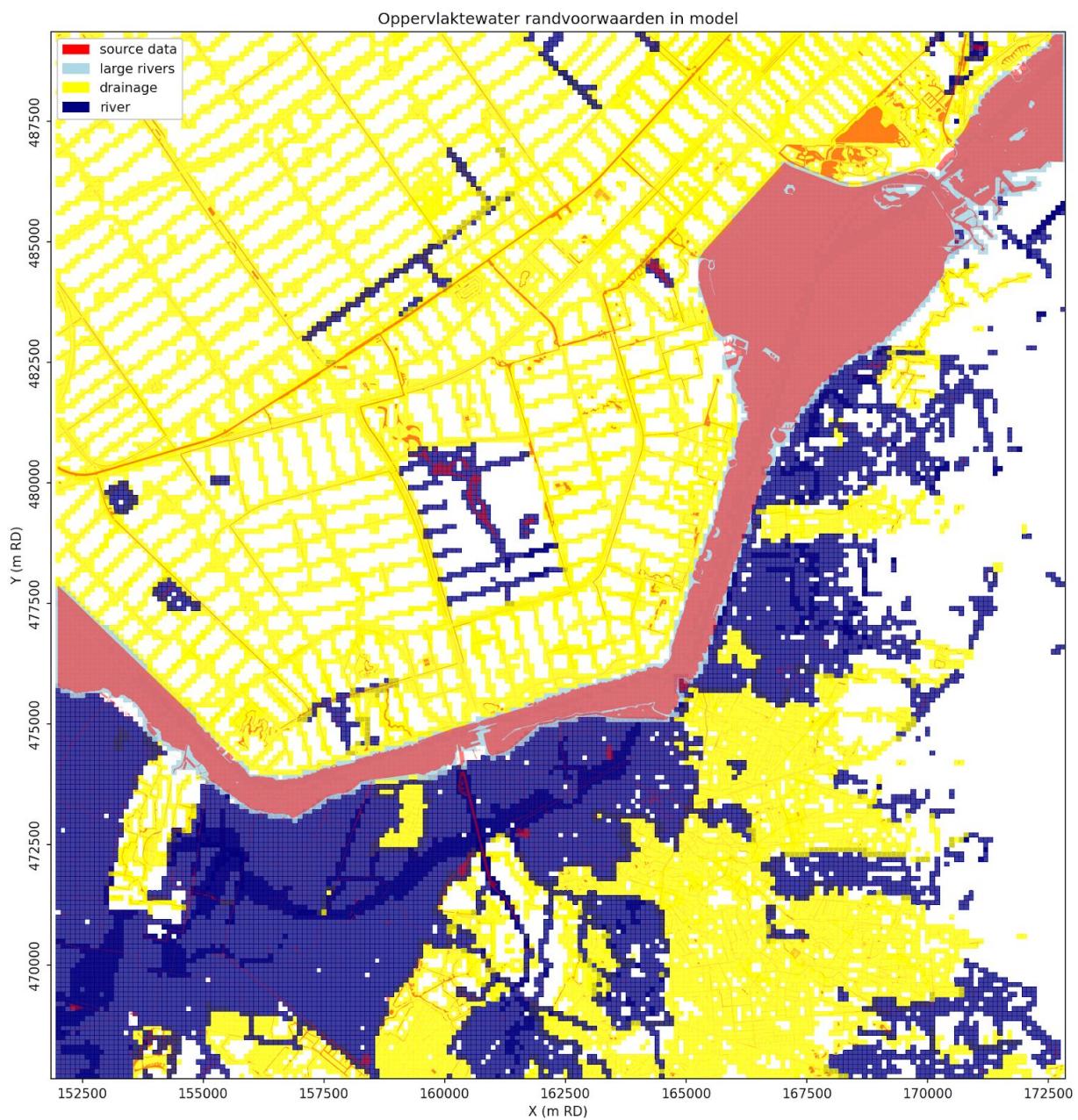
#	Modelgebied	Methode oppervlaktewater	Gridgrootte (m)	Dimensies ( $N_{lagen}$ , $N_{rijen}$ , $N_{kolommen}$ )	Pre-processing tijd	Rekentijd (s)
1A	Schoonhoven	Geaggregeerd (De Lange)	50 x 50	35, 109, 103	3m	4
1B	Schoonhoven	Individueel	50 x 50	35, 109, 103	1.5m	4
2A	Nijkerk	Geaggregeerd (De Lange)	100 x 100	48, 217, 210	8m	25
2B	Nijkerk	Individueel	100 x 100	48, 217, 210	4m	24
3A	Heel gebied	Geaggregeerd (De Lange)	500 x 500	65, 128, 134	17m	6.0
3B	Heel gebied	Individueel	500 x 500	65, 128, 134	22m	7.7

### 5.2.2 Nijkerk (individueel vergeleken met geaggregeerd)

Voor het Nijkerk model zijn de volgende resultaten weergegeven:

- Een overzicht van de verschillende oppervlaktewater randvoorwaarden in het grondwatermodel en de invoerdata.
- Vergelijking van de berekende grondwaterstand (stijghoogte eerste actieve modellaag) tussen het individuele en geaggregeerd model.
- Vergelijking van de flux van/naar het oppervlaktewater tussen het individuele en het geaggregeerde model.

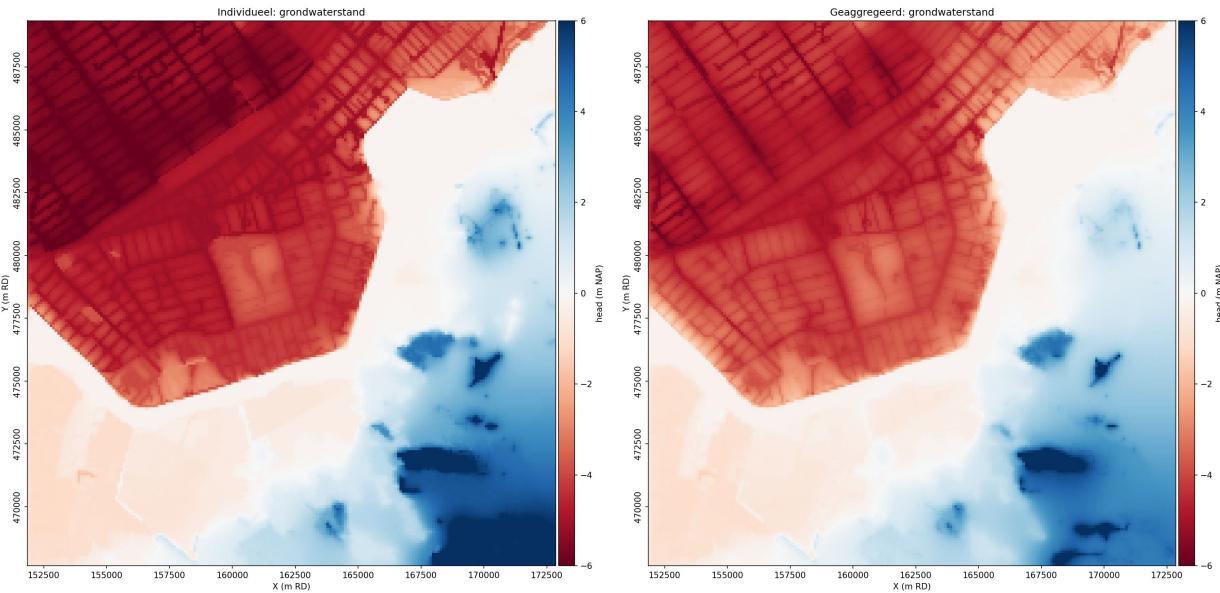
In figuur 6 is de invoerdata vergeleken met de oppervlaktewater randvoorwaarden in het grondwatermodel rondom Nijkerk. Daarbij is de individuele methode toegepast voor de omzetting van de drainerende en voedende waterlopen. Het is zichtbaar dat alle invoerdata is verwerkt in het grondwatermodel.



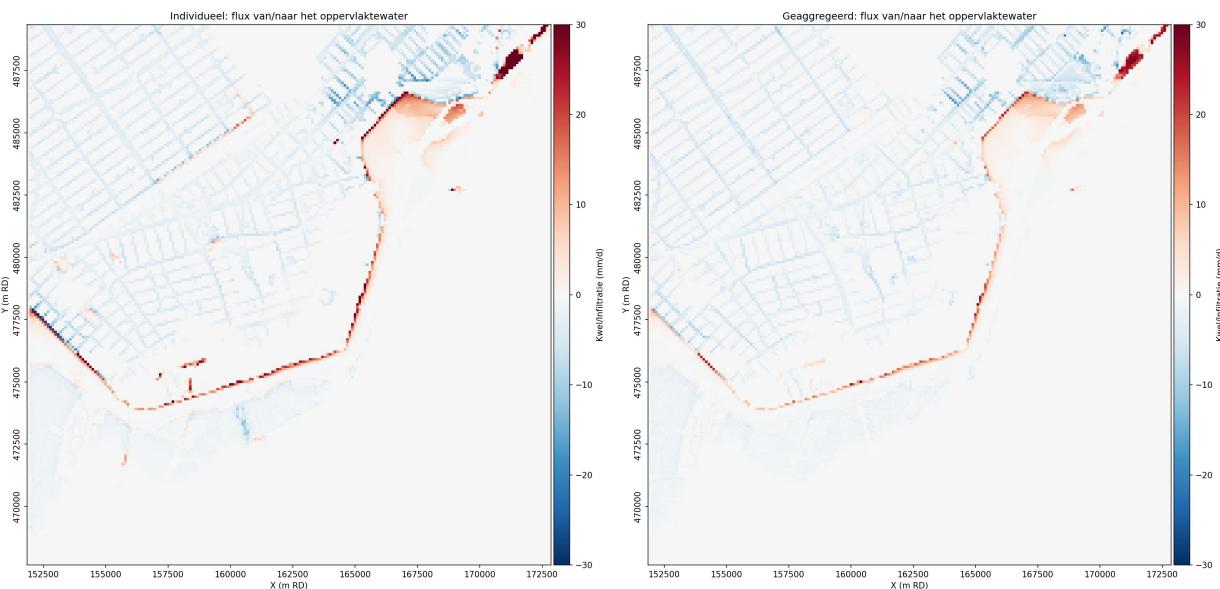
*Figure 6 – Overzicht brondata (in rood weergegeven) en verschillende oppervlaktewater randvoorwaarden in het grondwatermodel: waterlopen met bathymetrische informatie (lichtblauw), drainerende waterlopen (geel), voedende waterlopen (donkerblauw). De kleuren zijn enigszins transparant om overlappende data zichtbaar te maken.*

In figuur 7 en figuur 8 zijn de berekende grondwaterstand en de flux van en naar het oppervlaktewater voor de twee modellen weergegeven. In figuur 9 zijn de verschillen tussen de twee modellen visueel gepresenteerd. Het is duidelijk zichtbaar dat de stijghoogtes veel lager worden berekend in het geval van het model op basis van de individuele methode. In de geaggregeerde modellen is er meer weerstand tegen stroming richting het oppervlaktewater wat voor hogere grondwaterstanden zorgt. Voor de berekende flux zijn er ook duidelijke verschillen maar er is minder duidelijk een structureel verschil te zien. Uit de berekeningen blijkt dat de grondwaterstanden in de Flevopolder er plausibel uitzien. De stijghoogtes in het oosten en zuidoosten (aan de voet van de Veluwe waar het maaiveld aanzienlijk hoger ligt) liggen hoger. De infiltratie vanaf de randmeren en de kwel

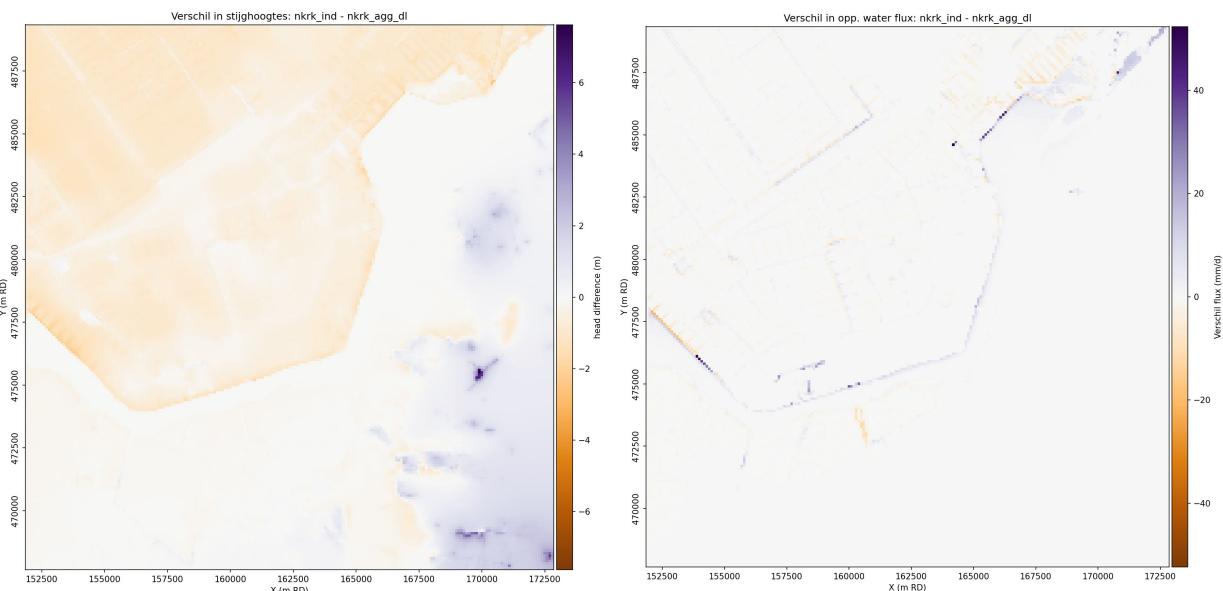
in de Flevopolder lijken ook plausibel.



Figuur 7 – Vergelijking tussen de berekende grondwaterstand met de individueel methode en de geaggregereerde methode voor omzetting van oppervlaktewater naar modelinvoer.



Figuur 8 – Vergelijking tussen de flux van en naar het oppervlaktewater tussen de twee methodes (individueel versus geaggregereerd).



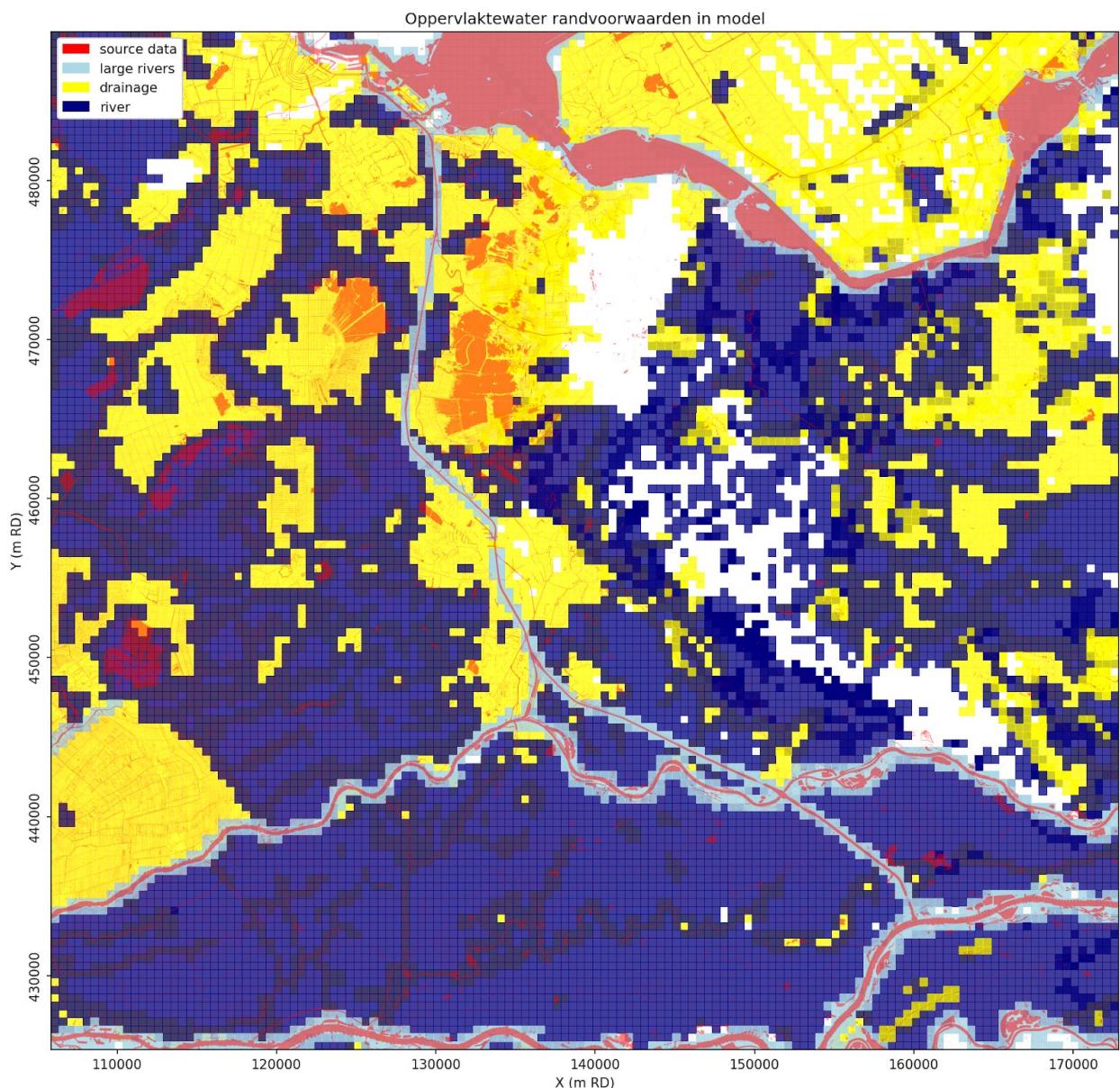
*Figuur 9 – Berekende verschillen tussen de berekende grondwaterstand tussen de twee modellen en de berekende fluxen.*

### 5.2.3 Heel gebied (geaggregeerd)

Voor het model van het gehele gebied is alleen het model waarbij de waterlopen geaggregeerd zijn ingevoerd beschouwd. De volgende resultaten zijn gepresenteerd:

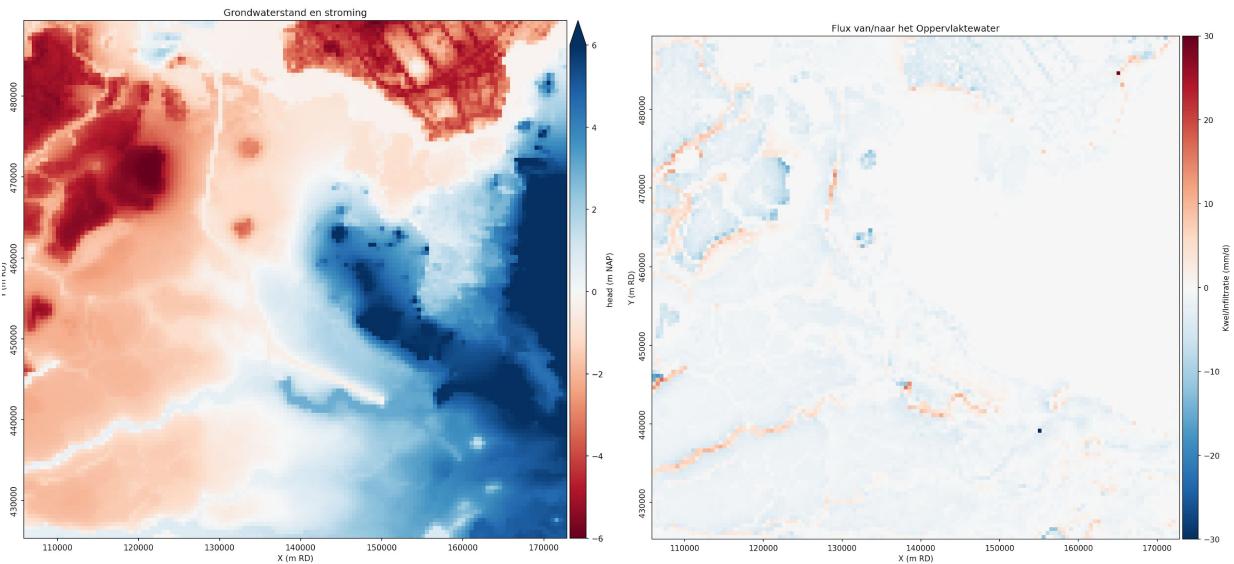
- Een overzicht van de verschillende oppervlaktewater randvoorwaarden in het grondwatermodel en de invoerdata.
- De berekende grondwaterstand en flux van en naar het oppervlaktewater.
- Een vergelijking van de berekende stijghoogtes met de gemiddelde gemeten stijghoogtes in het gebied in de periode 2015–2019.

In figuur 10 is zichtbaar dat de invoerdata (weergegeven in rood) over het algemeen goed is omgezet naar modelinvoer. Er zijn maar een paar locaties waar er geen randvoorwaarden zijn toegevoegd terwijl er wel invoerdata beschikbaar is. Waar dit wel het geval is, is dat meestal omdat er gegevens ontbreken die nodig zijn om het oppervlaktewater in het grondwatermodel te zetten. Wel is opvallend dat er in bepaalde gebieden drainerend oppervlaktewater aanwezig is terwijl bekend is dat in die gebieden ook water ingelaten wordt. Dit heeft te maken met de brondata, waarin is aangegeven of een watergang de mogelijkheid tot wateraanvoer heeft. Als deze waarde in de brondata wordt aangepast zal deze aanpassing ook in de randvoorwaarde voor MODFLOW terechtkomen.



*Figure 10 – Overzicht brondata (in rood weergegeven) en verschillende oppervlaktewater randvoorwaarden in het grondwatermodel: waterlopen met bathymetrische informatie (lichtblauw), drainerende waterlopen (geel), voedende waterlopen (donkerblauw). De kleuren zijn enigszins transparant om overlappende data zichtbaar te maken.*

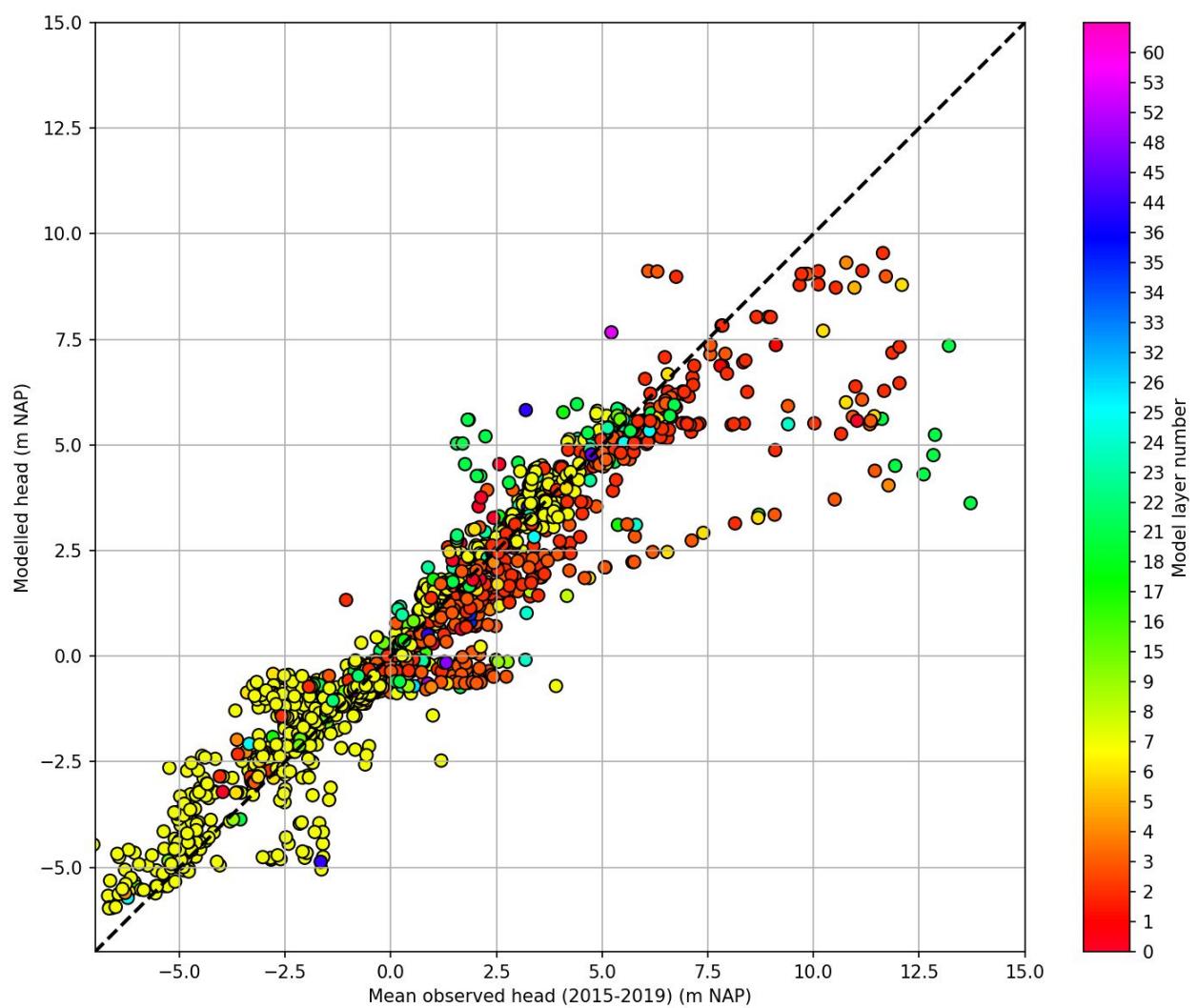
In figuur 11 is links de berekende grondwaterstand weergegeven. Daarin zijn duidelijk de grote rivieren en diepe polders zichtbaar, en die geven ook een plausibel beeld van de grondwaterstand. In dezelfde figuur aan de rechterzijde is de flux van en naar het oppervlaktewater weergegeven. Hierin is zichtbaar dat de grotere rivieren met name richting de lager gelegen gebieden in het westen ook meer infiltreren, terwijl in de polders juist kwel optreedt, hetgeen je ook zou verwachten. De resultaten zien er dus plausibel uit.



**Figuur 11 – Grondwaterstand en flux van en naar het oppervlaktewater berekend met het grondwatermodel op basis van de geaggregeerde methode voor het gehele interessegebied.**

Het model is ook vergeleken met metingen om te onderzoeken of de berekende stijghoogtes enigszins overeenkomen met wat er is gemeten in de praktijk. Voor het gehele gebied zijn alle peilbuizen uit DINO opgehaald voor de periode 2015 – 2019. Voor de peilbuizen met meer dan 3 jaar aan metingen met minimaal 12 metingen per jaar is de gemiddelde gemeten stijghoogte berekend. Voor elke peilbuis is vervolgens berekend in welke modellaag deze ligt, en is de geïnterpolerde stijghoogte op die locatie uit het model berekend. De stijghoogte ter plaatse van een peilbuis is dus berekend op basis van de 4 omliggende cellen.

Het resultaat is gepresenteerd in figuur 12. Het is positief dat er een verband zichtbaar is tussen de gemeten en de gemodelleerde stijghoogtes. Maar het is uiteraard te verwachten dat daar ook grote verschillen in zichtbaar zijn. Het modelgrid is relatief grof (500 x 500 m), het lagenmodel is alleen op REGIS gebaseerd (met aannames van de doorlatendheid waar deze niet beschikbaar was en zonder enige kalibratie), en los van het oppervlaktewater is het grondwatermodel zo eenvoudig mogelijk in elkaar gezet. Het grondwatermodel lijkt in de hoger gelegen gebieden een onderschatting te maken van de stijghoogtes. De gemodelleerde stijghoogtes liggen vaak lager dan de gemeten stijghoogtes. De stijghoogtes in deze hoger gelegen gebieden worden dus niet goed berekend. Dit kan veroorzaakt worden doordat het oppervlaktewater te makkelijk water afvoert, doordat de hydraulische doorlatendheid niet goed is goed is ingeschat, en doordat andere hydraulische randvoorwaarden (grondwateraanvulling, grondwateronttrekkingen) niet zijn meegenomen. Dit zijn beide zaken die in een modelstudie en kalibratie aangepakt zouden kunnen worden.



Figuur 12 – De berekende stijghoogte vergeleken met de gemiddelde gemeten stijghoogte voor de periode (2015–2019). De kleur van de bol geeft het laagnummer aan waarin de peilbuis ligt.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

Het doel van dit project was de ontwikkeling van een "bouwsteen" om oppervlaktewater randvoorwaarden automatisch te genereren voor grondwatermodellen op willekeurige tijd- en ruimteschaal. Om dit mogelijk te maken zijn Python-scripts ontwikkeld die dit mogelijk maken. De ontwikkelde workflow bestaat uit twee hoofdstappen:

- Ophalen en samenvoegen relevante informatie met betrekking tot het oppervlaktewater binnen het interessegebied.
- Omzetten van het resultaat uit de vorige stap naar invoer voor een grondwatermodel.

In de eerste stap zijn scripts ontwikkeld om data over het oppervlaktewater op te halen van allerlei online databronnen van verschillende waterschappen binnen het interessegebied. Vanuit al deze gegevens wordt een samengevoegd bestand gemaakt met alle watervlakken waarbij aan elke polygoon ook de relevante parameters zijn gedefinieerd. In dit bestand is al het oppervlaktewater opgenomen, en is alle informatie beschikbaar om het om te zetten naar invoer voor een grondwatermodel. Naast dit hoofdbestand zijn ook andere datasets gegenereerd met aanvullende informatie zoals hellingen van waterlopen, en bathymetrische gegevens. Validatie van de invoerdata was een onderdeel van deze stap. Daarbij is getoetst of de gegevens compleet en consistent zijn. Dit is een waardevolle uitkomst voor de databeheerders om problemen in hun data op te sporen en te verbeteren.

In de tweede stap is de data uit de eerste stap verwerkt tot invoer voor een grondwatermodel. Daarbij zijn verschillende typen oppervlaktewater gedefinieerd:

- Grote waterlopen met bathymetrische informatie (onder beheer van Rijkswaterstaat)
- Overig oppervlaktewater met bathymetrische informatie
- Waterlopen met een hellende bodem
- Overig oppervlaktewater (opgedeeld in twee categorieën:
  - Drainerende waterlopen (waterlopen die voornamelijk draineren)
  - Waterlopen die kunnen draineren of infiltreren (waterlopen die ook water aan kunnen voeren)

Het grondwatermodel is gebaseerd op MODFLOW 6. Per categorie oppervlaktewater zijn verschillende methodes toegepast en zijn verschillende "packages" gekozen om het oppervlaktewater op te nemen in het model. Er zijn twee methodes om het oppervlaktewater in het model te verwerken. De eerste is de individuele methode waarbij alle waterlopen individueel in het model worden opgenomen. Deze methode is vooral geschikt voor kleinere modellen met een fijne gridgrootte, waarbij elke waterloop in een eigen gridcel ligt. De tweede methode is de geaggregeerde methode, waarbij per gridcel al het oppervlaktewater in die cel wordt samengevoegd tot een representatieve randvoorwaarde. Deze methode is vooral geschikt voor regionale modellen op grotere schaal waarbij er veel oppervlaktewater per gridcel aanwezig is. Binnen deze geaggregeerde methode zijn er verschillende mogelijkheden om de representatieve parameters te bepalen. Dat kan bijvoorbeeld door de parameters te wegen met het oppervlak van de verschillende watervlakken binnen een gridcel, of door het grootste oppervlak binnen een gridcel als maatgevend te beschouwen. Ook kunnen de opschattingenformules van De Lange gebruikt worden om de conductance te bepalen. De gebruiker kan bepalen welke methode het meest geschikt is.

De omzetting van het oppervlaktewater naar modelinvoer is getest door grondwatermodellen te genereren voor 3 gebieden:

- Een gebied rondom Schoonhoven met een modelgrid van 50 x 50 m
- Een gebied rondom Nijkerk met een modelgrid van 100 x 100 m

- Het hele interessegebied met een modelgrid van 500 x 500 m

Voor elk van de modellen is zowel met de individuele als de geaggregeerde methode (met de methode van de Lange) een model gemaakt. De resultaten van sommige modellen zijn nader beschouwd. Voor het Nijkerk model is een vergelijking gemaakt tussen de twee methodes, waaruit duidelijk zichtbaar is dat de geaggregeerde methode een grotere weerstand geeft aan het oppervlaktewater met hogere grondwaterstanden als gevolg. Voor het gehele gebied is de berekende stijghoogte vergeleken met metingen. De mate van overeenkomst is goed te verklaren door de eenvoud en grove schaal van het grondwatermodel. Met deze testmodellen is aangegeven dat de "bouwsteen" goed in staat is om het oppervlaktewater om te zetten naar modelinvoer voor een willekeurige ruimteschaal, en dat de uitkomsten een plausibel beeld geven. De testmodellen zijn allemaal stationair doorgerekend maar het is ook mogelijk om de randvoorwaarden voor een willekeurige periode te genereren zodat ook tijdsafhankelijk gerekend kan worden.

Op basis van de werkzaamheden binnen dit project maken wij de volgende aanbevelingen:

- Op basis van het verrichte werk wordt aanbevolen om de brondata nog eens goed na te lopen en de gevonden inconsistenties en fouten daarin aan te passen. In dit project zijn fouten in de bron geconstateerd, en zijn deze in veel gevallen ook visueel inzichtelijk gemaakt waardoor het voor de bronhouders eenvoudiger zou moeten zijn om deze fouten te repareren.
- Nader onderzoek naar de aggregatiemethodes, met name met de formule van De Lange voor het bepalen van de conductance. De formules leiden in bepaalde situaties tot negatieve conductances die op hun beurt tot numerieke instabiliteit leiden. De situatie waarin deze negatieve waarden worden berekend is beschreven in de bijlage.
- Toetsen van de functionaliteit met een gedetailleerde grondwatermodel. Daarmee kan nauwkeuriger gekeken worden naar de plausibiliteit van de modelinvoer voor oppervlaktewater.

## 7 Referenties

- Brakenhoff, D. A., Tollenaar, D., Caljé, R.C. 2020. Repository Github: UGW: Bouwsteen Oppervlaktewater. <https://github.com/ArtesiaWater/UGW>
- Deltares. Nationaal Hydrologisch Instrumentarium – NHI Modelrapportage: Deelrapport Freatische Lekweerstanden, December 2008
- Langevin, C.D., Hughes, J.D., Banta, E.R., Provost, A.M., Niswonger, R.G., and Panday, Sorab, 2020, MODFLOW 6 Modular Hydrologic Model version 6.2.0: U.S. Geological Survey Software Release, 22 October 2020, <https://doi.org/10.5066/F76Q1VQV>

# Bijlage 1 – Conductance volgens methode De Lange

In de formule van de Lange wordt uitgegaan van een homogeen doorsnedemodel waarin de sloten haaks op de doorsnede lopen. Het doorsnedemodel beschouwd het gebied tussen twee sloten. Om de situatie in de realiteit te vertalen naar invoer voor deze formule moeten enkele aannames worden gedaan:

- De lengte van de waterlopen is gelijk aan de som de lengtes van alle waterlopen in een gridcel.
- De breedte van de waterlopen is gelijk aan het totale oppervlak van water gedeeld door de berekende lengte.
- De afstand tussen waterlopen is gelijk aan het oppervlak van de gridcel gedeeld door de lengte van de waterlopen minus de breedte van de waterlopen.

De uitleg van de symbolen in onderstaande vergelijkingen:

- A: oppervlak van de gridcel [ $m^2$ ]
- p: percentage oppervlaktewater in de gridcel [-]
- $c_1$ : weerstand tussen topsysteem en de regionale aquifer (in deze studie op 0 gezet) [dagen]
- $c_0$ : bodemweerstand oppervlaktewater (in deze studie op 1 dag aangenomen) [dagen]
- H: dikte van het topsysteem [m]
- $k_h$ : horizontale doorlatendheid van het topsysteem [m/d]
- $k_v$ : verticale doorlatendheid van het topsysteem [m/d]
- L: afstand tussen twee sloten [m]
- B: breedte van de sloot [m]

De conductance wordt berekend met

$$C = \frac{A}{W_p}$$

Waarbij

$$W_p = \frac{1}{\left( \frac{(1-p)}{C_L} + \frac{p}{C_B} \right) + c_r - c_1}$$

De berekening van  $C_L$  en  $C_B$  volgt uit de volgende reeks formules

$$C_L = (c_0 + c')F_L + \left( \frac{c_0L}{B} \right)F_B$$

$$C_B = \frac{c_0 + c'}{C_L - \frac{c_0L}{B}} C_L$$

$$F_L = \frac{L}{2\lambda_L} \coth \left( \frac{L}{2\lambda_L} \right)$$

$$F_B = \frac{B}{2\lambda_B} \coth \left( \frac{B}{2\lambda_B} \right)$$

$$\lambda_L = \sqrt{c' k_h H}$$

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{c' k_h H c_0}{c' + c_0}}$$

$$c' = c_1 + \frac{H}{k_v}$$

De radiale weerstand wordt berekend volgens:

$$c_r = \frac{L}{\pi \sqrt{k_h k_v}} \log \left( \frac{4H \sqrt{k_h}}{\pi B \sqrt{k_v}} \right)$$

### Negatieve conductances

Als de aggregatiemethode van De Lange wordt toegepast kan het zijn dat de conductance negatief wordt berekend. Dit komt doordat de radiale weerstand negatief wordt als de breuk in het logaritme in de formule kleiner is dan 1. Bij isotrope condities komt dit overeen met de situatie dat de breedte van de sloot groter is dan de dikte van het top-systeem:

$$4H < \pi B$$

Bij anisotrope condities wordt dit:

$$4H < \frac{\pi B}{\sqrt{\alpha}}$$

waarbij

$$\alpha = \frac{k_h}{k_v}$$

Onder de aannames in deze studie is dat het geval als de dikte van het top-systeem kleiner is dan de breedte van de waterloop gedeeld door 4. Dit komt dus vaak voor in gridcellen waar het oppervlaktewater een groot deel van de cel bedekt. In deze studie is de radiale weerstand op 0 dagen gezet als deze negatief is berekend. Dit lijkt een plausibele oplossing aangezien de radiale weerstand naar waterlopen met een relatief grote breedte waarschijnlijk ook verwaarloosbaar is. Het is echter niet onderzocht wat de consequenties van deze aanname zijn. Wel is gebleken dat negatieve conductances in het grondwatermodel tot numerieke instabiliteit leiden.

## **Bijlage 2 – Rapport verwerking oppervlaktewater gegevens**

# Bijlage - verwerking data oppervlaktewater

## Workflow verwerking data oppervlaktewater

In deze paragraaf bespreken we de workflow waarmee gegevens omtrent het oppervlaktewater worden verwerkt. De stappen waaruit de workflow bestaat worden visueel weergegeven in de figuur op de volgende pagina en bestaan uit:

1. Aansluiten op verschillende gegevensbronnen. Dit zijn webservices of lokale bestanden
2. Vanuit de gegevensbronnen (1) uniforme GIS-bestanden genereren met het te ontwikkelen Python-script
3. Deze geüniformeerde GIS-bestanden samenvoegen tot invoerbestanden voor ModFLOW
4. De gegevens valideren

De workflow bestaat uit twee python scripts:

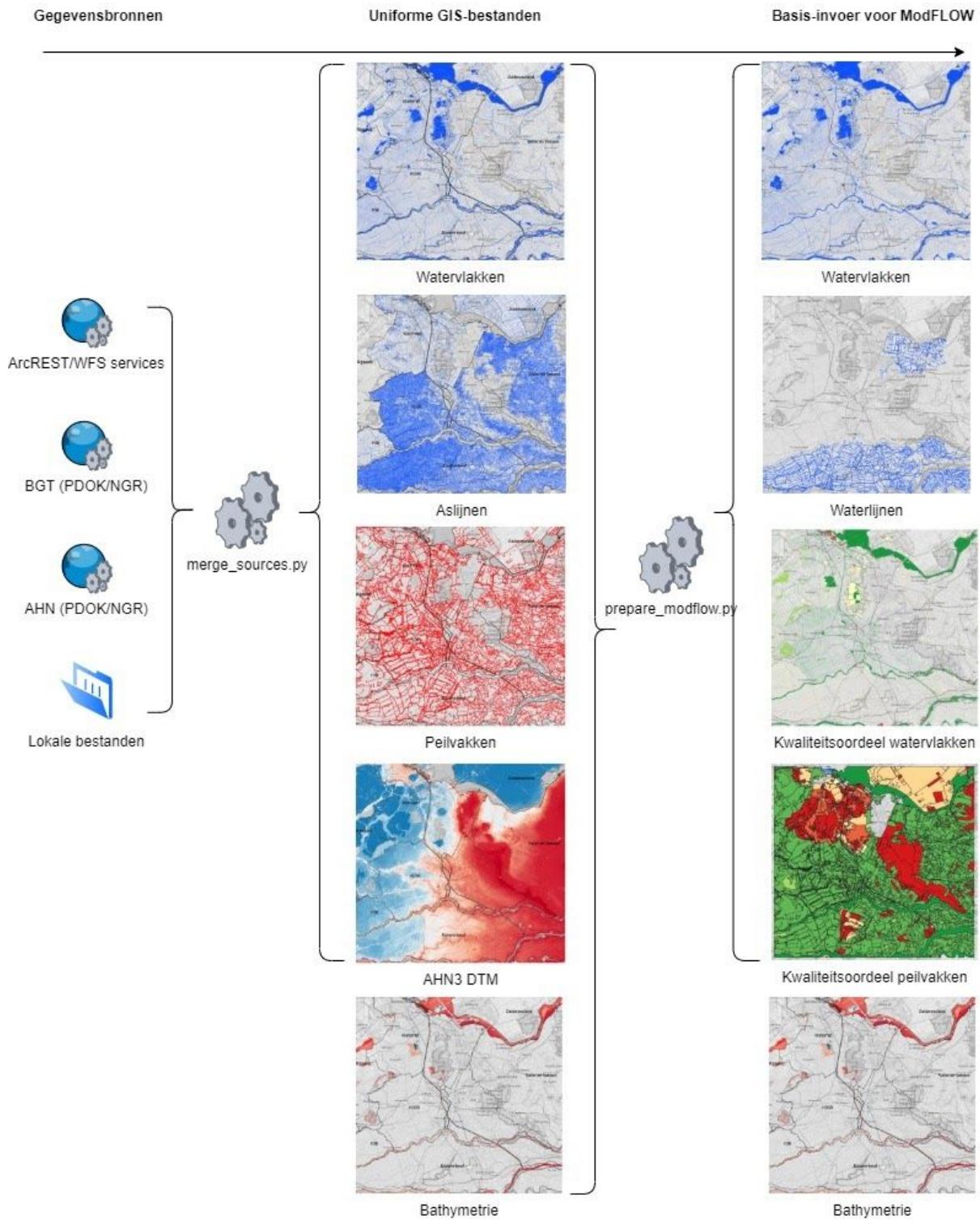
- *merge\_sources.py*. Dit script download brongegevens en voegt ze samen tot geüniformeerde GIS-bestanden (stappen 1 en 2)
- *prepare\_modflow.py*. Dit script valideert de geüniformeerde GIS-bestanden en voegt ze samen tot een invoer voor een ModFLOW model en valideert de gegevens. (stappen 3 en 4).

## Aansluiten op gegevensbronnen

We onderscheiden de volgende gegevensbronnen:

- ArcREST/WFS services. Verschillende waterschappen, Rijkswaterstaat en HyDAMO publiceren hun gegevens via dit type webservice. Langs deze weg worden veelal de legger en peilgebieden ontsloten
- Basisregistratie Grootchalige Topografie (BGT). We ontsluiten deze via de API die beschikbaar is via de website: <https://download.pdok.io/lv/bgt/viewer/>
- AHN. We ontsluiten deze via de Web Coverage Service (WCS) die via PDOK/NGR beschikbaar is.

Alle informatie die (nog) niet beschikbaar is via webservices wordt lokaal ingelezen als GeoTiff, GML of ESRI-shapefile.



Figuur 1 - Workflow verwerking oppervlakte-data

## Genereren uniforme GIS-bestanden

Het Python-script *merge\_sources.py* maakt vanuit de brongegevens een viertal geüniformeerde GIS-bestanden aan door:

1. de bron uit te snijden voor een specifieke laag per waterschap en langs de grens van dat waterschap. Alleen het AHN wordt in een keer voor het gehele projectgebied gedownload
2. attribuutnamen te uniformeren. Bijvoorbeeld; attribuutnaam *BODEMBREEDTE* uit de legger van Rijnland en attribuutnaam *IWS\_W\_BODBR* uit de hydro-objecten van HDSR worden beiden hernoemd naar de attribuutnaam *BB*.

*merge\_sources.py* exporteert de volgende vier bestanden:

- Een watervlakkenbestand (*water\_areas.shp*) met polygonen die het wateroppervlak weergeven
- Een waterlijnenbestand (*water\_lines.shp*) met daarin de as van elke waterloop
- Een bestand met alle peilgebieden (*water-level\_areas.shp*)
- Het AHN3 DTM op 5m x 5m celgrootte (*ahn3\_5m\_dtm.tif*)

## Samenvoegen van de geüniformeerde GIS-bestanden

Het script *prepare\_modflow.py* voegt de geüniformeerde bestanden samen tot een aantal basisbestanden die als input dienen voor Modflow.

Om de watervlakken (*waterareas.shp*) ten behoeve van MODFLOW te kunnen aanmaken, doorloopt het script de volgende stappen:

- Binnen de peilgebieden voegt het alle verschillende peilen samen tot één representatief zomer- en winterpeil
- Het voegt de mediaan en 90 percentiel van het maaiveldhoogte uit het AHN3 DTM toe aan de peilgebieden.
- Het voegt de attributen van de peilgebieden en waterlijnen toe aan aan de watervlakken op basis van maximaal overlappende lengte (waterlijnen) of oppervlak (peilgebieden). Op dezelfde manier wordt gekeken of een watervlak een bathymetrie-bestand doorkruist.

Water as-lijnen (*waterlines.shp*) zijn beschikbaar voor elke waterlijn waarvan een bovenstroomse en benedenstroomse bodemhoogte is opgenomen in de gegevensbron.

## Valideren van de informatie uit de uniforme GIS-bestanden

Het script *prepare\_modflow.py* valideert de geüniformeerde brongegevens op onderlinge consistentie en volledigheid en kent waar nodig vervangende waarden toe.

We onderscheiden de volgende validatieregels:

- Regels voor zomer- en/of winterstreefpeil. Het script vergelijkt de peilen op e peilvakken met de mediaan en het en 90-percentiel maaiveldhoogte binnen het peilgebied.
- Regels voor bodemhoogte. Het script valideert het winterstreefpeil aan de bodemhoogte.
- Validatieregels voor bodembreedte. Het script vergelijkt de breedte met de omtrek van het watervlak gedeeld door de lengte. De breedte wordt altijd groter dan 50 cm gemaakt.

Het resultaat van de gegevensvalidatie wordt verwerkt in *water-levelareas\_verdict.shp* en *waterareas\_verdict.shp*. Ontbrekende waarden, na validatie worden ingevuld met default-waarden in *waterareas.shp*. Ook hiervan wordt melding gemaakt in *waterareas\_verdict.shp* en *water-levelareas\_verdict.shp*.

# Uitvoering en resultaten

In dit hoofdstuk bespreken we de uitvoering van de workflow en de resultaten voor het Utrechts grondwatermodel.

## Brongegevens

Hier geven we een overzicht van alle webservices waarop we hebben aangesloten en de bronbestanden die we hebben gebruikt.

### Web-services

De meeste data komt binnen via webservices. Dit betreft voor de meeste waterschappen de legger en het peilbesluit. We raadplegen ook de PDOK voor het AHN en de BGT.

Tabel 1 - lijst met geraadpleegde services

Waterschap	bron_id	type	url
Rijnland	rijnland_legger	ArcREST	<a href="https://rijnland.enl-mcs.nl/arcgis/rest/services/Leggers/Legger_Oppervlaktewater_Vigrend/MapServer">https://rijnland.enl-mcs.nl/arcgis/rest/services/Leggers/Legger_Oppervlaktewater_Vigrend/MapServer</a>
	rijnland_peilgebieden	ArcREST	<a href="https://rijnland.enl-mcs.nl/arcgis/rest/services/Polder_en_peilgebied/peilgebied_vigerend_besluit/MapServer">https://rijnland.enl-mcs.nl/arcgis/rest/services/Polder_en_peilgebied/peilgebied_vigerend_besluit/MapServer</a>
HDSR	hdsr_peilgebieden	ArcREST	<a href="https://services1.arcgis.com/1IWKHMMyUIR3eKHKD/ArcGIS/rest/services/Peilgebieden/FeatureServer">https://services1.arcgis.com/1IWKHMMyUIR3eKHKD/ArcGIS/rest/services/Peilgebieden/FeatureServer</a>
	hdsr_hydro-object	ArcREST	<a href="https://services1.arcgis.com/1IWKHMMyUIR3eKHKD/ArcGIS/rest/services/HydroObjecten/FeatureServer">https://services1.arcgis.com/1IWKHMMyUIR3eKHKD/ArcGIS/rest/services/HydroObjecten/FeatureServer</a>
HSK	hsk_legger	ArcREST	<a href="https://services.arcgis.com/OnnVX2wGkBfFlKqu/ArcGIS/rest/services/HHSK_Legger_Watersysteem/FeatureServer">https://services.arcgis.com/OnnVX2wGkBfFlKqu/ArcGIS/rest/services/HHSK_Legger_Watersysteem/FeatureServer</a>
Rijkswaterstaat	rws_legger	WFS	<a href="https://geoservices.rijkswaterstaat.nl/rws_1egger_2.0">https://geoservices.rijkswaterstaat.nl/rws_1egger_2.0</a>
	rws_kwr	WFS	<a href="https://geoservices.rijkswaterstaat.nl/apps/geoserver/kaderrichtlijn_water/ows">https://geoservices.rijkswaterstaat.nl/apps/geoserver/kaderrichtlijn_water/ows</a>
Rivierenland	rivierenland_legger	ArcREST	<a href="https://kaarten.wsrl.nl/arcgis/rest/services/Kaarten/Legger_Watersysteem/MapServer">https://kaarten.wsrl.nl/arcgis/rest/services/Kaarten/Legger_Watersysteem/MapServer</a>

	rivierenland_peilgebieden	ArcREST	<a href="https://kaarten.wsrl.nl/arcgis/rest/services/Kaarten/Vigerend_Peilgebieden/MapServer">https://kaarten.wsrl.nl/arcgis/rest/services/Kaarten/Vigerend_Peilgebieden/MapServer</a>
Vallei en Veluwe	v&v_legger	ArcREST	<a href="https://services1.arcgis.com/ug8NBKcLHVNmdmdt/ArcGIS/rest/services/Legger_Watersysteem/FeatureServer">https://services1.arcgis.com/ug8NBKcLHVNmdmdt/ArcGIS/rest/services/Legger_Watersysteem/FeatureServer</a>
Waternet	waternet_legger	ArcREST	<a href="https://maps.waternet.nl/arcgis/rest/services/AGV_Legger/AGV_Legger_GEONIS/MapServer">https://maps.waternet.nl/arcgis/rest/services/AGV_Legger/AGV_Legger_GEONIS/MapServer</a>
HyDAMO	hydamo	WFS	<a href="https://data.nhi.nu/geoserver/ows">https://data.nhi.nu/geoserver/ows</a>
NGR	ahn3	WCS	<a href="https://geodata.nationaalgeoregister.nl/ahn3/wcs">https://geodata.nationaalgeoregister.nl/ahn3/wcs</a>
	BGT	API	<a href="https://download.pdok.io/lv/bgt/viewer">https://download.pdok.io/lv/bgt/viewer<sup>1</sup></a>

## Bronbestanden

Een aantal databronnen is nog niet te downloaden via een webservice. Deze data lezen we in uit bestanden die de waterschappen zelf hebben aangeleverd. In sommige gevallen hebben we deze data moeten voorbewerken. Dit proces is uitgewerkt in het hoofdstuk [Voorbewerkingen](#).

Tabel 2 - lijst met bronbestanden

Organisatie	bron_id	type	bestand
HSK	hsk_peilgebieden	ESRI-shp	PeilgebiedenlaagHHSK_20200409.shp
HWH	waterschapsgrenzen	gml	Waterschapsgrenzen_4258.gml (zie HWH waterschapsdata op NGR)
Rivierenland	rivierenland_waterlijnen	ESRI-shp	waterlijnen_20200724.shp
Vallei en Veluwe	V&V_GIS	open-GDB	GISbestanden WVW.gdb
Waternet	waternet_peilgebieden	ESRI-shp	VigerendePeilgebieden_edit_20200523.shp
Zuiderzeeland	zuiderzeeland_peilgebieden	ESRI-shp	Peilgebieden Besluit.shp

<sup>1</sup> We gebruiken de api-calls gebruikt in deze website (laatst geraadpleegd 17-04-2020)

	zuiderzeeland_waterlijnen	ERSI-shp	Profiel_merged_20200609.shp
--	---------------------------	----------	-----------------------------

## Voorbewerkingen

Bij een aantal bronbestanden hebben we handmatig voorbewerkingen moeten uitvoeren op de gegevensbronnen.

### Administratieve eenheden

HWB waterschaps grenzen overlappen tussen waterschappen èn met de beheergrenzen van Rijkswaterstaat. De grenzen van oppervlaktewaterlichamen van Rijkswaterstaat overlappen met het beheergebied van waterschap Vallei en Veluwe bij de Eemvallei. We hebben een set administratieve eenheden gemaakt door:

- De waterschaps grenzen af te knippen op de grenzen van oppervlaktewaterlichamen van Rijkswaterstaat
- Dit resultaat te corrigeren bij de Eemvallei en de Eemvallei toe te kennen aan het beheergebied van waterschap Vallei en Veluwe.

### Dataset Flevoland

Voor het genereren van een input-bestand waterlijnen hebben we de volgende tabellen gedigitaliseerd:

[https://www.zuiderzeeland.nl/publish/pages/3671/profielcodes\\_legger\\_stedelijk\\_water.pdf](https://www.zuiderzeeland.nl/publish/pages/3671/profielcodes_legger_stedelijk_water.pdf)

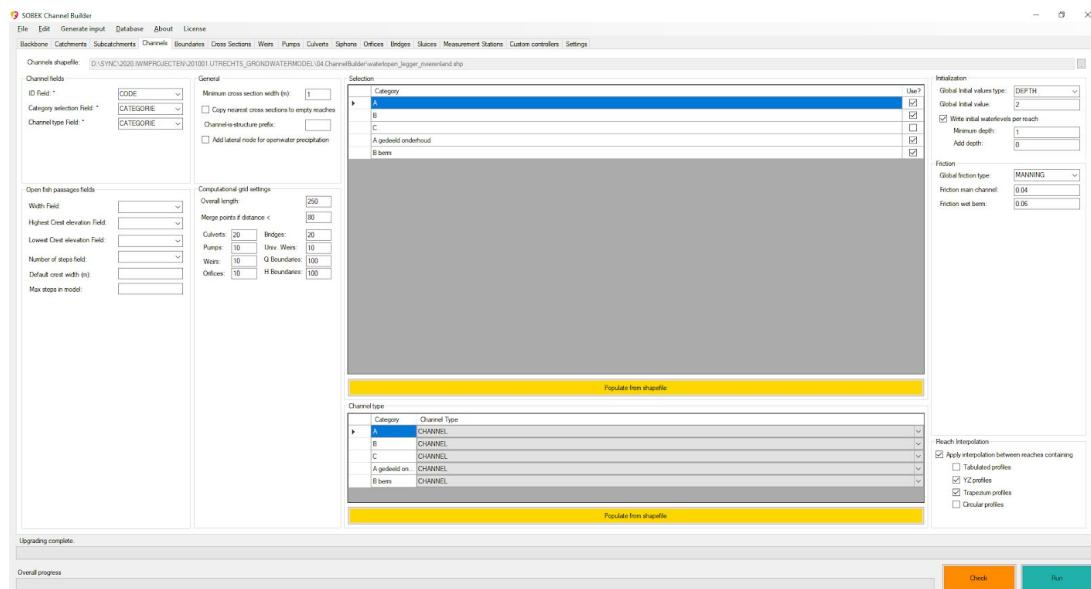
[https://www.zuiderzeeland.nl/publish/pages/3602/leggertabel\\_2.pdf](https://www.zuiderzeeland.nl/publish/pages/3602/leggertabel_2.pdf)

De profielen uit deze tabellen zijn gejoined met de profiel-omschrijving in het aangeleverde ESRI-shapefile lijn-bestand *Profiel.shp*. De namen van de watergangen zijn overgenomen uit het aangeleverde ESRI-shapefile lijn-bestand *watergangen\_shp*.

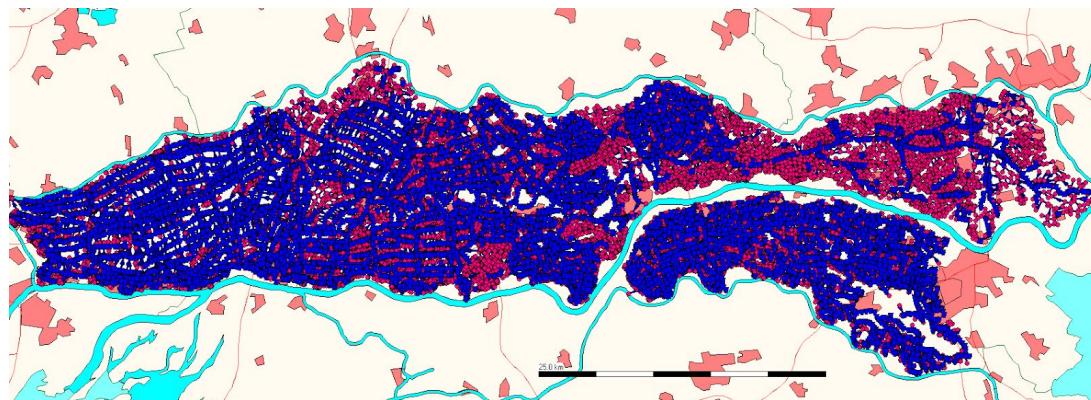
Om de profielen op de juiste hoogte in het maaiveld te hangen is ook het peil relevant. Deze hebben we overgenomen uit het aangeleverde bestand *Peilgebieden Besluit.shp* welke we met een spatial-join hebben samengevoegd met de betreffende lijnen.

## Bodemhoogtes Rivierenland

Voor waterschap Rivierenland zijn geen bodemhoogtes op aslijnen of watervlakken beschikbaar gesteld. We gebruiken de aslijnen uit de legger en de profielhoogtes uit HyDAMO om met behulp van Sobek Tools een 1D sobek model (zie figuren hieronder) af te leiden voor het beheergebied van Rivierenland.



Figuur 2 - Sobek Tools



Figuur 3 - Sobek 1D model

Dit bestand is opgeslagen als *waterlijnen\_20200724.shp*

## Geüniformeerde GIS-bestanden

In deze paragraaf beschrijven we de opbouw van de geüniformeerde GIS-bestanden, aangemaakt door *merge\_sources.py*. In onderstaande tabel staat per waterschap welke bron (zie [Brongegevens](#)) wordt geraadpleegd.

Tabel 3 - link tussen waterschap en brongegevens

Waterschap	Laag	Bron_id
HDSR	peilgebieden	hdsr_peilgebieden
HSK		hsk_peilgebieden
Rivierenland		rivierenland_peilgebieden
Vallei en Veluwe		v&v_GIS
Waternet		waternet_peilgebieden
Zuiderzeeland		zuiderzeeland_peilgebieden
Rijnland		rijnland_peilgebieden
HDSR	Waterlijnen	hdsr_hydro-object
HSK		hsk_legger
Rivierenland		rivierenland_legger
Vallei en Veluwe		v&v_legger
Waternet		waternet_legger
Zuiderzeeland		zuiderzeeland_waterlijnen
Rijnland	Watervakken	rijnland_legger

We illustreren de werkwijze voor een gebied van ongeveer 2 km<sup>2</sup> rondom Haastrecht op de grens van de beheergebieden van Rijnland, HDSR en HSK.

## Watervlakken & waterlijnen

Watervlakken en lijnen kunnen dezelfde attribuut-informatie bevatten t.a.v. de geometrieën van waterlopen. Als voorbeeld; HDSR schrijft alle benodigde attribuut-informatie weg op lijnen (hydro-objecten). Rijnland schrijft alle benodigde attribuut-informatie (ook) weg op watervlakken. HSK heeft deze informatie alleen beschikbaar voor hoofdwatergangen op lijnen.

Tabel 4 - attributen in watervlakken (water\_areas.shp)

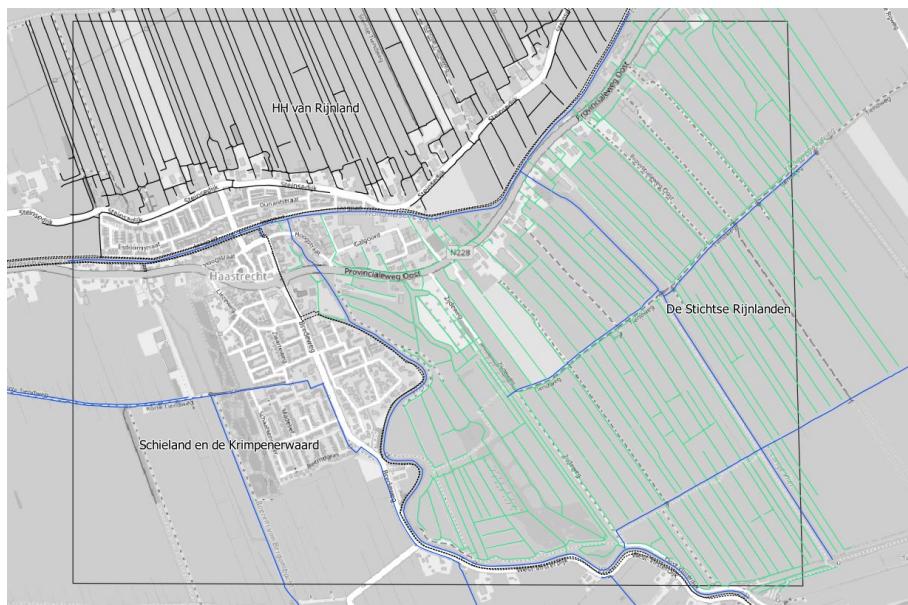
Attribuut	beschrijving	eenheid
admin	naam van het waterschap	-
admin_id	identificatienummer van het waterschap	-

src	bron de feature	-
src_id	id die in het bronbestand aan de feature wordt toegekend	-
BB	Bodembreedte	m
BL	Bodemhoogte	m NAP
CAT	Categorie van het oppervlaktelichaam	-
WD	Waterdiepte	m
SUB	Indicatie of waternaanvoer mogelijk is	-

In volgende figuren geven we een voorbeeld van de categorisering van waterlopen op lijnen en vlakken. Hierbij zijn alle blauwe waterlopen van categorie 1 (primair) en groene waterlopen van categorie 2 (overig). Waar geen informatie beschikbaar is, zijn de waterlopen zwart getekend.



Figuur 4 - Waterloop-categorieën beschikbaar op vlakken



Figuur 5 - Waterloop-categorieën beschikbaar op lijnen

## peilgebieden

Wanneer beschikbaar bij de bron, heeft het peilgebieden-bestand de volgende attributen:

Tabel 5 - attributen in peilgebieden (water-level\_areas.shp)

Attribuut	beschrijving	eenheid
admin	naam van het waterschap	-
admin_id	identificatienummer van het waterschap	-
src	bron de feature	-
src_id	id die in het bronbestand aan de feature wordt toegekend	-
FPB	Flexibel peil bovengrens	m NAP
FPO	Flexibel peil ondergrens	m NAP
VP	Vast peil	m NAP
WFPB	Flexibel winterpeil bovengrens	m NAP
WFPO	Flexibel winterpeil ondergrens	m NAP
WP	Winterpeil	m NAP
ZFPB	Flexibel zomerpeil bovengrens	m NAP
ZFPO	Flexibel zomerpeil ondergrens	m NAP
ZP	Zomerpeil	m NAP

In de figuur hieronder worden de samengevoegde peilgebieden van de drie waterschappen groen omlijnd weergegeven.

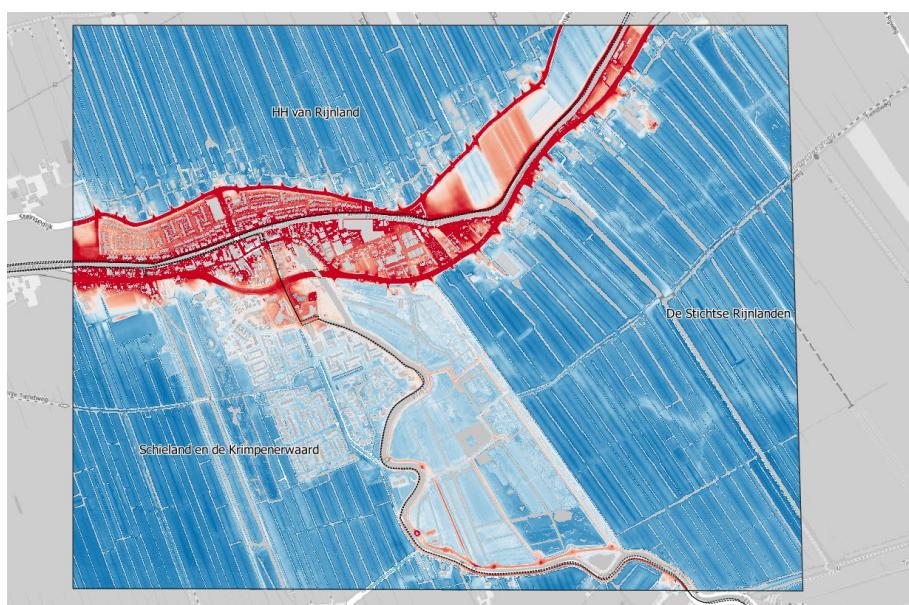


Figuur 6 - Samengevoegde peilgebieden

## AHN3

We downloaden het AHN3 DTM; de laag waarbij niet-maaiveld (bomen, huizen, auto's, etc.) wordt weergegeven als no-data. We downloaden het AHN3 DTM voor het hele projectgebied met een celgrootte van 0.5m x 0.5m. Data wordt opgeslagen als GeoTiff, extreem gecomprimeerd, op cm NAP resolutie. Er worden 5m x 5m en 25m en 25m 'overlays' toegevoegd zodat het bestand snel te openen is in GIS-applicaties (bijvoorbeeld QGIS).

Hieronder is de uitsnede van het AHN3 DTM weergegeven voor Haastrecht.



Figuur 7 - Samengevoegde peilgebieden

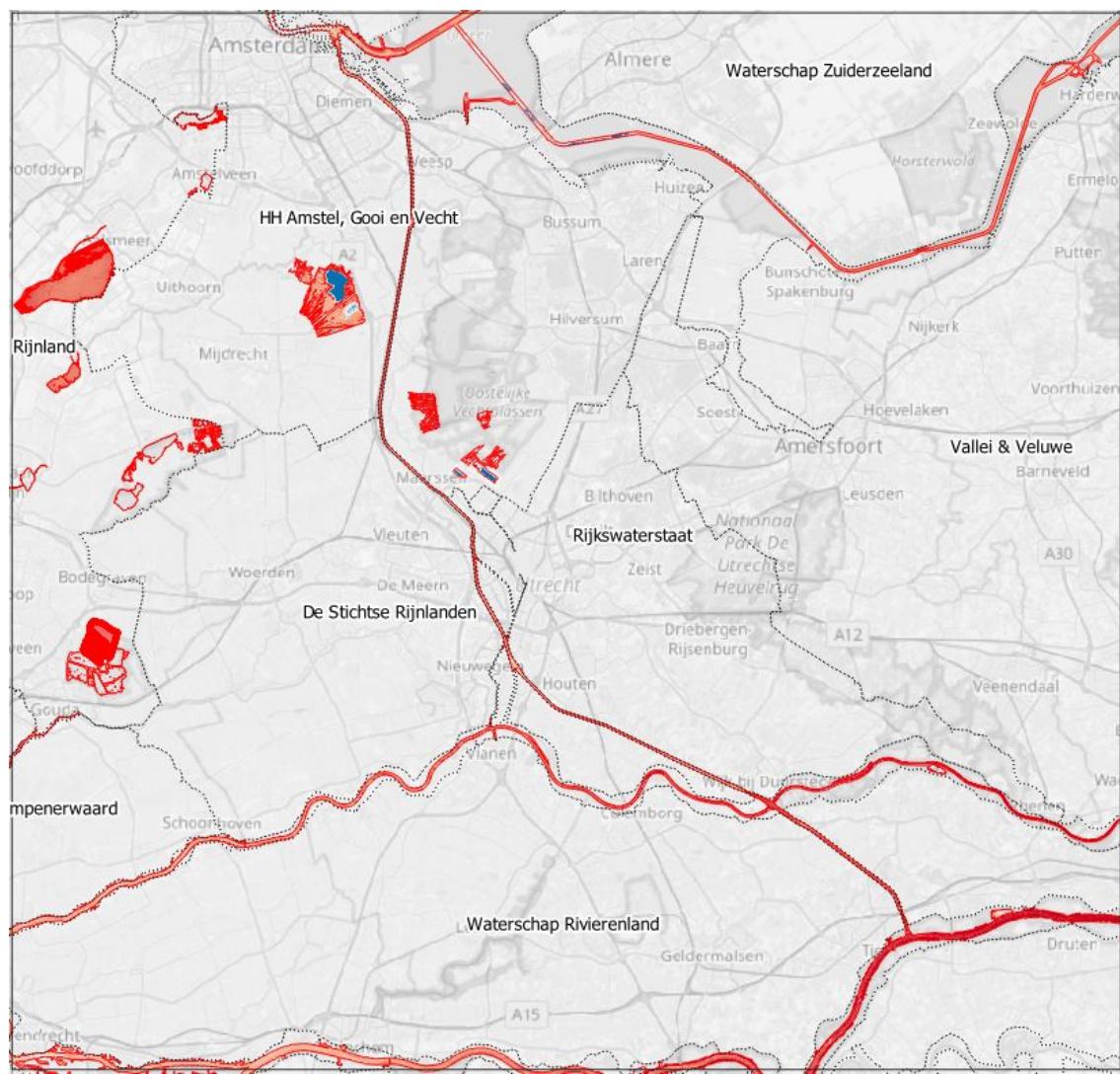
## Bathymetrie & bodemhoogtes

Van een aantal oppervlaktewateren is rasterdata beschikbaar met bodemhoogtes. Bathymetrie-data van rijkswaterstaat is gedownload van <https://bathymetrie.rijkswaterstaat.nl/>.

Van enkele meren van Waternet (Hoogheemraadschap Amstel, Gooi en Vecht) en Rijnland zijn tevens bathymetrie-data geleverd, in raster-formaat of polygon met een gemiddelde en maximale waterdiepte.

Alle data is samengevoegd tot een consistente file-database met:

- *bathymetry\_masks.shp*, waarin de minimale (BL\_MIN) een gemiddelde bodemhoogte (BL\_AVG) of een referentie naar een raster-bestand (FILE) is opgenomen
- Een set GeoTiffs waarin alle data efficient staat opgeslagen in m NAP. Bodemhoogtes van Rijnland, aangeleverd in waterdiepte, zijn hiervoor omgerekend door de waterdiepte van het vigerende zomerpeil af te trekken.



Figuur 8 - Bathymetrie-bestanden voor het projectgebied

## Overzicht

In onderstaand overzicht staat aangegeven per parameter vanuit welke bron deze wordt ingelezen.

Tabel 5 - herkomst attributen waterareas.shp

## ModFLOW invoer

De attributen die beschikbaar zijn als ModFLOW invoer zijn hieronder weergegeven. Alle verplichte attributen worden desnoods met default-waarden ingevuld zodat er altijd voldoende parameters zijn om een ModFLOW model te maken. Alle informatie wordt geprojecteerd op de geometrieën van de watervlakken.

De doorverwijzing naar de originele bronnen en bron-ids is tevens beschikbaar, zodat de oorsprong van de attribuutwaarden kan worden teruggezocht.

Attribuut	beschrijving	verplicht	eenheid
admin	naam van het waterschap	ja	-
admin_id	identificatienummer van het waterschap	ja	-
Z	mediane maaiveldhoogte peilgebied	ja	m NAP
ZP	zomerpeil	ja	m NAP
WP	winterpeil	ja	m NAP
BB	bodembreedte	nee	m
BL	bodemhoogte	ja	m NAP
CAT	categorie van het oppervlaktelichaam	ja	-
SUB	indicatie is aanvoer mogelijk (1/0)	ja	-
has_bath	intersects met bathymetrie (1/0)	nee	-
has_slope	komt voor in het lijnenbestand (1/0)	nee	-
src_wa	bron van het watervlak	ja	-
src_id_wa	originele bron-id van het watervlak	ja	-
src_wla	bron van het peilgebied	ja	-
src_id_wla	originele bron-id van het peilgebied	ja	-
src_wl	bron van de waterlijn	ja	-
src_id_wl	originele bron-id van het waterlijn	ja	-

In volgende figuur het resultaat van de categorisering (1 = primair, 3 = tertiair). Alle watervlakken hebben nu een categorisering meegegeven; die van Rijnland waren al op watervlakken beschikbaar, bij HDSR en HSK zijn ze overgenomen uit de waterlijnen.



## Gegevensvalidatie en defaults

Het oordeel bij elke parameter wordt weggeschreven in *waterareas\_verdict.shp*.

### Controle binnen hydrologische context

#### Peilen (ZP/WP)

Voor streefwaterstanden wordt de volgende controle uitgevoerd

1. is peil > 50% maaiveld in peilgebied, dan twijfelachtig (melding)
2. is peil > 90% maaiveld in peilgebied, dan is deze zeker fout en wordt de waarde gewist

Vervolgens wordt gekeken of zomerpeil hoger of gelijk is aan winterpeil. Is dat niet het geval, dan wordt de data aangemerkt als twijfelachtig

#### Bodemhoogte (BL)

De bodemhoogte (BL) wordt gevalideerd aan median maaiveld (Z), winterpeil (WP) en zomerpeil (ZP), de uitkomsten van de validatie zijn afhankelijk van de categorie watergang

1. is de categorie 1 hoofdwater, dan  $BL < WP < ZP$ . Zo niet, dan is deze onwaarschijnlijk en wordt deze gewist
2. is de categorie onbekend of 2:
  - a.  $BL < Z$ , zo niet, dan wordt deze gewist
  - b.  $BL < WP < ZP$ . Zo niet, dan is de waterloop niet van categorie 2, maar categorie 3 (droge sloot)

#### Bodembreedte (BB)

Bodembreedte (BB) wordt gevalideerd aan een plausibel minimum en het geometrisch oppervlak (A):

1.  $BB > 0.5$ , anders verwijderen
2.  $BB < A / \pi$

### Aanvullen ontbrekende gegevens

#### Peilen (ZP/WP)

Wanneer zomerpeil (ZP) of winterpeil (WP) ontbreken of zijn gewist wegens onwaarschijnlijkheid, dan wordt deze als volgt ingeschat op basis van mediaan maaiveld (Z):

- $ZP = Z - 0.5$
- $WP = Z - 0.7$

#### Bodemhoogte (BL)

Wanneer bodemhoogte (BL) ontbreekt wordt de bodemhoogte relatief ten opzichte van winterpeil (WP) ingeschat. De waarde die van het winterpeil wordt afgetrokken is afhankelijk van de categorie (CAT):

- $BL = WP - 2$  als  $CAT = 1$
- $BL = WP - 1$  als  $CAT > 1$

#### Categorie (CAT)

Wanneer categorie nog ontbreekt na de validatie-stap, wordt deze aangenomen op 2

#### Aanvoer (SUB)

Wanneer het aanvoer-veld (SUB) niet is ingevuld, dan wordt deze aangenomen op 1, wanneer er een variatie is tussen zomer- en winterpeil en de categorie niet 3 is. Is dit niet het geval, dan wordt aangenomen dat aanvoer niet mogelijk is.

# Aanbevelingen

Door het uitvoeren van deze studie komen wij met een aantal aanbeveling:

- **Systematisch controleren validiteit basisgegevens.** In deze studie valideren wij basisgegevens in hydrologische context. Wij bevelen waterschappen aan om vóór de opslag van open data een aantal relatief eenvoudige controles uit te voeren. Dit zijn:
  - Geen data = geen data: Er komen nu vaak -999, 0, 999 of vergelijkbare getallen voor waar de gegevensbeheerder waarschijnlijk geen data heeft. De conventionele aanpak is deze velden leeg te laten.
  - Topologisch correcte bestanden: met name polygonen in open-data vertonen regelmatig gaten, óf zijn overlappend; zie bijvoorbeeld de laag met begrenzing waterschappen. Ook zijn polygonen niet altijd correct weggeschreven; een punt (vertex) ligt bijvoorbeeld binnen het polygon in plaats van aan de rand.
- **Uitbreiden parameters in basisgegevens:** Voor Rivierenland hebben wij aangetoond dat we de bodemhoogte van aslijnen relatief eenvoudig geautomatiseerd weg kunnen schrijven vanuit ingemeten profielen binnen HyDAMO. Wij bevelen aan deze actie niet te herhalen bij de bouw van elk nieuw model, maar dergelijke parameters direct op te slaan in de database zodat deze snel kunnen worden geraadpleegd tijdens de bouw van modellen.
- **Verbetering in hellende gebieden:** Wij lezen nu een peil in voor elk peilgebied die wordt toegekend aan alle watervlakken. Wij bevelen aan dit peil te differentiëren voor hellende gebieden gebruikmakend van de boven- en benedenstroomse bodemhoogtes opgeslagen op aslijnen.
- **Verbeteren detecteren afvoermogelijkheid:** Wij stellen de volgende route voor voor het verbeteren van de inschatting of een water in een watervlak kan worden aangevoerd:
  - Het klaarzetten van een topologisch correct bestand van aslijnen met daarin verwerkt de bodemhoogtes.
  - Het combineren van de aslijnen met inlaat kunstwerken aan de randen afvoergebieden met peilvakken, waarbij we de topologie en de peilvakken kunnen gebruiken om te kijken naar welke watervlakken aangevoerd kan worden.
  - Het combineren van aslijnen en peilvakken met kunstwerken (inclusief sturing) tussen de peilvakken. Op basis van de sturing regels kunnen we met een 1D hydraulisch model bepalen of binnen het huidige waterbeheer daadwerkelijk water aangevoerd wordt naar een watervlak. Met Sobek Tools kunnen we deze informatie wegschrijven op aslijnen, waarna deze toegevoegd kan worden aan watervlakken.

## **Bijlage 3 – Datavalidatie oppervlaktewater**

## Bijlage - validatie resultaten

### Algemene observaties tijdens het bevragen van open data voor UGW

- Niet elke ArcREST service levert een resultaat wanneer je deze vraagt met format GeoJSON. Dit was het geval tijdens gebruik voor deze services:
  - [https://rijnland.enl-mcs.nl/arcgis/rest/services/Polder\\_en\\_peilgebied/Peilvak\\_vigerend\\_besluit/MapServer](https://rijnland.enl-mcs.nl/arcgis/rest/services/Polder_en_peilgebied/Peilvak_vigerend_besluit/MapServer)
  - [https://rijnland.enl-mcs.nl/arcgis/rest/services/Leggers/Legger\\_Oppervlakter\\_Vigerend/MapServer](https://rijnland.enl-mcs.nl/arcgis/rest/services/Leggers/Legger_Oppervlakter_Vigerend/MapServer)
  - [https://services1.arcgis.com/uq8NBKcLHVNmmdmt/ArcGIS/rest/services/Legger\\_Watersysteem/FeatureServer](https://services1.arcgis.com/uq8NBKcLHVNmmdmt/ArcGIS/rest/services/Legger_Watersysteem/FeatureServer)
  - [https://maps.waternet.nl/arcgis/rest/services/AGV\\_Legger/AGV\\_Legger\\_GEO\\_NIS/MapServer](https://maps.waternet.nl/arcgis/rest/services/AGV_Legger/AGV_Legger_GEO_NIS/MapServer)
- Niet elke laag op ArcREST services is ‘netjes’ ingericht met een *Unique ID Field* (meestal OBJECTID) zie bijvoorbeeld (laatst bekeken 18-11-2020):
  - [https://kaarten.wsrl.nl/arcgis/rest/services/Kaarten/Legger\\_Watersysteem/MapServer/13](https://kaarten.wsrl.nl/arcgis/rest/services/Kaarten/Legger_Watersysteem/MapServer/13)

Met een Unique ID veld kan de bevrager de service sneller bevragen, zeker wanneer het aantal op te halen features groter is dan het aantal toegestane features per request. Wanneer geen *Unique ID Field* is gedefinieerd moet de bevrager raden welk attribuut een uniek id heeft naar de features.

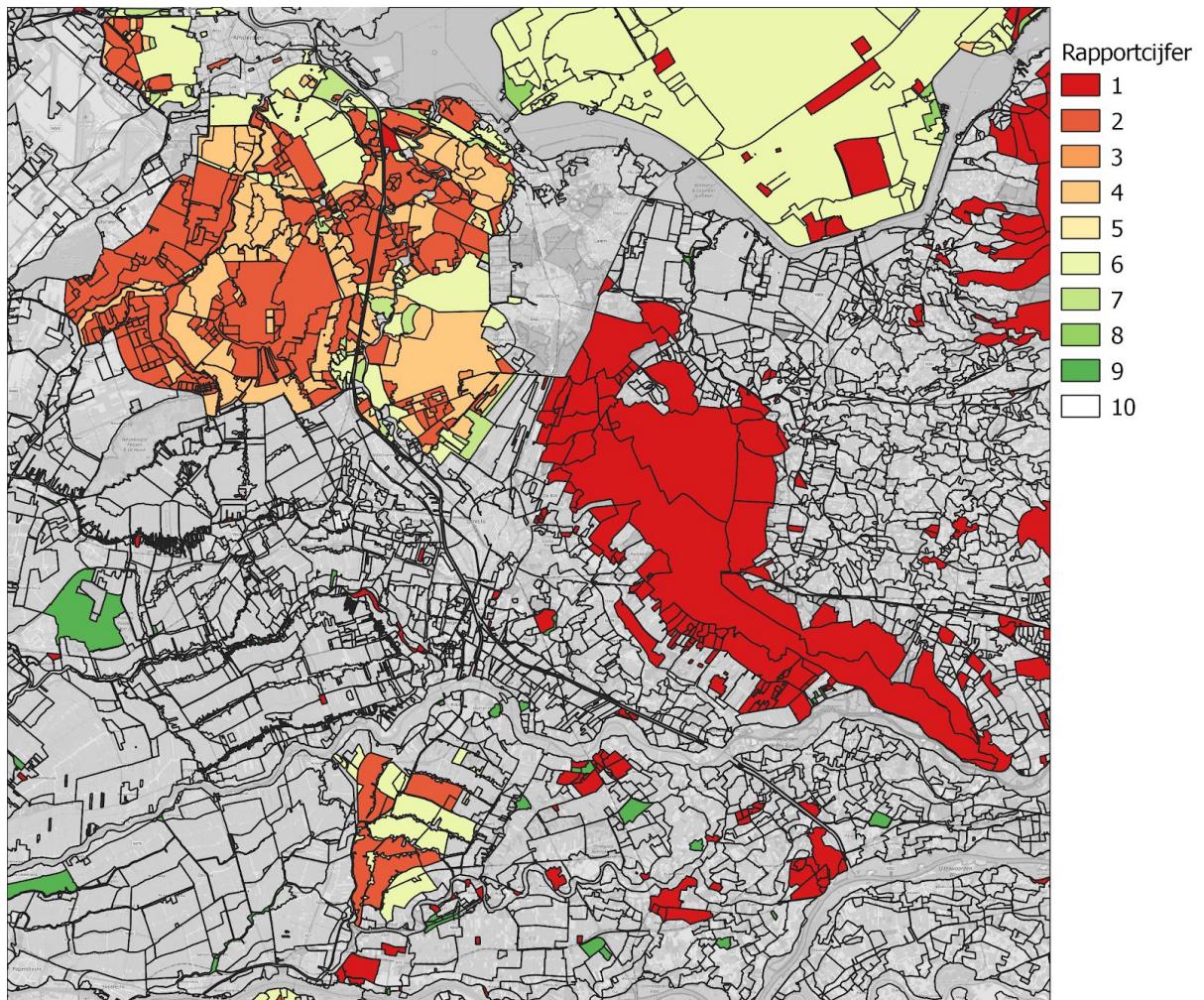
- Geometrie-fouten; bijvoorbeeld vertices (punten) die binnen een polygon liggen. Of peilgebieden die opgemaakt zijn uit een feature collection met een punt (?) én een vlak. Het gebruik van feature collections raden wij af. Een validatie op correcte geometriën valt eenvoudig te controleren binnen Python ([https://geopandas.org/data\\_structures.html](https://geopandas.org/data_structures.html)).
- Topologie-fouten; polygonen uit één laag (bijvoorbeeld peilgebieden) die elkaar overlappen of juist niet aansluiten.
- Nodata = geen data. Heel vaak wordt -999, 0, 999 óf een combinatie van die drie (!) in een laag gebruikt. Dit terwijl je velden ook leeg kunt laden. Dit is verreweg de grootste oorzaak van invalide data.

## Peilvakken

De waarden in de peilvakken zijn op volgende wijze gevalideerd:

1. is peil > 50% maaiveld in peilvak, dan twijfelachtig: melding in validatie-shape
2. is peil > 90% maaiveld in peilvak, dan is deze zeker fout en wordt deze verwijderd
3. is zomerpeil < winterpeil, dan is de data twijfelachtig: melding in validatie-shape

Veel peilvakken hebben feitelijk nodata, vaak weergegeven met een peil van -999, 0 of 999.  
Dit geldt in ieder geval voor de hele Utrechtse Heuvelrug



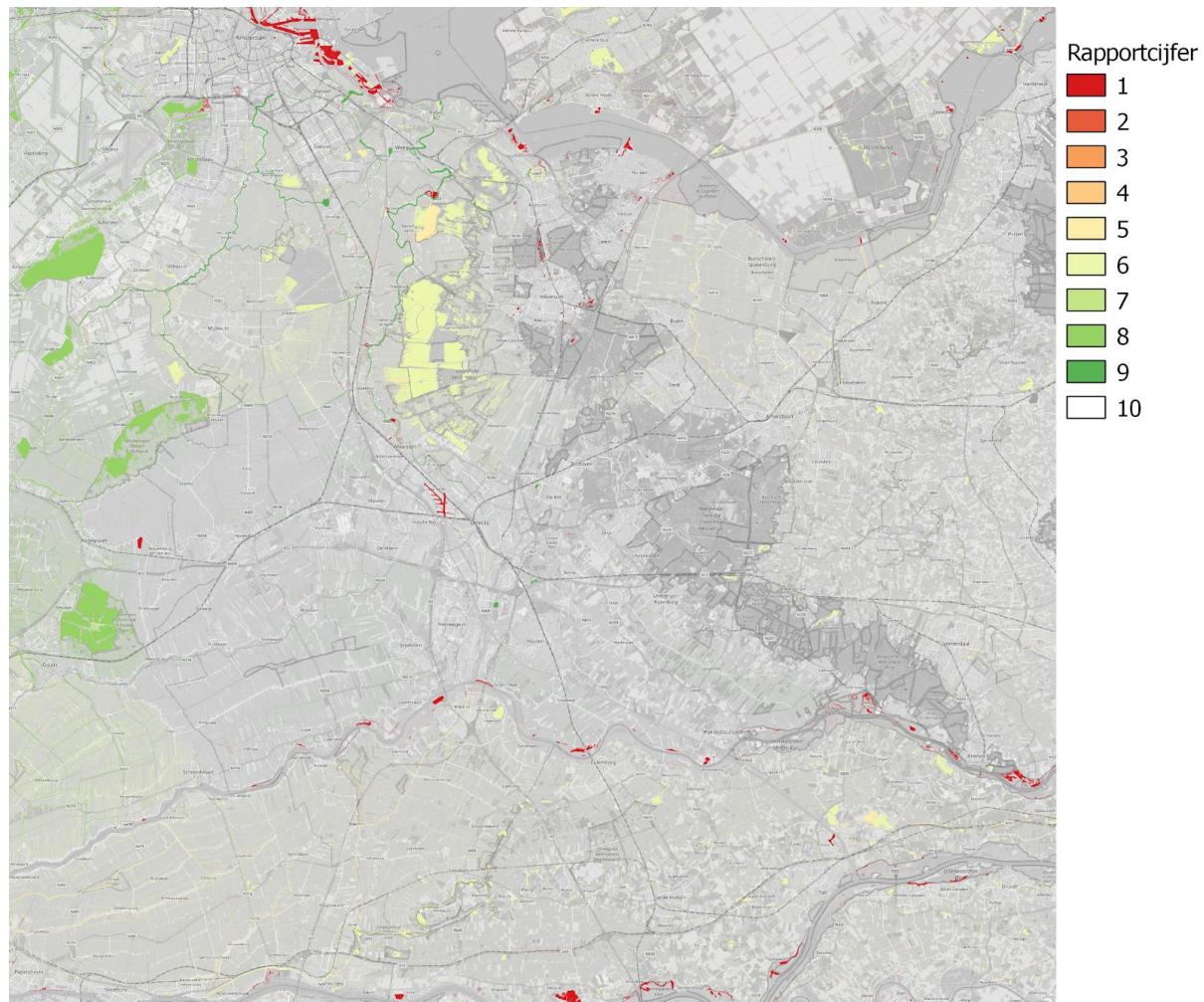
## Watervlakken

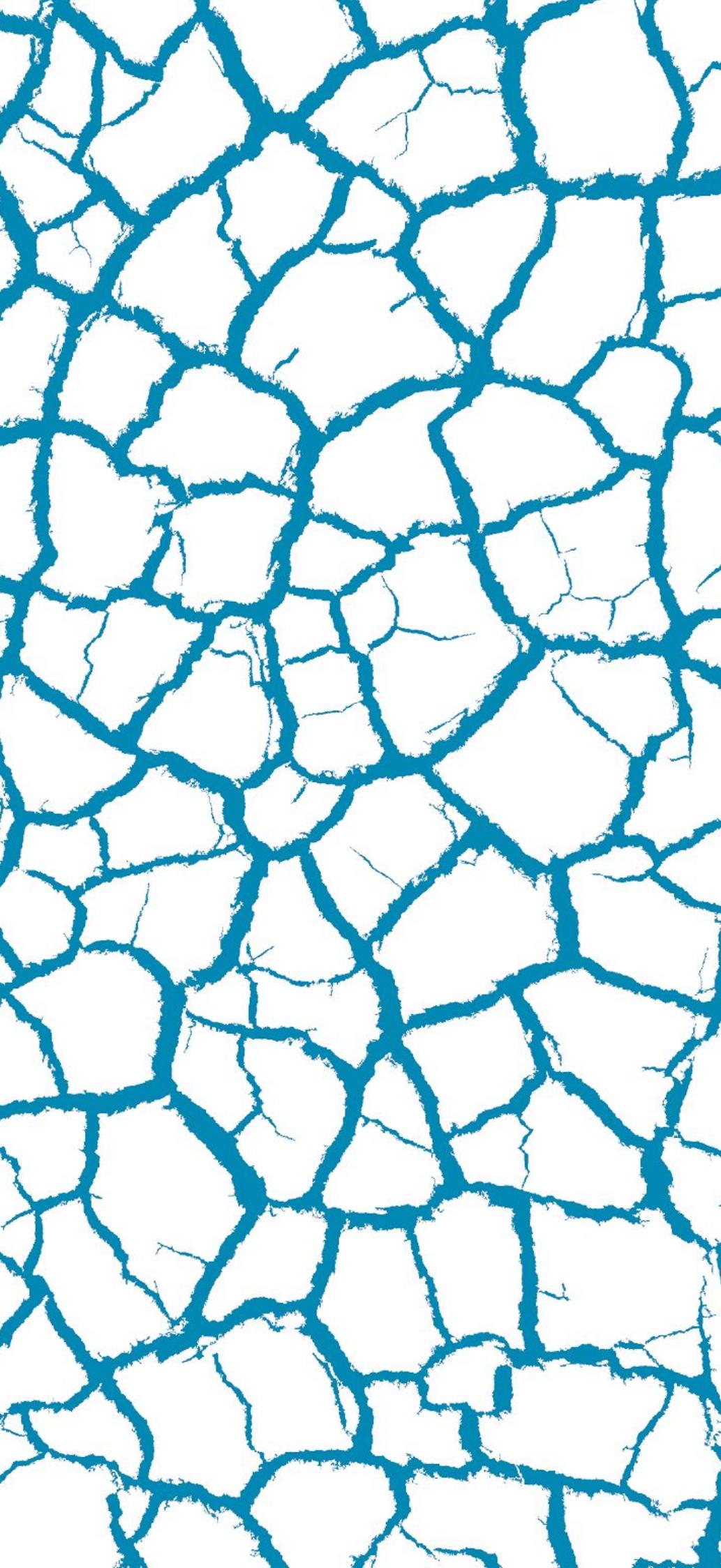
De bodemhoogte (BL) wordt gevalideerd aan de mediaan van het maaiveld geldend voor het peilvak (Z), winterpeil (WP) en zomerpeil (ZP). De uitkomsten van de validatie zijn afhankelijk van de categorie van de watergang

1. is de categorie 1 hoofdwater, dan dient de bodemhoogte lager te zijn dan het winterpeil en het zomerpeil ( $BL < WP < ZP$ ). Zo niet, dan is deze onwaarschijnlijk en wordt deze verwijderd.
2. is de categorie onbekend of 2;
  - a.  $BL < Z$ , zo niet, dan wordt deze verwijderd
  - b.  $BL < WP < ZP$ . Zo niet, dan is de waterloop niet van categorie 2, maar categorie 3 (droge sloot)

Bodembreedte (BB) wordt gevalideerd aan een plausibel minimum en het geometrisch oppervlak (A):

1.  $BB > 0.5$ , anders verwijderen
2.  $BB < A / \pi$





Korte Weistraat 12  
2871 BP Schoonhoven  
Tel: (0182) 387138  
[www.artesia-water.nl](http://www.artesia-water.nl)