

# Modeling Down Under

"Serious simulations" van de klimaatadaptieve stad

Kennisrapportage

Nelen & Schuurmans



29-6-2018



# Modeling Down Under

## "Serious simulations" van de klimaatadaptieve stad

Kennisrapportage

**Voor**  
Kennis- en Innovatieontwikkeling Bodem en Ondergrond  
p/a Rijkswaterstaat  
Postbus 2232  
3500 GE Utrecht

**Nelen & Schuurmans**  
Postbus 1219  
3500 BE Utrecht

[www.nelen-schuurmans.nl](http://www.nelen-schuurmans.nl)

### Projectgegevens

Dossier : R0123  
Datum : 29-6-2018

Niets uit deze rapportage mag worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van de opdrachtgever. Noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd.



## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>4</b>
1.1	Inleiding .....	4
1.2	Doel .....	4
1.3	Leeswijzer.....	4
<b>2</b>	<b>Achtergrond 3Di .....</b>	<b>5</b>
2.1	Aanleiding .....	5
2.2	Modelconcept.....	5
2.2.1	Analytische onderbouwing .....	5
2.2.2	Rekengrid .....	7
2.2.3	Interactie tussen 1D en 2D .....	8
2.2.4	0D-1D koppeling .....	10
2.3	Ontwikkeling grondwatermodule .....	11
2.3.1	Inleiding .....	11
2.3.2	Tweelagenmodel als basisconcept .....	11
2.3.3	Grondwaterparameters .....	13
2.4	Datamodel 3Di .....	13
2.4.1	Modelinvoer .....	13
2.4.2	Modelschematisatie .....	15
2.4.3	Modeluitvoer .....	16
<b>3</b>	<b>Theoretische testprocedures .....</b>	<b>17</b>
3.1	Inleiding .....	17
3.2	Theoretische testen .....	18
3.2.1	Elementaire testen.....	18
3.2.2	Stationaire test.....	18
<b>4</b>	<b>Praktijk- /geïntegreerde test .....</b>	<b>20</b>
4.1	Inleiding .....	20
4.2	Selectie testgebied.....	20
4.3	Beschrijving Prinseneiland (Amsterdam) .....	21
4.3.1	Geschiktheid als testgebied .....	21
4.3.2	Landgebruik en maaiveld .....	22
4.3.3	Bodemopbouw.....	22
4.3.4	Grondwater .....	22
4.4	Schematisatie .....	24
4.5	Randvoorwaarden.....	25
4.5.1	Bovenrandvoorwaarde.....	25
4.5.2	Zijrandvoorwaarden .....	25
4.5.3	Overige randvoorwaarden .....	25
4.5.4	Implementatie randvoorwaarden in het model .....	26
4.5.5	Modelparameters .....	27



4.6	Resultaten.....	27
4.6.1	Stationair model.....	27
4.6.2	Niet-stationair model.....	28
4.6.3	Discussie modelresultaten.....	30
4.7	Modelleerproces.....	31
4.7.1	Losknippen grondwatercomponent.....	31
4.7.2	Vertaling neerslag naar ruimtelijke verdeling grondwateraanvulling (1).....	31
4.7.3	Vertaling neerslag naar ruimtelijke verdeling grondwateraanvulling (2).....	31
4.7.4	Toevoegen mogelijkheid initiële randvoorwaarde.....	32
4.7.5	Mogelijk maken van rekenperiode langer dan 1 dag.....	32
4.8	Visualisatie-/gebruikersomgeving voor de grondwatermodelleur.....	32
4.9	Benadering onverzadigde zone.....	32
4.10	Toepassingsbereik bodemschematisaties.....	34
<b>5</b>	<b>Datamodel.....</b>	<b>39</b>
5.1	Inleiding.....	39
5.1.1	Informatiebeschikbaarheid stedelijke watermodellen.....	39
5.1.2	Beschikbaarheid bovengrondse informatie.....	39
5.1.3	Beschikbaarheid ondergrondse informatie.....	40
5.2	Conceptueel raamwerk datamodel stedelijke ondergrond.....	41
<b>6</b>	<b>Literatuurlijst.....</b>	<b>44</b>
<b>I.</b>	<b>Testoverzicht d.d. 10-11-2017.....</b>	<b>45</b>
<b>II.</b>	<b>Testresultaten.....</b>	<b>47</b>
<b>III.</b>	<b>Overzicht van onverzadigde- zone simulatiemodellen.....</b>	<b>48</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Inleiding

In 2016 is vanuit het convenant Bodem en Ondergrond een budget van €2,8 miljoen beschikbaar gesteld voor kennis- en innovatieprojecten. In het voorjaar is de eerste uitvraag gedaan en begin september zijn er acht gegunde projecten bekendgemaakt. Het project “Modeling Down Under - ‘Serious simulations’ van de klimaatadaptieve stad” is één van die gegunde projecten. De procesmatige invulling van dit project is vastgelegd in voorliggende eindrapportage. De technische invulling van dit project is vastgelegd in de bijbehorende kennisrapportage.

Doel van het project was het vergroten van de watersysteemkennis van het stedelijke gebied – zowel boven- als ondergronds – om een integrale benadering van wateroverlast mogelijk te maken. De opgedane kennis van het grondwatersysteem is door dit project technisch verankerd door een uitbreiding van het modelinstrumentarium 3Di. Hierdoor is de (grond)watersysteemkennis op een laagdrempelige en heldere manier toegankelijk voor de expert (bijvoorbeeld een hydroloog) en de niet-expert (bijvoorbeeld een bestuurder).

Technische informatie over het modelinstrumentarium 3Di en de uitbreiding van 3Di met het grondwaterdomein is opgenomen in voorliggende kennisrapportage.

## 1.2 Doel

Het doel van de kennisrapportage is tweeledig:

1. Vastleggen van de technische uitbreiding van 3Di met grondwater inclusief onderbouwing van de keuzes
2. Opstellen van generiek stedelijk datamodel waar relevante meet- en monitoringsgegevens van stedelijk watersysteem en ondergrond zijn opgenomen

## 1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 staat de achtergrond van het modelinstrumentarium 3Di en de uitbreiding van dit instrumentarium met grondwater beschreven. Hoofdstuk 3 beschrijft de theoretische testprocedures die zijn toegepast in de totstandkoming van dit instrumentarium. Vervolgens worden de geïntegreerde en praktijktesten beschreven waarmee 3Di Grondwater is toegepast op een bestaande situatie (Hoofdstuk 4). Tot slot geven we een eerste aanzet voor een generiek datamodel voor de stedelijke ondergrond (Hoofdstuk 5).

Hoofdstuk 1, 2 en 3 zijn geschreven door Nelen & Schuurmans. Hoofdstuk 4 en 5 zijn geschreven door Deltares.



## 2 Achtergrond 3Di

### 2.1 Aanleiding

3Di is een modelinstrumentarium dat gebruikt kan worden om oppervlaktewater, grondwater (ontwikkeld binnen voorliggend project) en stroming over het maaiveld te simuleren, als gevolg van hevige neerslag. Het is ontwikkeld door het consortium Deltares, Technische Universiteit Delft, Stelling Hydraulics en Nelen & Schuurmans. 3Di sluit aan bij de trend van het beschikbaar komen van steeds gedetailleerdere datasets van meetgegevens, bijvoorbeeld van de maaiveldhoogte (digital elevation models). Verder is het mogelijk uitgebreide data analyses (Big Data) te betrekken in watersysteem studies.

Doordat het koppelingen maakt tussen 0D, 1D en 2D netwerken, heeft het instrumentarium een hoger detailniveau dan conventionele modellen, maar behoudt het een korte rekensnelheid door slim programmeren. 3Di omvat 2D-componenten als neerslag-afvoer, wind, oppervlakkige afstroming, grondwaterstroming en 1D-elementen als stroming door kanalen en stroming door riolering.

De modelresultaten visualiseren de gevolgen van neerslag als een ruimtelijk beeld (2D) van de hoeveelheid water op elk moment in de tijd. Dit maakt het een sterk communicatiemiddel, zonder dat daar een hydrologische kennisbasis voor nodig is.

### 2.2 Modelconcept

#### 2.2.1 Analytische onderbouwing

De basis van de hydrodynamische berekeningen in 3Di wordt gevormd door de ondiepwatervergelijkingen. Dit stelsel van vergelijkingen is een aangepaste variant van de Navier-Stokes vergelijkingen en bestaat uit een continuïteits- en impulsvergelijkingen. 3Di wordt voornamelijk toegepast in situaties waar de horizontale lengteschalen veel groter zijn dan de verticale lengteschalen. Dit geldt voor overstromingen, maar ook voor modellering van rivieren en estuaria. Voor dit type toepassingen is de variatie van snelheden in de diepte en de verticale snelheden te verwaarlozen. Voor de relatief beperkte gebiedsgrootte van de meeste studiegebieden geldt dat het effect van draaiing van de Aarde (Coriolis effect) en horizontale diffusie klein is. Op basis van deze aannames zijn de ondiepwatervergelijkingen afgeleid.

3Di modellen kunnen uit 0D, 1D en/of 2D componenten zijn opgebouwd. Meestal wordt het grootste deel van een modelgebied gemodelleerd in 2D. Daaraan toegevoegd zijn watergangen waarin kunstwerken liggen, welke in de vorm van 1D componenten aan het systeem worden toegevoegd. De koppeling tussen het 1D en 2D domein vindt plaats in de continuïteitsvergelijking. Daarom nemen we de continuïteitsvergelijking als uitgangspunt om de verschillende modelfacetten 3Di toe te lichten. Voor een meer technische verhandeling van het hydrodynamische model van 3Di verwijzen we naar de volgende artikelen: Casulli (2009), Stelling (2012), en Volp et al. (2013).



### Continuïteitsvergelijking

De continuïteitsvergelijking is een volumebalans die per waterstandsdomein wordt opgelost. Door de toevoeging van grondwater krijgt elke rekencel twee waterstandsdomeinen. In de volumebalans worden alle volumes die een domein in- en uitgaan bijgehouden:

$$\frac{\partial V(\zeta)}{\partial t} = \sum_{i=1}^I Q_i + S_{reg} + S_{inf} + S_{lat} + S_{grw}$$

Hierin geeft  $t$  de tijd aan.  $V$  is het volume binnen het waterstandsdomein en  $\zeta$  is de lokale waterstand. De term  $\sum Q_i$  is een sommatie van alle in- en uitgaande debieten. Per domein kan het aantal ( $I$ ) debieten variëren. Dit hangt af of het een 1D of 2D domein is, eventuele splitsingen in een 1D domein en/of er 1D-2D verbindingen zijn, et cetera. De laatste vier termen zijn zogenaamde bron- of puttermen. Dit zijn debieten welke in of uit het domein gaan door regen ( $S_{reg}$ ), infiltratie ( $S_{inf}$ ), puntbronnen ( $S_{lat}$ ) en eventueel grondwater ( $S_{grw}$ ).

### Impulsvergelijking

De in- en uitgaande debieten in een waterstandsdomein worden bepaald op basis van de impulsvergelijking. De impulsvergelijking bepaalt een snelheid ( $u_i$ ). Samen met de lokale doorsnede ( $A_i$ ) geeft dit een debiet:

$$Q_i = u_i A_i$$

De exacte vorm van de impulsvergelijking varieert voor de verschillende type verbindingen:

#### 2D - 2D verbindingen

De impulsvergelijking voor de 2D-2D verbindingen ziet er als volgt uit:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - c_f |\mathbf{u}| u + a_w$$

Hierin is  $x$  de richting van de verbinding en  $y$  de richting die daar loodrecht op staat. De snelheid  $v$  is de snelheidscomponent loodrecht op de snelheidscomponent betreffende deze verbinding. De lengte van de totale snelheidsvector, bestaande uit de twee componenten, is  $|\mathbf{u}|$ . De zwaartekrachtsversnelling is  $g$  en  $c_f$  is de wrijvingscoëfficiënt. De diepte is  $H$ . Van links naar rechts zijn dit termen voor de versnelling, advectie (twee maal), forcering door druk, wrijving en een windforcering.

De aanwezigheid van het subgrid, waardoor de bodemvariatie op hoge resolutie kan worden meegenomen, betekent onder andere dat de diepte  $H$  niet uniform binnen is binnen een waterstandsdomein. De variatie van de diepte speelt ook een belangrijke rol voor de wrijving en de windforcering. Deze effecten zijn bijvoorbeeld meegenomen in de bepaling van het natte oppervlak waar wind kan aangrijpen. Voor de wetenschappelijke onderbouwing hoe deze vergelijking binnen 3D wordt afgehandeld verwijzen we naar Stelling (2012), en Volp et al. (2013).



### 1D - 1D verbindingen

Voor de 1D-1D verbindingen wordt de 1D variant van de ondiepwatervergelijkingen opgelost. Dit betekent dat deze niet alleen dieptegemiddelde snelheden geven, maar ook gemiddeld zijn over de breedte. In principe wordt er geen onderscheid gemaakt in de afhandeling voor riolerings-elementen en elementen van open water op een paar uitzonderingen na. De 1D impulsvergelijking is:

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial u_s}{\partial s} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial s} - c_f |u_s| u_s + a_w$$

Hier geeft  $s$  de richting aan van het 1D element. In 1D is de snelheid  $u_s$  per definitie in dezelfde richting als het 1D element. Voor de advectieve snelheid  $\tilde{u}$  geldt dat er rekening wordt gehouden met eventuele aanwezige splitsingen in het stelsel en met locaties waar zich extra bergingsruimte bevindt, zoals bij putten in de riolering. Bij splitsingen wordt er rekening gehouden met de hoek tussen de splitsingen en bij locaties met berging wordt er rekening gehouden met eventuele stromingsverlamming.

### 1D - 2D verbindingen

De 1D-2D verbindingen worden afgehandeld als een bijzondere vorm van een 1D-1D verbinding. Deze verbindingen zijn dus in essentie ook 1D, maar vormen een verbinding tussen het 1D element en het 2D domein. Dit is terug te zien in de impulsvergelijking:

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial s} - \tilde{c}_f |u_s| u_s$$

De advectieve term wordt verwaarloosd, omdat er over de lokale omstandigheden van deze verbinding te weinig bekend is om deze nauwkeurig mee te nemen. De wrijvingscoëfficiënt  $\tilde{c}_f$  wordt gebaseerd op gegevens in het 2D domein. Op deze verbinding vindt geen windforcering plaats. Het oppervlak waar wind zou kunnen aangrijpen is al verdisconteerd op de 1D verbinding zelf en in het 2D domein.

De doorsnede  $A_i$  om het debiet van deze verbinding te bepalen hangt af van of het putoppervlak of van de lengte van het 1D element in het 2D domein, de oeverhoogte en de waterstanden.

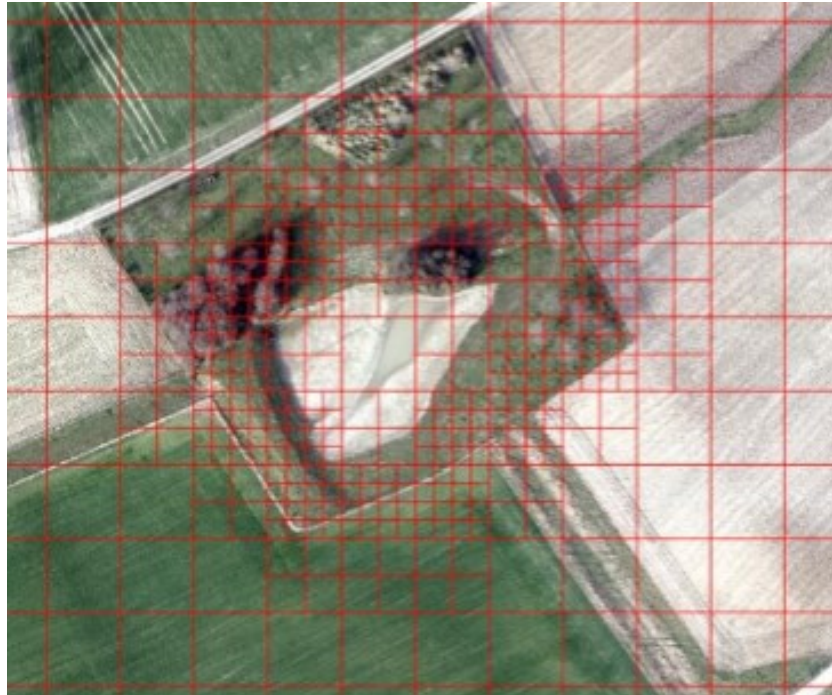
#### 2.2.2 *Rekengrid*

De waterbeweging wordt uitgerekend in een subgrid-gebaseerd model. Dit houdt in dat er meerdere rekenrasters (grids) worden gebruikt. In het geval van 3Di is dat een informatieraster en een rekenraster.

Het informatieraster heeft een uniforme resolutie: Doorgaans zijn de pixels in dit zogeheten subgrid 0,5 x 0,5 m. Het rekenraster bestaat uit cellen van verschillend formaat (maar altijd groter dan het informatieraster), om bepaalde gebieden nauwkeuriger te kunnen doorrekenen dan andere. Op deze manier waarborgt het model het hoge detailniveau waar dat nodig is en relevant is, maar behoudt het ook z'n rekensnelheid.

De verfijning van het rekenraster wordt in het model verwerkt via de *quadtree* methode. Hierbij worden rekencellen stapsgewijs verfijnd (Figuur 2-1). Aangrenzende cellen kunnen met de *quadtree* methode maximaal een factor vier in oppervlakte verschillen.





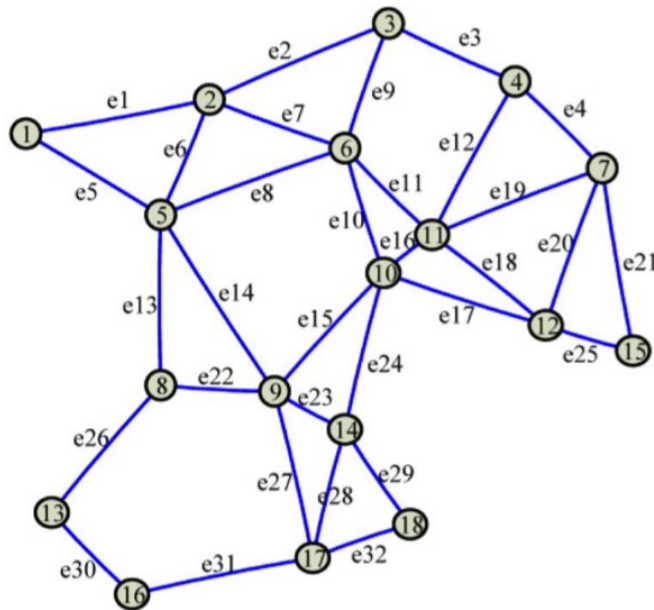
Figuur 2-1 Voorbeeld van een verfijnd rekenraster bij een regenwaterbuffer

De keuze voor de grootte van de rekenzellen en de locaties van verfijning verschilt per scenario. Het kan bijvoorbeeld interessant zijn om bebouwd gebied nauwkeuriger te bekijken dan omliggend landelijk gebied. Naast het uitlichten van studiegebieden of locaties met hogere prioriteit, is het ook van belang om gebieden waar stroming sterk in de ruimte varieert, fijnere cellen toe te kennen dan gebieden met relatief uniforme stroming.

De keuze voor verfijning hangt echter altijd samen met een langere rekentijd. In de praktijk geldt dat twee keer zoveel cellen resulteert in een viermaal langere rekentijd. Daartegenover staat een hogere resolutie en daardoor meer realistische resultaten.

### 2.2.3 *Interactie tussen 1D en 2D*

Een 3Di model biedt de mogelijkheid om stroming te simuleren in 1D en 2D. Een 1D netwerk bestaat uit knopen en takken (Figuur 2-2). Elke knoop heeft een rekenpunt. Daarnaast worden extra rekenpunten gegenereerd op de takken, op basis van het vooraf opgegeven detailniveau. Een knoop heeft verschillende eigenschappen, zoals een bodemhoogte, een uitwisselingshoogte en een oppervlak. Een knoop kan een openwaterknoop of rioolknoop zijn. Een tak kan een open watertak, riooltak, lange overlaat, generiek kunstwerk (korte overlaat, doorlaat, duiker, brug) of pomp zijn.

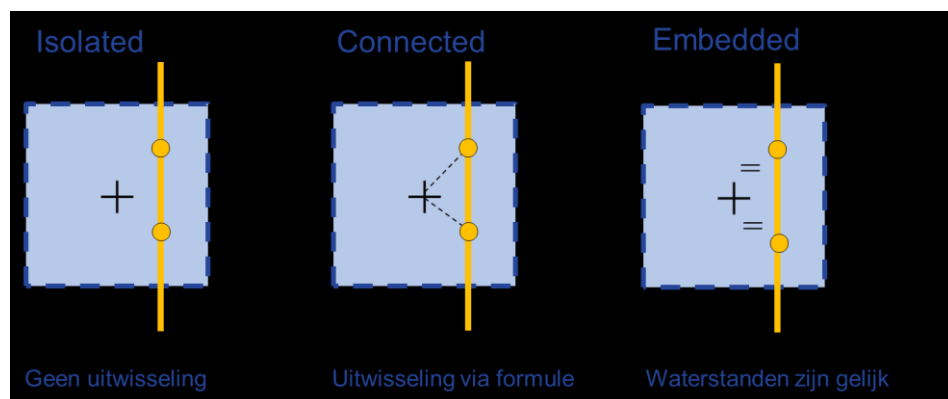


Figuur 2-2 Voorbeeld van een 1D netwerk, bestaande uit knopen en takken

Het gebruik van de 1D elementen is zinvol bij riolering of bij smalle watergangen, die een belangrijke functie vervullen in het grotere systeem. De toevoeging van deze watergangen is essentieel wanneer er kunstwerken zoals overlaten en duikers zijn.

De uitwisseling tussen 1D en 2D gebeurt via de rekenpunten: "Connected" of "Embedded". In het geval dat er geen uitwisseling plaatsvindt, is het rekenpunt van het type: "Isolated".

Hieronder staan de verschillende typen weergegeven (Figuur 2-3):



Figuur 2-3 Uitwisseling tussen 1D en 2D

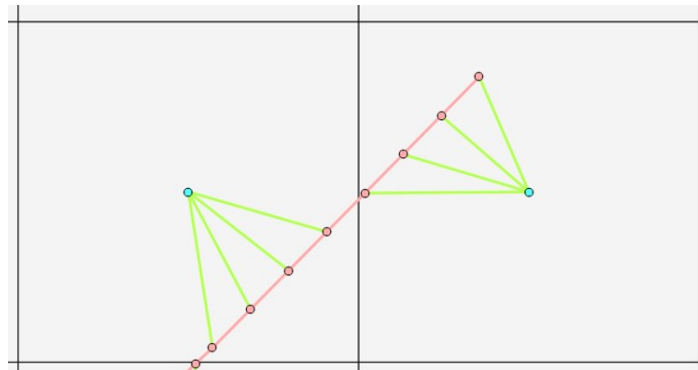


### Isolated

Bij rekenpunten die “isolated” zijn, vindt er geen uitwisseling plaats tussen 1D en 2D. Dit is bijvoorbeeld van toepassing bij een persleidingstelsel van de riolering.

### Connected

Bij een waterloop met “connected” rekenpunten wordt er een virtuele verbinding gelegd tussen het waterstandspunt behorende tot een 1D tak en het waterstandspunt behorende tot de 2D rekencel waar de tak doorheen loopt (Figuur 2-4). Voor elke verbinding wordt er een drempelwaarde opgegeven. Als de waterstand boven deze waarde komt, wordt de verbinding ‘actief’ en vindt er stroming plaats.



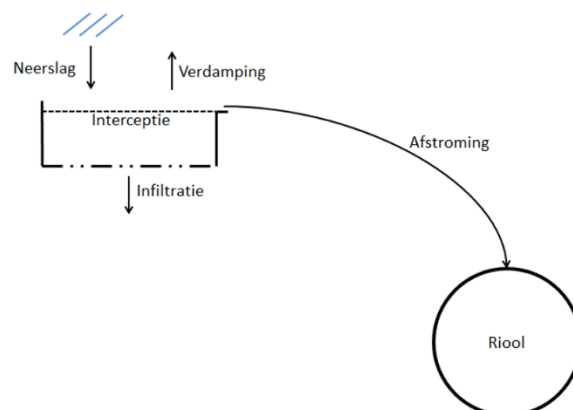
Figuur 2-4 Verbindingen tussen waterstandspunten in een 1D-kanaal (roze) en 2D rekenpunten (blauw) in twee rekencellen (zwart). Het debiet tussen de punten wordt berekend op basis van de diffusiebenadering

### Embedded

Bij een rioleringstelsel worden de gemengd gerioleerde putten meestal gemodelleerd als “embedded” rekenpunten. Dan gelden de 2D waterstandspunten ook als 1D rekenpunten. De waterstand in de 1D put is daarmee per definitie gelijk aan de 2D rekenpunt in de rekencel. Hierdoor kan het water dat uit de riolering komt (ook wel water-op straat genoemd) over het maaiveld uitstromen.

#### 2.2.4 0D-1D koppeling

In 3Di is het mogelijk om oppervlakken als 0D-bakje mee te nemen. Deze oppervlakken (waar neerslag op valt) worden gekoppeld aan een gemengde of regenwaterleiding op basis van de kortste afstand. Met het inloopmodel van de Nationale Werkgroep Riolering en Waterkwaliteit (NWRW 4.3.1-inloopmodel, 1989) wordt de afstroming naar het 1D netwerk beschreven (Figuur 2-5).



Figuur 2-5 NWRW-inloopmodel



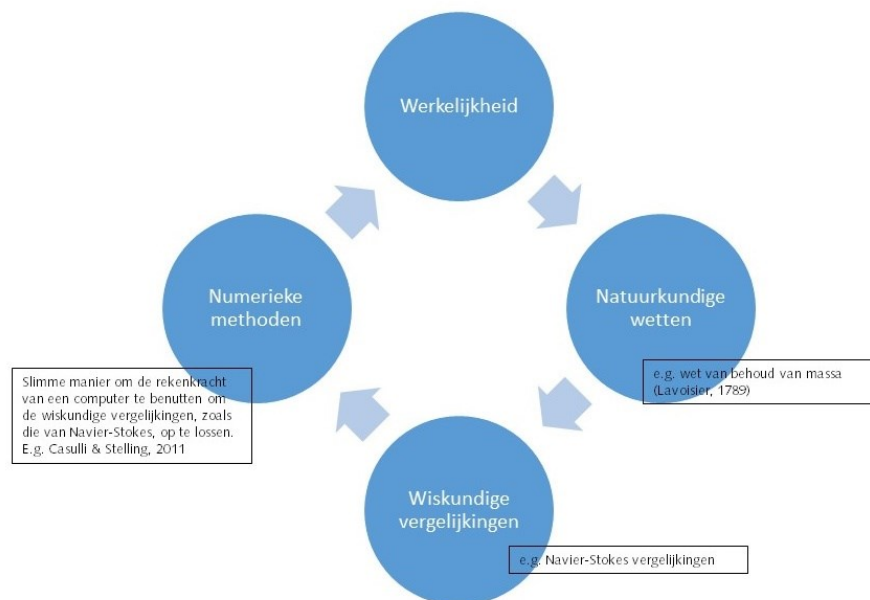
## 2.3 Ontwikkeling grondwatermodule

### 2.3.1 Inleiding

Dit onderzoek toont voor het eerst de numerieke afhandeling van de volgende processen in de bodem en ondergrond met de subgridmethodiek (Figuur 2-6):

- › Interactie tussen en modellering van de bovengrond en ondergrond (interflow), in twee delen:
  - Snelle afvoer van water op het grensvlak van bovengrond en ondergrond, dus stroming tussen graspollen, tegels etc.
  - Als de ondergrond volledig verzadigd is (met behulp van Darcy).
- › Tijdsafhankelijke Hortoniaanse infiltratie (van 'interflow' naar grondwater) en maximale berging in de ondergrond.
  - Antwoord op de vraag: In hoeverre beïnvloedt de trage afstroming de regenafvoer? Deze vraag gaan we niet beantwoorden.

Interactie tussen de maaiveldstroming (overland flow), indien relevant de snelle afvoer (interflow), en de trage afvoer (infiltratie) naar de ondergrond.



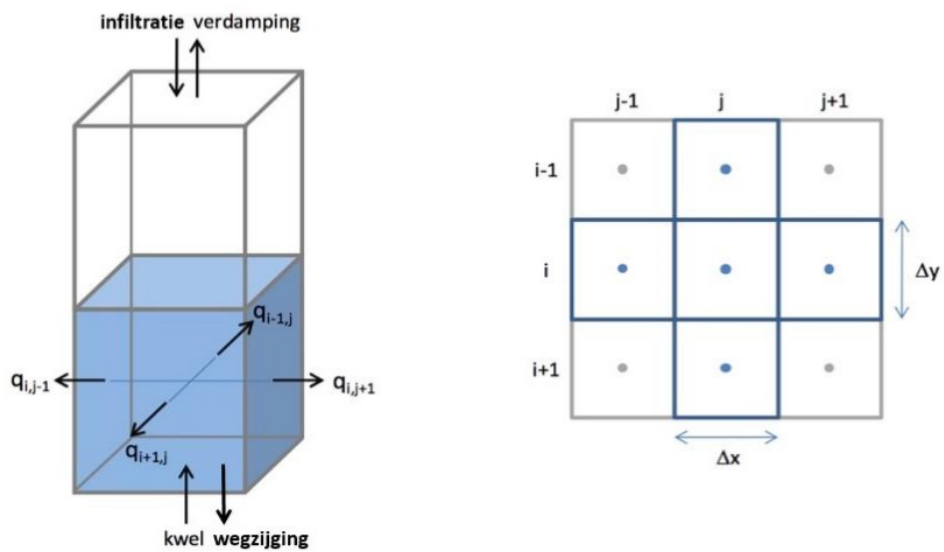
Figuur 2-6 Vertaalslag van de werkelijkheid via natuurkundige wetten, wiskundige vergelijkingen en numerieke methoden in een model dat de werkelijkheid representeert.

### 2.3.2 Tweelagenmodel als basisconcept

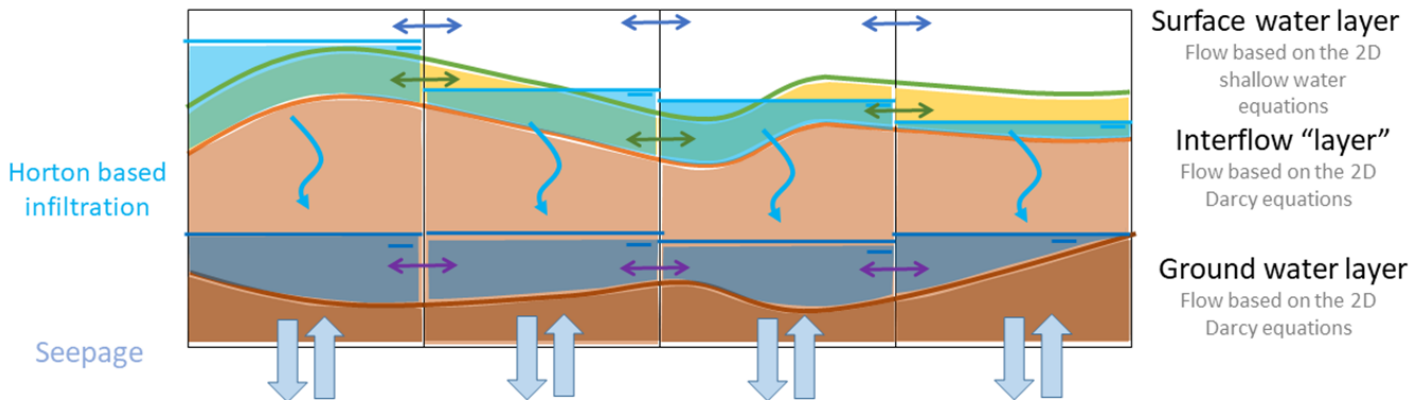
Het basisconcept voor de grondwatercomponent van 3Di is een tweelagenmodel. Er wordt één volumebalans opgesteld voor het volledige model. Er zijn dus geen iteraties nodig tussen de twee lagen.

Met de toevoeging van grondwater aan het modelinstrumentarium 3Di heeft iedere rekencel naast een 2D waterstandspunt ook een 2D grondwaterstandspunt (Figuur 2-7 en Figuur 2-8).

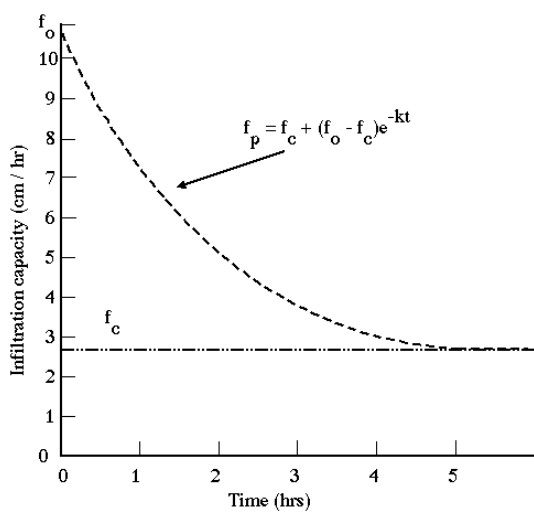
Wanneer het grondwater stijgt en uiteindelijk aan het oppervlak komt, worden de waterstand en de grondwaterstand gelijkgetrokken, maar de rekenrasters blijven gescheiden.



Figuur 2-7 Horizontale grondwaterstroming in een 2D rekenrooster



Figuur 2-8 Oppervlaktewaterlaag, interflowlaag en grondwaterlaag in combinatie met waterstandspunten



Figuur 2-9 Infiltratie volgens Horton

De bovenste ondergrondlaag is de interflowlaag. Deze ontvangt en bergt (hemel-)water van boven op basis van een volumebalans. De laag daaronder is de grondwaterlaag.



Deze ontvangt water vanuit de interflowlaag of vanaf het maaiveld conform de infiltratietheorie van Horton. Volgens Horton heerst aan het begin van de bui een hoge infiltratiecapaciteit, en neemt deze tijdens de bui af tot een stationair eindniveau (Figuur 2-9).

Praktisch kan het interflowconcept worden beschouwd als een stagnatie van het in de bodem infiltrerende regenwater op een overgang van een relatief goed naar een relatief slecht doorlatende bodemlaag. Afhankelijk van de kenmerken van de ondergrond kan deze overgang op verschillende diepten liggen. Een mogelijke fysieke voorstelling van een interflowlaag gaat uit van een goed doorlatende bovenste bodemlaag als gevolg van bodembewerking, open verharding, graafgangen, doorworteling enzovoort. Een mogelijk fysieke voorstelling van een grondwaterlaag gaat uit van een oorspronkelijke, homogene bodemmatrix van zand, klei of veen. De interflowlaag kan desgewenst achterwege worden gelaten. De Horton-overgang komt dan op het maaiveld te liggen.

### 2.3.3 *Grondwaterparameters*

De sturende 3Di modelparameters in dit grondwaterconcept zijn (1) de infiltratiecapaciteit en Hortonparameters, (2) de bergingscoëfficiënt van de bodem, en (3) de horizontale doorlatendheid die de uitwisseling tussen naburige cellen in beide lagen bepaalt.

Ad. 1. De infiltratiecapaciteiten van de bebouwde, verharde en onverharde gebiedsdelen beïnvloeden de grondwateraanvulling via het maaiveld. De grondwateraanvulling via het maaiveld wordt in 3Di geparameteriseerd met de vergelijking voor 'Hortonian overlandflow'. Is het water eenmaal de Horton-grens gepasseerd, dan vult het direct de grondwaterstand aan. Met dit concept worden processen in de onverzadigde zone, zoals berging van bodemvocht, opname door plantenwortels en capillaire opstijging, buiten beschouwing gelaten. In Bijlage III is een beschouwing opgenomen van de actuele stand der wetenschap met betrekking tot het modelleren van de onverzadigde zone en de positie die de theorie van Horton daarin inneemt.

Ad. 2. De bergingscoëfficiënt bepaalt hoe snel het grondwater stijgt onder invloed van een bepaalde grondwateraanvulling. De bergingscoëfficiënt is niet constant in de tijd en is afhankelijk van het bodemvochtgehalte aan het begin van een bui.

Ad. 3. De horizontale grondwaterstroming tussen twee grondwaterstandspunten wordt berekend met de formule van Darcy. De horizontale doorlatendheid speelt hierin een belangrijke rol.

## 2.4 **Datamodel 3Di**

### 2.4.1 *Modelinvoer*

3Di vraagt de volgende informatie als modelinvoer:

- › 0D modelgegevens (Shapefile – polygon)
- › 1D modelgegevens (Spatialite GIS database)
- › 2D modelgegevens (GeoTIFF-formaat)
- › Speciale objecten in 2D



## 0D modelgegevens

In de 3Di modelschematisatie kan gebruik worden gemaakt van een hybride inloopmodel, waar een combinatie wordt gemaakt van 0D-inloop en 2D-inloop. Met hybride inloop krijg je het 'beste van twee werelden'. Water van de daken stroomt direct in de riolering als 0D en de afstroming over maaiveld wordt in detail als 2D meegenomen.

Om de oppervlakken die via het NWRW-inloopmodel af moeten voeren naar de 1D riolering moet er een polygon shapefile met in de tabel de typologie vanuit het NWRW worden geïmporteerd naar de modeldatabase. Om dubbeltelling van het afvoerende oppervlak te voorkomen worden deze NWRW-oppervlakken uit de 2D-rasters verwijderd.

## 1D modelgegevens

Het 1D netwerk is opgebouwd uit knopen en takken. Knopen en takken krijgen extra eigenschappen afhankelijk van het type. Omdat invoergegevens van riolering en openwater vaak verschillen is hieronder onderscheid gemaakt.

In een *rioleringsmodel* zitten inspectieputten als knopen met een bergend oppervlak en een putbodemp in de schematisatie. Daarnaast zijn er rioolleidingen als takken tussen de knopen met een hoogte (BOB) aan beide uiteinden. Bij rioleringsmodellen bevatten de putten de eigenschappen voor de connectie met 2D (te weten isolated, connected, embedded). Het stelsel kan als standaard uitwisselformaat voor rioleringsberekeningen (SyfHyd) worden geïmporteerd in de 3Di database.

In een *oppervlaktewatermodel* zitten knopen zonder berging en zonder een aparte hoogte. Daarnaast hebben watergangen een vrije geometrie tussen de verbindingsknopen en kunnen er meerdere profielen met frictie op een tak worden gedefinieerd. De vrije geometrie en de profielen worden opgegeven op zogenaamde vertices. Op de vertices kunnen bij watergangen ook de variërende profiel hoogtes, luwte factoren en frictie worden opgegeven. Eigenschappen voor de connectie met 2D (dus isolated, connected, embedded) worden opgegeven bij de watergangen.

De informatie over de watergangen en inliggende 1D kunstwerken worden vanuit het beheersysteem met shapefiles in de 3Di database geïmporteerd.

## 2D modelgegevens

De volgende rasterbestanden kunnen worden opgegeven als invoer voor een 3Di model:

- › Digital Elevation Model (hoogteraster)
- › Weerstand m.b.t. stroming over maaiveld
- › Verfijningslocaties voor de 2D rekenrooster generatie (quadrees)
- › Infiltratie (3 rasters met Horton parameters)
- › Interceptie
- › Horizontale stroming per waterstandslaag (Darcy parameter)
- › Bergingscoëfficiënt per waterstandslaag
- › Laagdikte van de interflowlaag (optioneel)
- › Initiële waterstanden (optioneel)

## Speciale objecten in 2D

Voor het genereren van het 2D rekenrooster en initiële situaties en belastingen kan extra informatie worden meegegeven. Dit betreft bijvoorbeeld de ligging van lijnelementen die obstakels aangeven (bijvoorbeeld keringen) of de locaties waar het rekengrid verfijnd moet worden. Deze informatie staat ook in de 3Di database.



Het 2D model kent lijnen met obstakels (gebruikt voor bijvoorbeeld dijken), lateralen debieten en onttrekkingen en/of initiële waterstandspunten, die het gedrag of de toestand van het 2D beïnvloeden.

Obstakels zorgen ervoor dat het stromingsgedrag tussen twee 2D cellen verandert. Deze obstakels worden als lijnen (met vertices) opgegeven. Sommige obstakels (bijvoorbeeld dijken) kunnen ook doorbreken. Voor obstakels kunnen de volgende eigenschappen worden opgegeven:

- › Hoogte
- › Materiaal (gebruikt voor doorbreken)
- › Maximum bresdiepte (gebruikt voor doorbreken).

Naast de obstakels kunnen lateralen worden opgegeven. Deze kunnen ook interactief worden toegevoegd.

#### 2.4.2 *Modelschematisatie*

##### **Genereren basisschematisaties**

Het genereren van basisschematisaties gebeurt grotendeels automatisch in een database-omgeving. Zo wordt de kwaliteit van de schematisatie vergroot, omdat (menselijke) fouten worden geminimaliseerd. Ook wordt de efficiëntie bij modelupdates hierdoor vergroot bij wijziging van de basisgegevens.

##### **Controle modeldata**

De modellen worden automatisch gecontroleerd op volledigheid. Daarna worden er korte testberekeningen uitgevoerd. Met deze tests wordt duidelijk of een model op een juiste manier werkt in de 3Di. Tevens wordt de rekenperformance gemeten. Deze controles zijn belangrijk, omdat er met miljarden gegevens wordt gewerkt en een foute waarde gemakkelijk onopgemerkt kan blijven.

##### **Neerslag**

Wanneer het model valide is, kan neerslag worden toegevoegd. 3Di rekent met buien die kunnen variëren in de ruimte en tijd.

In de online 3Di portal kan de gebruiker kiezen voor uniforme neerslag, een ontwerpbui (uniform in ruimte, variabel in tijd) of een neerslaggebeurtenis uit het verleden (variabel in zowel ruimte als tijd) op basis van de Nationale Regenradar.

##### **Waterbeweging tussen cellen**

Water kan tussen cellen stromen zolang er geen obstakel in de weg staat (bijvoorbeeld een huis of dijk). Als er geen route gevonden wordt vanwege een obstakel, stroomt het water niet naar de naburige cel, tenzij de waterstand hoger is dan het laagste punt van het obstakel. Wanneer de waterstand in een volgende tijdstap weer lager is dan de minimale obstakelhoogte, stopt de stroming weer. Met andere woorden, per tijdstap wordt gekeken of er stroming tussen de cellen kan plaatsvinden, onafhankelijk van of er al uitwisseling heeft plaatsgevonden.





### 2.4.3 Modeluitvoer

De resultaten van een berekening worden opgeslagen in een resultatenbestand in NetCDF formaat, een wereldwijde standaard. Het 3Di resultatenbestand bevat:

- › Algemene informatie, zoals modelversie en andere metadata
- › Voor alle (geselecteerde) tijdstappen berekende waterstanden in alle rekenpunten (1D en 2D) en alle snelheden en debieten ( $u$ ,  $Q$ ) voor alle verbindingen in het model.

De gebruiker kan vooraf opgeven of alle resultaten moeten worden weggeschreven, of slechts een selectie van locaties en tijdstappen.

Bij de keuze voor uitvoer op perioden van meerdere rekentijdstappen kan naast de actuele waarde ook worden gekozen voor de minimum, gemiddelde, maximum of cumulatieve waarde.

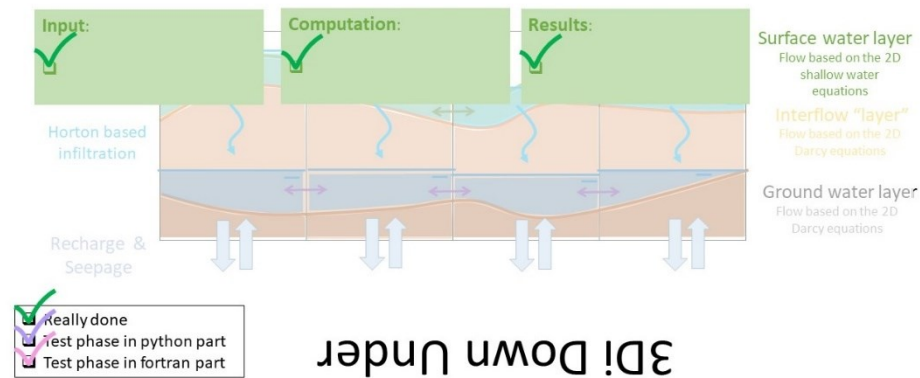


# 3 Theoretische testprocedures

## 3.1 Inleiding

De concepten zoals die zijn ingebouwd in 3Di, zijn door Nelen & Schuurmans en Stelling Hydraulics beoordeeld op het gesimuleerde gedrag van de oppervlaktewaterstand en het ontstaan van water aan maaiveld in een regionaal of stedelijk systeem. Hiervoor zijn geautomatiseerde testprocedures toegevoegd aan de 3Di testbank.

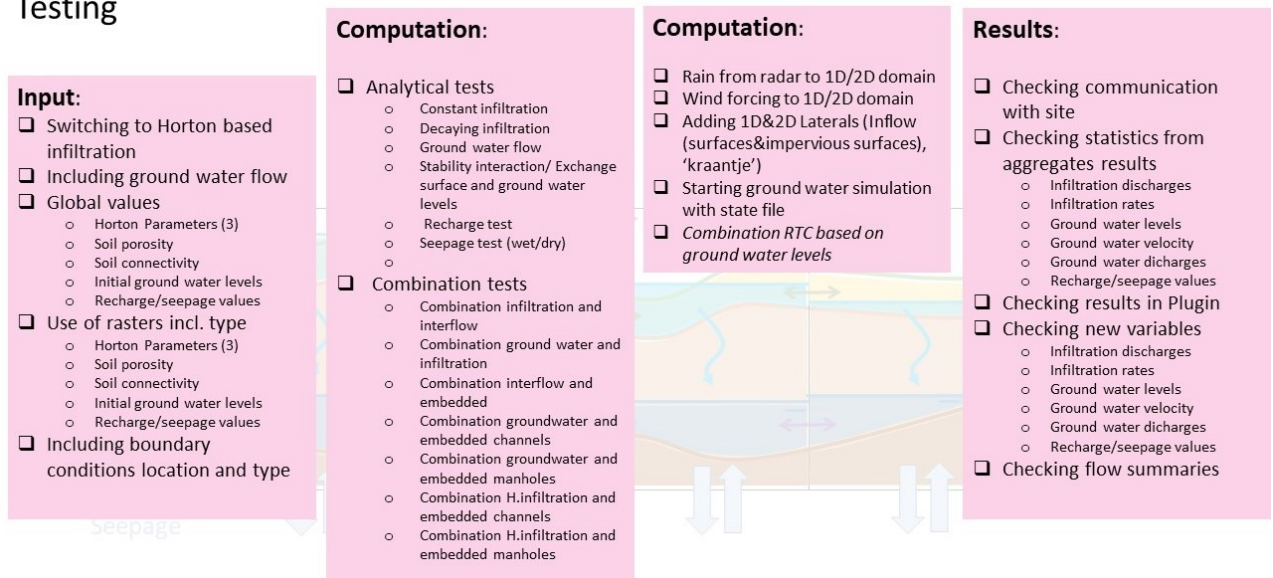
Na elke release van (een stukje) nieuwe code wordt 3Di onderworpen aan uitgebreide testprocedures uit de testbank. Voor reeds bestaande onderdelen van 3Di zijn de procedures al bekend (Figuur 3-1).



Figuur 3-1 Testen van de oppervlaktewaterlaag in 3Di

Voor gewijzigde onderdelen (interflowlaag), nieuwe onderdelen (grondwaterlaag) en nieuwe processen (infiltratie en kwel) die zijn voortgekomen uit die project, zijn er nieuwe procedures ontwikkeld en aan de testbank toegevoegd. Op basis daarvan is het testplan opgesteld (Figuur 3-2). Voorliggend hoofdstuk gaat in op de theoretische testen en volgend hoofdstuk gaat in op de praktijktesten.

## Testing



Figuur 3-2 Testplan theoretische testen en praktijktesten



## 3.2 Theoretische testen

De eerste stap is een kwantitatieve beoordeling op basis van een vergelijking tussen het theoretische en het met 3Di gesimuleerde grondwaterstandsverloop. Hiervoor is besloten tot een aantal theoretische testprocedures:

1. Elementaire tests die een specifiek onderdeel van de grondwateruitbreiding in 3Di op een basaal niveau testen, bijvoorbeeld het infiltratieverloop volgens Horton
2. Stationaire (= met in de tijd constante randvoorwaarden) tests van de gehele grondwateruitbreiding
3. Niet-stationaire (= met in de tijd variërende randvoorwaarden) tests van de gehele grondwateruitbreiding

### 3.2.1 Elementaire testen

In Bijlage I is een overzicht opgenomen van alle elementaire testen die we uitvoeren op afzonderlijke grondwateronderdelen. Deze zijn onderverdeeld in lagen en processen:

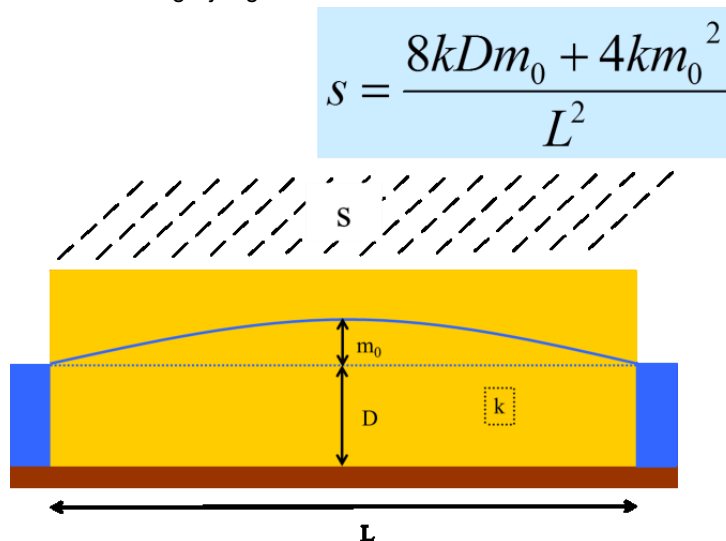
- › Interflowlaag
- › Grondwaterlaag
- › Proces van infiltratie
- › Proces van kwel en wegzijging

In Bijlage II zijn de testbevindingen opgenomen.

### 3.2.2 Stationaire test

#### Hooghoudt

De schematisatie van een stationaire test is weergegeven in Figuur 3-3. De bijbehorende vergelijking is de in grondwaterkringen bekende formule van Hooghoudt (1940). Met deze formule kan de opbolling van grondwater boven het drainageniveau ( $m_0$ ) worden berekend als functie van de slootafstand ( $L$ ), horizontale doorlatendheid ( $k$ ), dikte van de watervoerende laag ( $D$ ) en af te voeren hoeveelheid grondwater ( $s$ ). Uitgangspunt is dat de sloten volledig penetrerend zijn, dat wil zeggen ze reiken tot een ondoorlatende bodemlaag. De achterliggende theorie is een combinatie van de Wet van Darcy en de continuïteitsvergelijking.



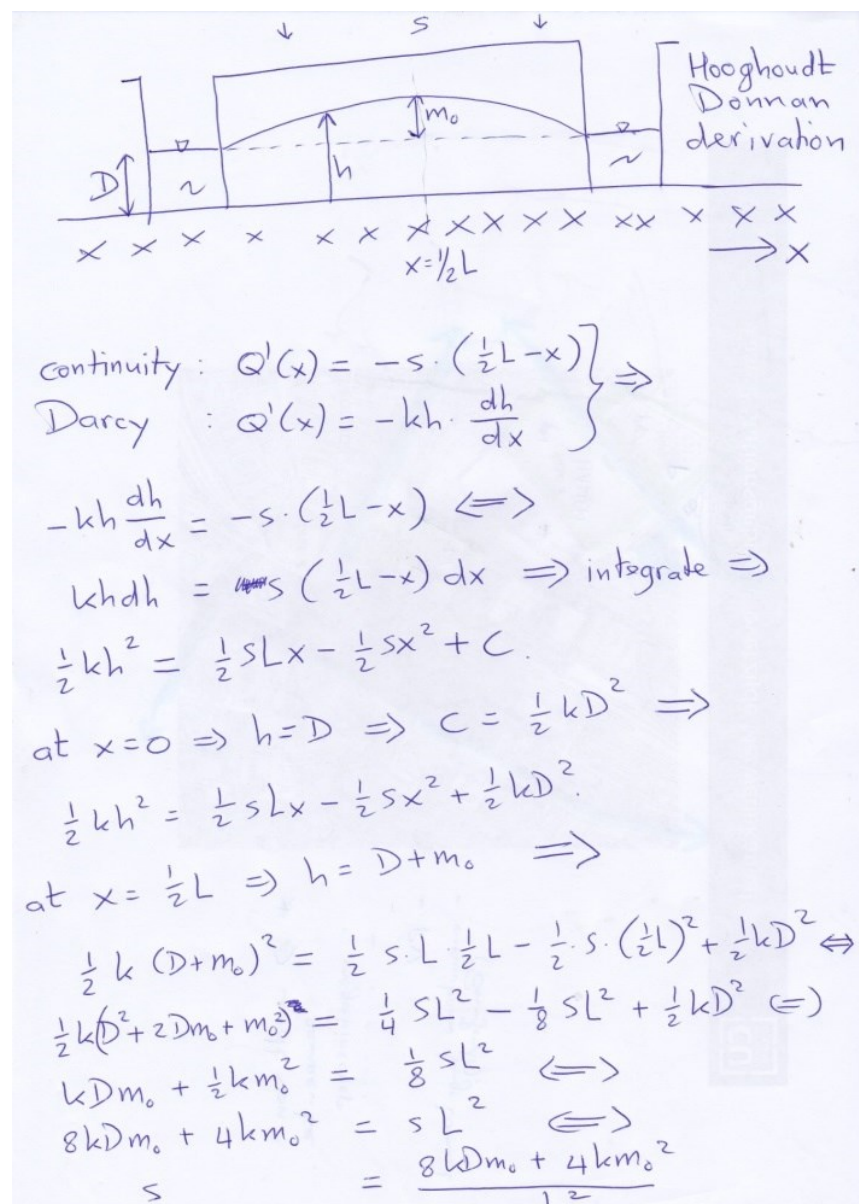
Figuur 3-3 Schematisatie stationaire test waarin  $s$ = via het grondwater af te voeren hoeveelheid water,  $m_0$ =opbolling grondwaterstand midden tussen de sloten,  $L$ =slootafstand,  $k$ =horizontale doorlatendheid van de bodem.



Met behulp van die theorie kan de grondwaterstand op elk willekeurig punt tussen de twee sloten worden berekend (Figuur 3-4).

Het resultaat van de stationaire simulatie met 3Di is een berekend stationair grondwaterstandsverloop tussen de twee sloten. Het is een evenwichtssituatie die ingesteld is op een continue af te voeren hoeveelheid water ( $s$ ). Deze wordt vergeleken met de grondwaterstand  $h$  die volgt uit de theorie volgens Figuur 3-4. De toetsing kan worden uitgevoerd voor verschillende waarden van  $L$ ,  $k$  en  $s$ .

De stationaire Hooghoudt-test is uitgevoerd met  $L=200$  m,  $k = 100$  m/d,  $s=100.8$  mm/d en  $D=5$  m. De door het model berekende opbolling is 0,9228 m wat exact gelijk is aan de theoretische oplossing.



Figuur 3-4 Afleiding van de Formule van Hooghoudt op basis van Darcy en de continuïteitsvergelijking. Voor elke willekeurige  $x$  kan de grondwaterstand  $h$  worden berekend



## 4 Praktijk- /geïntegreerde test

Auteur is Jelle Buma en reviewer is Elgard van Leeuwen (beiden van Deltares)

### 4.1 Inleiding

Aanvullend op de theoretische testen is 3Di Grondwater toegepast in een daadwerkelijk bestaand gebied. De kenmerken van deze test zijn:

- › Geïntegreerde test, waarbij de Darcy- en continuïteitsvergelijkingen in een groot aantal (> 100) rekencellen worden opgelost
- › Praktijktest, waarbij de door 3Di gemodelleerde grondwaterstanden zijn vergeleken met gemeten grondwaterstanden

De uitvoering van deze test kende de volgende onderdelen:

1. Blootleggen en oplossen van problemen die specifiek voortkwamen uit de praktijktoepassing en niet eerder in de theoretische (eenheids-)testen aan het licht zijn gekomen. De implementatie (door Deltares) van systeemkennis van stedelijk grondwater in het 3Di-modelconcept (ontwikkeld door Nelen & Schuurmans) betekende dat er met andere – grondwaterhydrologische - ogen, en daardoor ook met andere wensen en eisen naar 3Di Grondwater gekeken werd.
2. Opstellen visualisatie-/gebruikersomgeving voor de (specialistische) grondwatermodelleur, om snel in- en uitvoer te kunnen beoordelen en efficiënt testen mogelijk te maken.
3. Testen van 3Di Grondwater in een geselecteerd praktijkgebied. De test bestond uit het zo goed mogelijk schematiseren en parameteriseren van het grondwatersysteem in het testgebied en het kwalitatief (visueel) vergelijken van gemeten en berekende grondwaterstanden.

3Di Grondwater is recent ontwikkeld en maakt nog steeds een sterke ontwikkeling door. Het testresultaat van dit project moet daarom worden gezien als een momentopname. Door onderdeel 3 interactief met onderdeel 1 uit te voeren kwamen gaandeweg problemen aan het licht. Hierbij is veel tijd en aandacht besteed aan het doorvoeren van verbeteringen in de modelcode en –structuur. Daardoor is minder aandacht gegeven aan wat bij het kwantitatief testen van bewezen modellen in praktijksituaties gangbaar is: Kalibratie en gevoeligheidsanalyse van modelparameters en validatie op metingen.

### 4.2 Selectie testgebied

De bijeenkomst van de klankbordgroep op 15 mei 2017 is benut om te komen tot een gezamenlijk gedragen invulling van de technische praktijktesten. Aanvankelijk was de ambitie om twee gebieden hiervoor te selecteren. Vooraf zijn door de onderzoekers criteria geformuleerd waaraan de testgebieden zou moeten voldoen. Dit zijn:

- › Er moeten voldoende metingen van grondwaterstanden beschikbaar zijn in het gebied om een goed beeld te krijgen van het ruimtelijke patroon van de grondwaterstand.
- › De meetfrequentie van de grondwaterstanden moet minstens eenmaal per dag bedragen. Afhankelijk van de traagheid van het grondwatersysteem kan een hogere frequentie nodig zijn.



- › Bij voorkeur zijn er ook metingen van rioolafvoeren beschikbaar en is er sprake van gemengde riolering in het gebied. Daarmee wordt het mogelijk een sluitende waterbalans voor het casusgebied op te stellen. De gemeenten hebben op dit punt aangegeven dat er vrijwel geen hydrologisch geïsoleerde rioleringsgebieden bestaan, en dat het voldoen aan dit criterium daarom moeilijk haalbaar is.
- › Bij voorkeur is er een bestaand grondwatermodel beschikbaar. Veel gemeenten beschikken al over, of liggen in, een gebiedsdekkend of regionaal grondwatermodel. Een dergelijk model is mogelijk bruikbaar om ondergrondparameterisaties en onderrandvoorwaarden (kwel/wegzijing) aan te ontlenen, en om modelprestaties van 3Di Grondwater mee te vergelijken.
- › De twee testgebieden hebben verschillende ondergrondschematisaties.

Op basis van deze criteria zijn Prinseneiland (Amsterdam) en Marlot (Den Haag) geselecteerd als potentiële testgebieden voor de praktijktesten. Het zijn beide hydrologisch geïsoleerde gebieden waarvoor zowel specifieke riooldebietgegevens als grondwaterstanden (deels hoogfrequent) beschikbaar zijn. Ook is in beide gebieden een grondwatermodel beschikbaar of wordt dit momenteel gebouwd. De beide testgebieden verschillen wezenlijk van elkaar voor wat betreft de ondergrond, en vragen om uiteenlopende manieren van schematisatie.

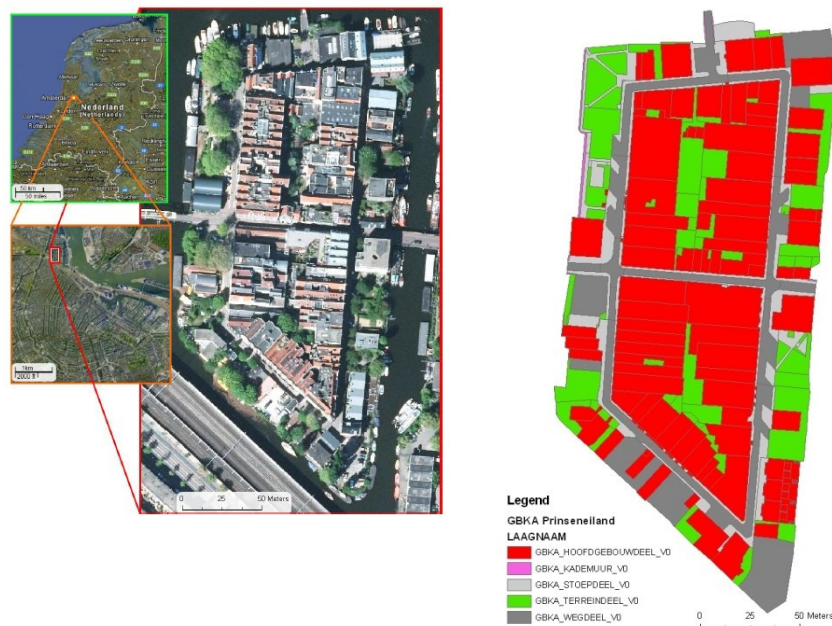
Vanwege noodzakelijke verbeteringen die naar aanleiding van de praktijktest zijn doorgevoerd in 3Di Grondwater, is de praktijktest uiteindelijk alleen uitgevoerd voor Prinseneiland. In Paragraaf 4.6 wordt ingegaan op de toepassingsmogelijkheden in gebieden met een andere bodemopbouw. Daarbij zal de situatie in Marlot expliciet worden beschreven.

Het is belangrijk te vermelden dat in deze praktijktest alleen het grondwaterdeel van 3Di is getoetst, ook al is het uiteindelijke doel om riolering, maaiveld, oppervlaktewater en grondwater integraal door te rekenen. De reden om het grondwaterdomein 'los te knippen' is dat het testen daardoor efficiënter en zuiverder kan plaatsvinden.

## 4.3 Beschrijving Prinseneiland (Amsterdam)

### 4.3.1 *Geschiktheid als testgebied*

Prinseneiland (Figuur 4-1) is een relatief klein gebied (circa 250 meter x 125 meter) in het noordwesten van het historische centrum van Amsterdam, omringd door water op boezempeil. Het heeft een relatief recent (1988) aangelegd gemengd rioolstelsel met een modern gemaal. Door het rioolgemaal worden rioolafvoeren geregistreerd die alleen van het Prinseneiland afkomstig zijn. De hemelwaterafvoer is daarmee voor stedelijke begrippen relatief eenvoudig. Er is door Waternet geen grondwaterdrainage aangelegd. Doordat vooraf werd verondersteld dat alle voor een waterbalans relevante componenten voor dit gebied kunnen worden gemeten of afgeleid uit beschikbare data, werd het Prinseneiland geschikt bevonden als testgebied voor de opbouw van een 3Di-grondwatermodel. Het model kan aan de metingen en data van Prinseneiland worden getoetst.



Figuur 4-1 Ligging en landgebruik Prinseneiland, Amsterdam (Bron: Rutten, 2013).

#### 4.3.2 Landgebruik en maaiveld

Het oppervlak van Prinseneiland bestaat voor circa 50% uit bebouwing. Circa 30% is verhard wegoppervlak waarvan het overgrote deel is bestraat met klinkers. Circa 20% van het oppervlak is onverhard. Het onverharde oppervlak bestaat uit tuinen, perkjes, parkeerplaatsen verhard met losse steentjes en een plantsoen. De maaiveldhoogte varieert tussen NAP +1 en NAP +2 m.

#### 4.3.3 Bodemopbouw

Prinseneiland is in de zeventiende eeuw ontstaan, doordat stukken losgeslagen veen in de hoek van het IJ zijn aangeplempt en opgehoogd. Het ophoogmateriaal is zeer divers: veen en klei, dat vrijkwam bij het graven van de omliggende grachten, houtresten, huisvuil, zand en puin. Beschikbare boorstaten geven een overwegend zandige samenstelling van de ophooglaag aan, met bijmenging van 'brokken puin', 'resten klei'; zie het voorbeeld in Figuur 4.3. De ophooglaag reikt vanaf maaiveld (NAP +1 tot +2 m) tot ongeveer NAP -3 m (Mogos, 2018). Mogos (2018) leidde uit resultaten van een grondwatermodelstudie een horizontale doorlatendheid van de ophooglaag van circa 0,1 meter per dag af.

Onder de ophooglaag is een opeenvolging van holocene klei- en veenafzettingen aanwezig. Onder de holocene lagen ligt het Pleistoceen zandpakket. Deze grondlaag begint op een diepte van 12,5 tot 13,5 meter beneden NAP.

#### 4.3.4 Grondwater

De grondwaterstanden worden in negen peilbuizen hoogfrequent gemeten (Figuur 4-2). De meetgegevens van zeven van deze peilbuizen zijn ter beschikking gesteld door Waternet (niet voor C05271 en C05272). De gemeten grondwaterstanden zijn weergegeven in Figuur 4-4. Hieruit is af te leiden dat de hoogste grondwaterstanden worden gemeten midden op het eiland, ter plaatse van de binnenterreinen (tuinen), gevolgd door de peilbuis in de Galgenstraat. Volgens de theorie (Figuur 3.3) zou midden op het eiland de hoogste grondwaterstand worden verwacht. Dit is niet helemaal het geval en wordt veroorzaakt door (1) relatief veel infiltratie van regenwater in de binnenterreinen (tuinen) en (2) mogelijk drainage van grondwater naar de riolering.



Figuur 4-2 Ligging peilbuizen (C-nummers) en rioelgemaal (wit vierkant). Van peilbuizen C5271 en C5272 zijn geen hoogfrequente metingen beschikbaar (Bron: Rutten, 2013).

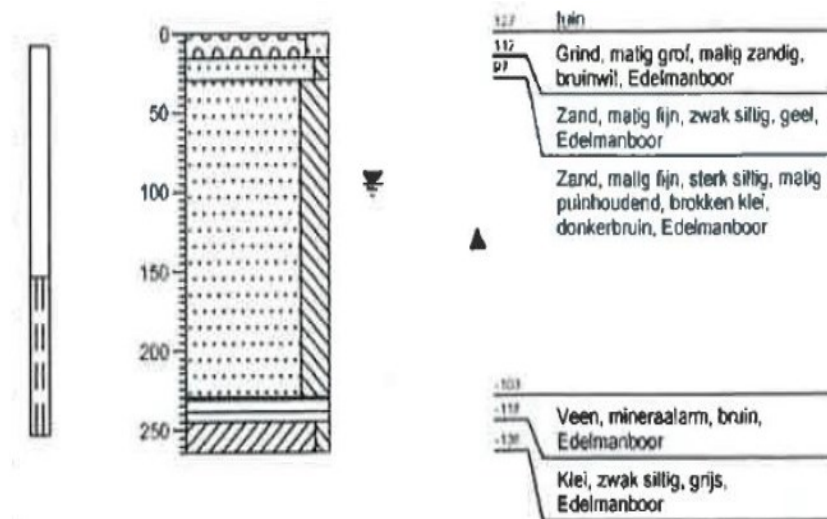
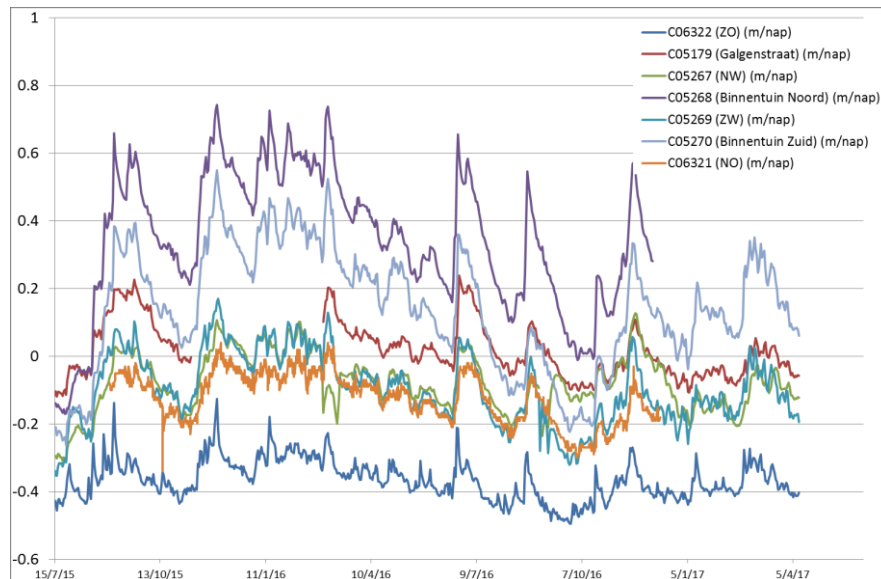


Figure 14.2. Soil survey on the location of piezometer C05268

Figuur 4-3 Voorbeeld boorbeschrijving van locatie C5268 op een binnenterrein (Bron: Waternet).





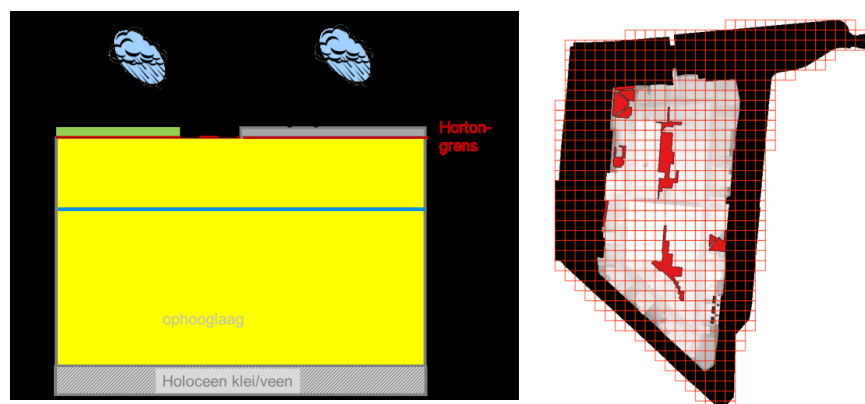
Figuur 4-4 Grondwaterstandsmetingen (Bron: Waternet).

#### 4.4 Schematisatie

In Prinseneiland zijn geen fysieke aanwijzingen aanwezig die het opnemen van een interflowlaag in de modelschematisatie rechtvaardigen. Daarom is hier gekozen om de interflowlaag achterwege te laten. Dit betekent dat het concept teruggebracht wordt tot één grondwaterlaag met de Hortongrens op het maaiveld (Figuur 4-5). Daarbij wordt aangenomen dat de holocene klei- en veenafzettingen als hydrologische modelbasis fungeren. De ophooglaag wordt dan de grondwaterlaag in 3Di. De onderkant van de ophooglaag is in lijn met Mogos (2018) op NAP – 3 m gezet.

De rekencelgrootte van het Prinseneilandmodel is 10 bij 10 meter. Voor het losstaand testen van het grondwatersysteem is deze resolutie afdoende. Rekencelgrootte van 10 bij 10 m zijn bovendien gangbaar in de bovengrondse 3Di modellen van stedelijk gebied.

Er is gerekend met tijdstappen van een uur. Voor het losstaand testen van het grondwatersysteem is deze resolutie afdoende. Gezien de traagheid van grondwatersystemen zou een tijdstapgrootte van een dag ook voldoen. Omdat rekentijd geen beperking vormt en veel brongegevens per uur zijn aangeleverd, is gekozen voor tijdstappen van een uur.



Figuur 4-5 Schematisatie van een rekencel (links) en het gehele testgebied Prinseneiland in 3Di Grondwater.



## 4.5 Randvoorwaarden

### 4.5.1 Bovenrandvoorwaarde

De bovenrandvoorwaarde van het model wordt bepaald door de bruto neerslag, verliezen door berging en verdamping, en de infiltratiecapaciteiten van de bebouwde, verharde en onverharde gebiedsdelen. De bovenrandvoorwaarde is dus een flux.

Uiteindelijk is voor het grondwatersysteem de grondwateraanvulling via het maaiveld van belang. Vanuit de onderzoeken van Rutten (2013) en Mogos (2018) zijn al kwantificeringen voor deze grondwateraanvulling beschikbaar. Volgens Rutten bereikte in 2010 en 2011 15% van de bruto neerslag het grondwater. De bruto neerslag is gelijk gesteld aan de gemeten neerslag op het Waternet meetstation bij de Papaverweg. Enkele hiaten in deze meetreeks, van augustus 2015 tot augustus 2017, zijn aangevuld met gegevens van de naburige KNMI-stations Schellingwoude en Hembrug.

De totale neerslagsom komt uit op 1.833 mm in deze periode. Dit is ongeveer 28.000 m<sup>3</sup>. Met de benadering van Rutten (2013) zou de grondwateraanvulling uitkomen op 4.200 m<sup>3</sup> per jaar. Mogos (2018) berekent een grondwateraanvulling van gemiddeld 4.000 m<sup>3</sup> per jaar tussen augustus 2015 en augustus 2017. Deze twee waarden stemmen goed overeen. In Paragraaf 4.5.4. wordt uitgelegd hoe de bovenrandvoorwaarde is geïmplementeerd in het model.

### 4.5.2 Zijrandvoorwaarden

Prinseneiland is omgeven door grachten. Onder de bodem van de grachten ligt geen ophooglaag, omdat werd opgehoogd met materiaal dat vrijkwam bij het graven van de grachten. Het oppervlaktewaterpeil is NAP -0,4 m (Amstelboezem). Dit peil kan in de praktijk variëren, bijvoorbeeld tijdens hevige regenval.

### 4.5.3 Overige randvoorwaarden

Als overige (flux-)randvoorwaarden worden aangemerkt:

1. Kwel of wegzijging door de holocene laag
2. Lekkage van grondwater naar het riool ( waar het riool onder de grondwaterstand ligt)
3. Lekkage vanuit het riool naar het grondwater (waar het riool boven de grondwaterstand ligt)

Ad. 1. De hydrologische modelbasis is in werkelijkheid niet volledig ondoorlatend. Er treedt wegzijging op naar het pleistocene zandpakket. Deze wegzijging wordt bepaald door  $(hw-hp)/c$ , waarin  $hw$  de (ondiepe) grondwaterstand op Prinseneiland is,  $hp$  de stijghoogte in het pleistocene zandpakket, en  $c$  de verticale hydraulische weerstand van het tussenliggende holocene pakket.  $hw$  wordt gesteld op gemiddeld 0 NAP.  $hp$  is ongeveer NAP -1,5 m (op basis van Rutten (2013), metingen (2015-2017 Planciusstraat, peilbuis C5177-II) en isohypsenkaart gepresenteerd door Mogos (2018)).  $c$  wordt gesteld op 15.000 dagen (Mogos (2018) op basis van ervaring Waternet). Dit leidt tot een wegzijging van 0,1 mm/d ofwel 1.100 m<sup>3</sup> per jaar.

Ad. 2. Door Waternet is, op basis van tijdreeksanalyse van de rioolafvoergegevens, de lekkage van grondwater naar het riool geschat op 0,4 m<sup>3</sup> per uur (met enige onzekerheid) ofwel 3.500 m<sup>3</sup> per jaar.



Ad. 3. Op basis van de nu gekwantificeerde termen is de waterbalans van het grondwatersysteem niet sluitend: De grondwateraanvulling via maaiveld is circa 4.100 m<sup>3</sup> per jaar. De som van de uitgaande termen wegzijging en lekkage naar het riool is 1.100 + 3.500 = 4.600 m<sup>3</sup> per jaar. De netto waterbalans komt daarmee op een 'tekort' van 500 m<sup>3</sup> per jaar. Bij een 'tekort' op de grondwaterbalans zou er een holle grondwaterspiegel moeten zijn, waarbij water vanuit de grachten naar het Prinseneiland stroomt. Het tegendeel is echter waar. Er is structureel een opbolling waarbij grondwater juist naar de grachten stroomt. Mogelijk wordt het tekort gecompenseerd door lekkage van rioolwater naar het grondwater. Daar waar het riool boven het grondwater ligt is dergelijke lekkage denkbaar. Dit betreft vooral de randen van het eiland, waar de grondwaterstand relatief diep ligt (1,5 à 2 m beneden maaiveld). Van deze lekkage zijn geen schattingen beschikbaar. Een andere mogelijke verklaring voor het tekort is dat de lekkage naar het riool en/of de wegzijgingsterm worden overschat. Mogos (2018) biedt hierover geen uitsluitel, omdat de grondwaterbalans in dat onderzoek ook niet sluitend is.

#### 4.5.4 Implementatie randvoorwaarden in het model

De hiervoor beschreven randvoorwaarden zijn als volgt opgelegd aan het model:

- › Aan de zijranden van Prinseneiland is een constant boezempeil van NAP -0,4 m opgelegd. Voor de praktijktest van het grondwatersysteem zijn tijdelijke variaties die in de praktijk rond dit peil kunnen optreden niet relevant.
- › De grondwateraanvulling is als voorbereiding berekend met een zgn. 'bakjesmodel'. De bakjes in dit model zijn reservoirs die met water worden gevuld als het regent en waaruit dit water ook weer kan verdampen. Elk bakje heeft een vooraf bepaalde bergingscapaciteit. Het regenwater komt achtereenvolgens de volgende bakjes tegen:
  - Bovengrondse bakjes die berging op platte daken en in goten, plasvorming op maaiveld en interceptie door bladeren representeren. Voor de bergingscapaciteit van deze bakjes zijn dezelfde waarden aangehouden als door Mogos (2018) die ze ontleende aan de Leidraad Riolerings, module C2100 van Stichting RIONED: 1 mm op daken, 0,5 mm op verhard terrein en 4 mm op onverhard terrein. Voor de verdeling van het regenwater over deze bakjes zijn de eerder genoemde landgebruikpercentages 50%-30%-20% aangehouden voor respectievelijk bebouwd, verhard en onverhard terrein.
  - Wanneer een bakje vol is zal het overtollige regenwater infiltreren. Op dagen zonder regen zal er transpiratie plaatsvinden door begroeiing, wat leidt tot een verdampingsoverschot en dus een negatieve waarde voor het buibestand. Omdat het buibestand geen negatieve waarden accepteert, wordt het verdampingsoverschot, eventueel geaccumuleerd over meerdere droge dagen, 'bewaard' en van de eerstvolgende regenval afgetrokken. Fysiek is dit voor te stellen als het door wortels onttrekken van vocht aan de bodem tijdens droge perioden, en aanvulling van dit bodemvochttekort tot veldcapaciteit bij de eerstvolgende regenval. Dit verdampingsoverschot treedt alleen op bij onverhard terrein, dus 20% van het oppervlak van Prinseneiland.

De beschreven voorbereiding is met de genoemde kentallen toegepast. Voor de bruto neerslag is gebruik gemaakt van de al genoemde neerslaggegevens van Waternet (meetstation Papaverweg). De verdamping is berekend door de Makkink-verdampingsgegevens van het KNMI-station Schiphol te vermenigvuldigen met een gewasfactor van 0,8 (cf. Rutten (2013) en



stationair model Mogos (2018)). Dit leidt tot een grondwateraanvulling via maaiveld (bovenrandvoorwaarde) van 4.300 m<sup>3</sup> per jaar voor heel Prinseneiland. Deze waarde stemt goed overeen met de waarden gevonden door Rutten (4.200 m<sup>3</sup>) en Mogos (4.000 m<sup>3</sup>).

Omdat in het 3Di-buibestand één uniforme waarde aan elke tijdstap wordt toegekend, is de grondwateraanvulling vervolgens gelijkmatig verdeeld over het niet-bebouwde deel van Prinseneiland (dus verhard + onverhard). In werkelijkheid zal waarschijnlijk naar verhouding meer grondwateraanvulling plaatsvinden via de onverharde terreinen. Verondersteld wordt dat regen die valt op de bebouwde delen van Prinseneiland het grondwater niet bereikt. In deze praktijktest is dit geïmplementeerd door 'muurtjes' (levees) rond het bebouwd gebied te zetten, waarbinnen het regenwater blijft staan en verder niet deelneemt aan het modelproces.

- › Gezien de onzekerheden rond de schattingen van lekkage van grondwater naar het riool, wegzijging en lekkage van riool naar het grondwater, is besloten om alleen de lekkage van grondwater naar het riool als onttrekking ('leakage') op te leggen aan alle rekencellen met verhard terrein. De door Waternet geschatte lekkage van 0,4 m<sup>3</sup> per uur is daarbij gelijkmatig verdeeld over deze rekencellen. Uit pragmatische overwegingen wordt verder aangenomen dat de wegzijgingsterm en de lekkage vanuit het riool naar het grondwater elkaar opheffen. De netto grondwateraanvulling komt in de hier beschreven implementatie op 4.300 – 3.500 = 800 m<sup>3</sup> per jaar. Gemiddeld voor heel Prinseneiland komt dit overeen met 0,08 mm per dag. In Paragraaf 4.6.1 wordt op deze keuze teruggekomen.

#### 4.5.5 Modelparameters

De sturende 3Di modelparameters in dit grondwaterconcept zijn (1) de infiltratiecapaciteit en Hortonparameters, (2) de bergingscoëfficiënt van de bodem en (3) de horizontale doorlatendheid die de uitwisseling tussen naburige cellen in beide lagen bepaalt.

Aan de infiltratiecapaciteit is een waarde van 240 mm per uur toegekend voor zowel onverhard als verhard terrein. In werkelijkheid is de infiltratiecapaciteit op verhard terrein veel lager (ordegrootte 10-30 mm per uur). De keuze voor 240 mm per uur hangt samen met de noodzaak om de grondwateraanvulling gelijkmatig te verdelen over het niet-bebouwde deel van Prinseneiland (dus verhard + onverhard). Voor een uitleg over de toedracht hiervan wordt verwezen naar Paragraaf 4.7.

De bergingscoëfficiënt van de bodem is gesteld op 0,15. Deze waarde houdt het midden tussen de in het Grondwaterzakboekje (Bot, 2016) vermelde bergingscoëfficiënten voor matig fijnzandige grond en een zandig dek op veen op een diepte van 75 cm onder maaiveld. Mogos (2018) hanteert een lagere waarde, namelijk 0,08 in het zomerhalfjaar en 0,05 in het winterhalfjaar. In 3Di Grondwater kan één constante waarde voor de bergingscoëfficiënt worden opgegeven. De bergingscoëfficiënt wordt alleen gebruikt in de niet-stationaire berekening (d.w.z. met in de tijd variabele randvoorwaarden).

Voor de horizontale doorlatendheid is een uniforme waarde van 0,1 meter per dag gehanteerd, in lijn met Mogos (2018).

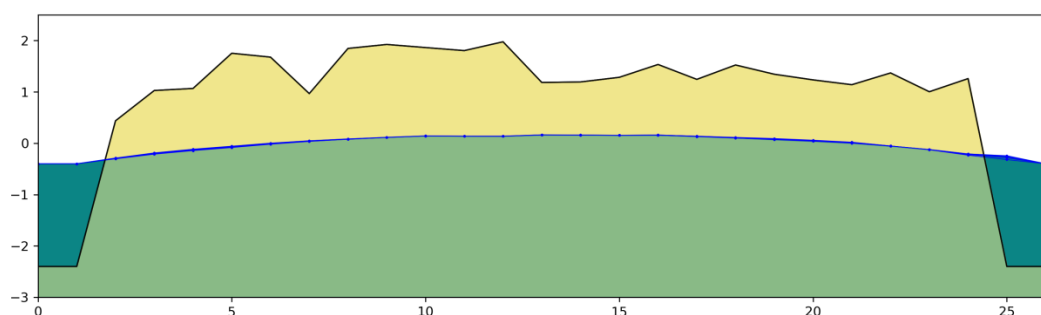
## 4.6 Resultaten

### 4.6.1 Stationair model

Om vast te stellen of het model op hoofdlijnen voldoet is als eerste een stationaire berekening uitgevoerd. Daartoe is eerst een constante grondwateraanvulling van 0,08



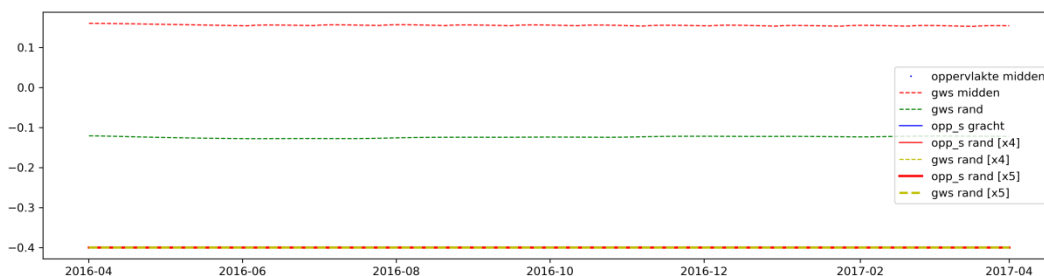
mm/d opgelegd als bovenrandvoorwaarde. Dit is gelijk aan de in de voorgaande paragraaf berekende grondwateraanvulling via maaiveld, minus de door Waternet geschatte lekkage van grondwater naar het riool en dat gelijkmatig verdeeld over heel Prinseneiland. De resulterende stationaire grondwaterstand op het midden van het eiland is dan circa 0 NAP (Figuur 4-6). Deze waarde is lager dan de opbolling die visueel is ingeschat op basis van de metingen (Figuur 4-4). Deze opbolling ligt in tussen de werkelijke grondwaterstanden in de Galgenstraat (mogelijk verlaagd door lekkage naar het riool) en de binnenterreinen (verhoogd als gevolg van infiltratie en lage doorlatendheid), en is NAP +0,1 à +0,2 m. De te laag berekende opbolling suggereert dat de netto grondwateraanvulling in werkelijkheid groter is dan aangenomen. Gelet op de in Paragraaf 4.5.3 ad.3 geschetste onzekerheid in de waterbalanstermen moet het verschil tussen model en meting waarschijnlijk worden verklaard uit het ontbreken van gebiedsinformatie.



Figuur 4-6 Resultaat stationaire berekening met als bovenrandvoorwaarde een grondwateraanvulling van 0,08 mm/d.

Een iets grotere constante grondwateraanvulling van 0,1 mm/d leidt wel tot een berekende grondwaterstand die globaal overeen met de metingen (Figuur 4-7). De dan berekende stationaire grondwaterstand van NAP +0,16 m komt overeen met een opbolling van 0,56 m.

Toepassing van de Formule van Hooghoudt (Paragraaf 3.2.2) met de in 3Di Grondwater ingevoerde parameters (een slootafstand  $L$  van 120 m, van oost naar west; een dikte van de watervoerende laag  $D$  van 3 m; en een doorlatendheid ( $k$ ) van 0,1 m/d) geeft ook een opbolling  $m_0$  van 0,56 m. De met het model en theoretisch berekende opbollingen komen dus overeen.



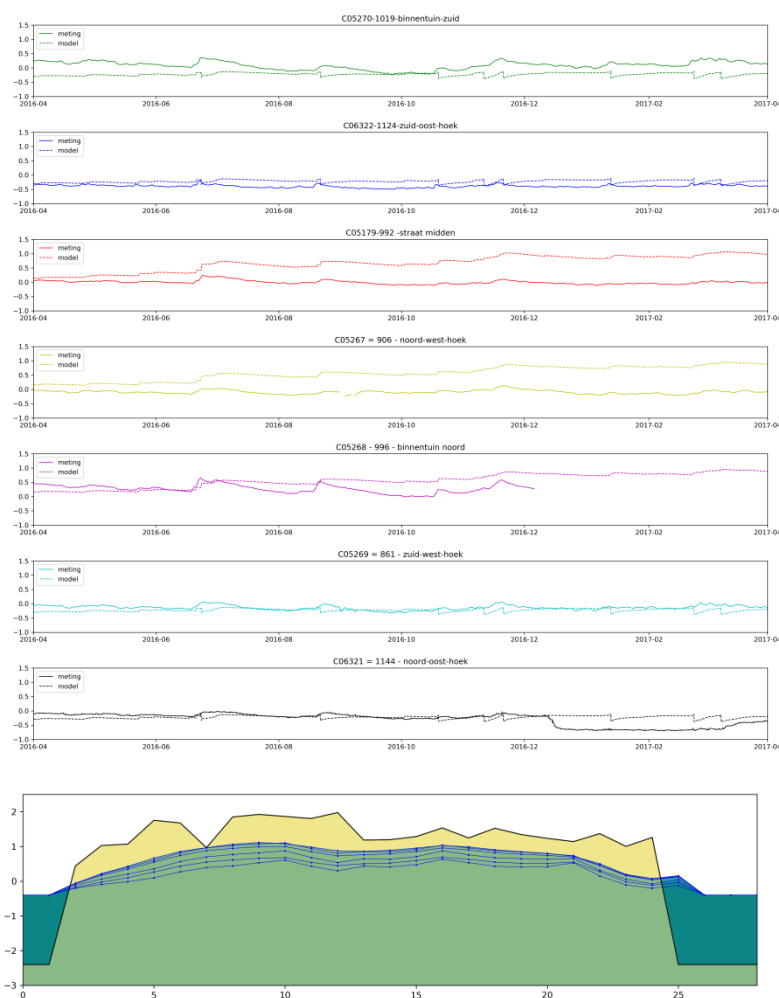
Figuur 4-7 Resultaat stationaire berekening met als bovenrandvoorwaarde een grondwateraanvulling van 0,1 mm/d. Op de grafiek is 'gws midden' (rode stippellijn) de maatstaf voor de opbolling.

#### 4.6.2 Niet-stationair model

Voor de niet-stationaire berekening is gekozen om de periode 1 april 2016 tot 1 april 2017 door te rekenen. Dit komt overeen met de door Mogos (2018) gemodelleerde periode en maakt zodoende een goede onderlinge vergelijking mogelijk. Voor de initiële



grondwaterstand – de grondwaterstand aan het begin van de simulatieperiode (1 april 2016) – moet een gebiedsdekkende schatting worden gemaakt. Hiervoor is het resultaat van de stationaire modellering genomen. Met name in de niet-stationaire fase zijn veel opeenvolgende berekeningen uitgevoerd. De resultaten daarvan vormden aanleiding om aanpassingen in modelinvoer of modelcode door te voeren. Op dit proces wordt nader ingegaan in Paragraaf 4.7. De resultaten van de laatst uitgevoerde niet-stationaire berekening zijn in Figuur 4-8 weergegeven. De afwijkingen tussen model en metingen zijn waarschijnlijk te verkleinen na doorontwikkeling van de modelcode en een diepgaandere toetsing door middel van kalibratie en validatie. Zoals aangegeven in de inleiding zijn die stappen niet door ons uitgevoerd en moet het testresultaat worden gezien als een momentopname.



Figuur 4-8 Resultaat niet-stationaire berekening 3Di Grondwater, testgebied Prinseneiland. De metingen zijn met doorlopende lijnen weergegeven, de berekende grondwaterstanden met stippellijnen.



De resultaten laten het volgende zien:

1. Midden op het eiland (Galgenstraat en binnenterreinen) stijgt de grondwaterstand structureel en lijkt deze aan het einde van simulatieperiode nog niet in evenwicht
2. Elders op het eiland daalt de grondwaterstand abrupt tijdens neerslagperioden en stijgt daarna weer geleidelijk
3. Het buitenwater (grachtenpeil) stijgt mee met de grondwaterstand op het Prinseneiland. Vastgesteld is dat dit niet ligt aan het rekenmodel maar aan een verschuiving in de visualisatie
4. De metingen van peilbuis C06321 laten een tijdelijke verlaging van de grondwaterstand zien die gemist wordt door het model. Dit kan een effect zijn van een tijdelijke bemaling die niet als randvoorwaarde is opgelegd aan het model (Mogos, 2018). Deze afwijking is in dat geval het gevolg van ontbrekende gebiedsinformatie.

#### 4.6.3 *Discussie modelresultaten*

Er is een aantal soorten oorzaken denkbaar voor de gevonden afwijkingen tussen de 3Di Grondwater resultaten en de metingen:

- › Het ontbreken van gebiedsgegevens (o.a. punt 4 in de vorige paragraaf)
- › Beperkingen in de losse grondwatermodule aan mogelijkheden voor ruimtelijke differentiatie van modelparameters (bijvoorbeeld de uniforme verdeling van grondwateraanvulling over verhard en onverhard terrein (Paragraaf 4.5.4). De oorzaak van deze beperkingen zit in de software rond de rekenkern.
- › Onvolkomenheden ('bugs') in de afhandeling van hydrologische processen of volumes
- › Fouten in de modelinvoer of visualisatie (o.a. punt 3 in de vorige paragraaf).

Van de in Paragraaf 4.6.2. geconstateerde punten 1 en 2 kon aan het einde van het project niet worden vastgesteld of deze te wijten zijn aan invoer- of nabewerkingsfouten, of aan onvolkomenheden in de modelcode of het modelconcept. Deze punten verdienen expliciet aandacht bij de doorontwikkeling van 3Di Grondwater.

- › De abrupte grondwaterdalingen tijdens neerslagperioden lijken op het patroon dat optreedt wanneer een pomp of gemaal wordt geactiveerd bij overschrijding van een aanslagpeil. De pomp slaat weer af na onderschrijding van een afslagpeil, waarna het grondwater weer langzaam omhoog komt. Het tijdsverloop kan niet worden verklaard met het functioneren van gangbare drainage in stedelijk gebied, die evenredig is met de hoogte van de grondwaterstand boven het drainageniveau. Drainage vindt dan veel geleidelijker plaats. Dit geldt ook voor onbedoelde drainage door lekke riolen.
- › De structurele stijging van het grondwater vindt plaats met dezelfde doorlatendheden, grondwateraanvulling en slootafstanden als in MicroFEM, en ook de stationaire test met 3Di Grondwater. Uit de volumebalans van 3Di Grondwater is af te leiden dat de geïnfiltreerde hoeveelheid water bijna twee keer zo groot is als de hoeveelheid die zou moeten infiltreren in verhard en onverhard terrein volgens het opgegeven buibestand. Dit wijst op een probleem bij de vertaling van het buibestand naar grondwateraanvulling.

Op basis van de praktijktest Prinseneiland kan worden geconcludeerd dat 3Di Grondwater nog enige doorontwikkeling nodig heeft voordat het in praktijkstudies kan worden ingezet.



## 4.7 Modelleerproces

Onderstaand is weergegeven welke aanpassingen gedurende het modelleerproces zijn doorgevoerd:

### 4.7.1 *Losknippen grondwatercomponent*

Het grondwatermodel kon niet afzonderlijk rekenen, met andere woorden de domeinen oppervlaktewater en riolering (1D elementen) konden niet worden uitgeschakeld. Het geïsoleerd kunnen testen van het grondwaterdomein is een noodzakelijke stap op weg naar toepassing van een volledig 3Di-model waar regenwater, afstroming via maaiveld, riolering en oppervlaktewater integraal worden doorgerekend. Het losknippen van de grondwatercomponent maakt mogelijk dat gericht en efficiënter gezocht kan worden naar oorzaken van afwijkingen tussen model en metingen. Eventuele onvolkomenheden in de (data-) koppeling tussen de verschillende domeinen spelen dan geen rol. Alle aandacht kon worden gericht op het grondwaterdomein. Het gesignaleerde probleem bleek in de rekenkern opgelost te moeten worden. Gezien de planning is daarom besloten om de modelschematisatie voor Prinseneiland handmatig aan te passen door alle 1D-elementen afzonderlijk te verwijderen.

### 4.7.2 *Vertaling neerslag naar ruimtelijke verdeling grondwateraanvulling (1)*

De grondwateraanvulling bleek alleen als uniforme waarde te kunnen worden opgelegd als bovenrandvoorwaarde. In werkelijkheid zal onder gebouwen en wegen veel minder regenwater infiltreren en het grondwater aanvullen dan onder tuinen en plantsoenen. Een uniforme randvoorwaarde leidt dan tot een overschatting van de grondwateraanvulling onder gebouwen en wegen, en een onderschatting in onverharde terreinen. Dit kan leiden tot onrealistische ruimtelijke patronen van de grondwaterstand, vooral in gebieden zoals Prinseneiland met een lage bodemdoorlatendheid, waardoor grondwater zich maar langzaam kan verplaatsen. Het probleem is deels ondervangen door muurtjes ('levees') rond het bebouwd gebied te zetten, waarbinnen het regenwater blijft staan en verder niet deelneemt aan het modelproces. Om het verharde terrein (straten en stoepen) zijn geen muurtjes gezet, omdat de verharding bestaat uit klinkers en zodoende een niet te verwaarlozen hoeveelheid regenwater doorlaat. Dit blijkt ook uit de waterbalansstudie van Mogos (2018). Momenteel wordt gewerkt aan uitbreiding van 3Di met een interceptieparameter. Hiermee kunnen ruimtelijke verschillen in grondwateraanvulling in de toekomst beter worden opgelegd aan het model.

### 4.7.3 *Vertaling neerslag naar ruimtelijke verdeling grondwateraanvulling (2)*

De grondwateraanvulling via maaiveld wordt via een 3Di-buibestand aan het model gevoed. Dit buibestand kan geen negatieve waarden bevatten, wat een probleem oplevert op dagen dat de verdamping de neerslag overtreft. Dit was de aanleiding om de grondwateraanvulling als voorbewerking te berekenen met behulp van een bakjesmodel (zie Paragraaf 4.5.1).





#### 4.7.4 *Toevoegen mogelijkheid initiële randvoorwaarde*

Er is een nieuwe functionaliteit ingebouwd om verschillende rasters van de initiële grondwaterstand (de grondwaterstand aan het begin van de simulatie) te kunnen opleggen. Grondwatersystemen reageren veel trager dan oppervlaktewater- en rioleringsystemen en kennen daardoor geen duidelijk te definiëren nulsituatie of begintoestand. Wanneer de initiële grondwaterstand in een model veel afwijkt van de werkelijke (gemiddelde) situatie, heeft het model veel (simulatie)tijd nodig om dit verschil eerst te compenseren (de zogenaamde initialisatietijd). In het geval van Prinseneiland bleek dit bijvoorbeeld meer dan 6 maanden te duren vanwege de lage doorlatendheid van de ophooglaag. Dat is 50% van de simulatieperiode. Door een initieel grondwaterraster op te leggen, dat meer overeenkomt met de werkelijke beginsituatie, wordt de inspeeltijd aanzienlijk korter. In deze praktijktest is, na inbouw van deze functionaliteit, de uitkomst van de stationaire berekening als initieel raster opgelegd.

#### 4.7.5 *Mogelijk maken van rekenperiode langer dan 1 dag*

Aanvankelijk rekende het model niet met perioden langer dan 24 uur. Dit kon eenvoudig in de modelcode worden aangepast.

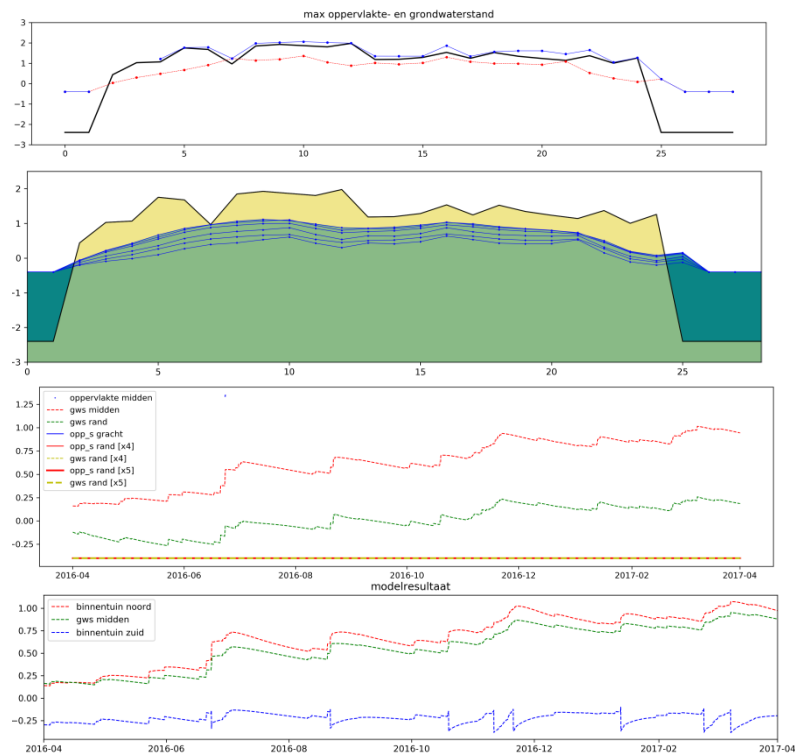
### 4.8 **Visualisatie-/gebruikersomgeving voor de grondwatermodelleur**

Het testen van een grondwatermodel was een iteratief en adaptief proces, waarbij in- en uitvoer snel bekeken en aangepast moest kunnen worden. Daarom is er geen gebruik gemaakt van de webapplicatie van 3Di, waarin de 'loop' tussen schematiseringsaanpassingen resultaten bekijken langer is. In plaats daarvan is er op een speciaal hiervoor ingerichte server direct gecommuniceerd met het rekenhart van 3Di. Dit noemen we hierna 'aan de kabel' modelleren. Om snel modelresultaten te kunnen visualiseren en beoordelen zijn hiervoor een aantal functionaliteiten ontwikkeld specifiek voor de grondwatermodelleur / ontwikkelaar. Deze functionaliteiten zijn in Figuur 4-8 en Figuur 4-9 weergegeven.

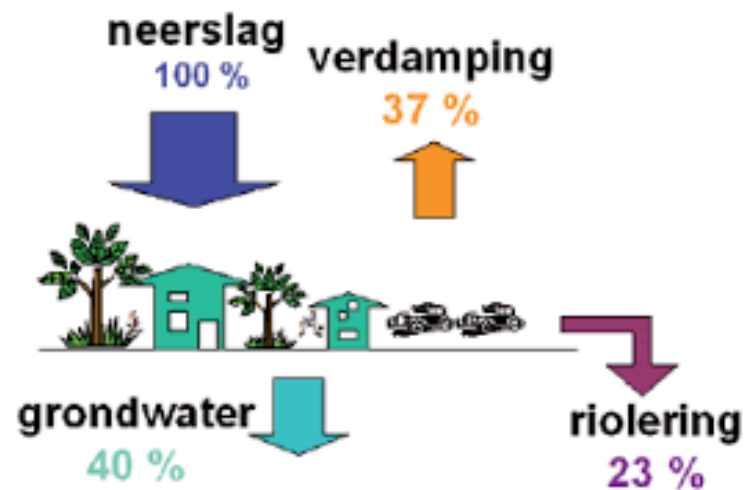
### 4.9 **Benadering onverzadigde zone**

Een specifiek punt van aandacht is de wijze waarop de onverzadigde zone (dat deel van de bodem wat zich boven de grondwaterstand bevindt) wordt gemodelleerd. Processen in de onverzadigde zone bepalen (mede) welk deel van de neerslag het grondwater bereikt en welk deel terug verdampt naar de atmosfeer.

In 'klassieke' grondwatermodellen wordt hier uiteenlopend mee omgegaan. In grondwatermodellen met de focus op diepe grondwaterstroming wordt vaak een eenvoudige 'bakjes' benadering gehanteerd, of wordt de neerslag met afvoercoëfficiënten verdeeld over de verschillende bestemmingen (bijvoorbeeld als in Figuur 4-10). Dit is ook de manier waarop de grondwateraanvulling in de praktijktest Prinseneiland is geformuleerd (zie Paragraaf 4.5.4).

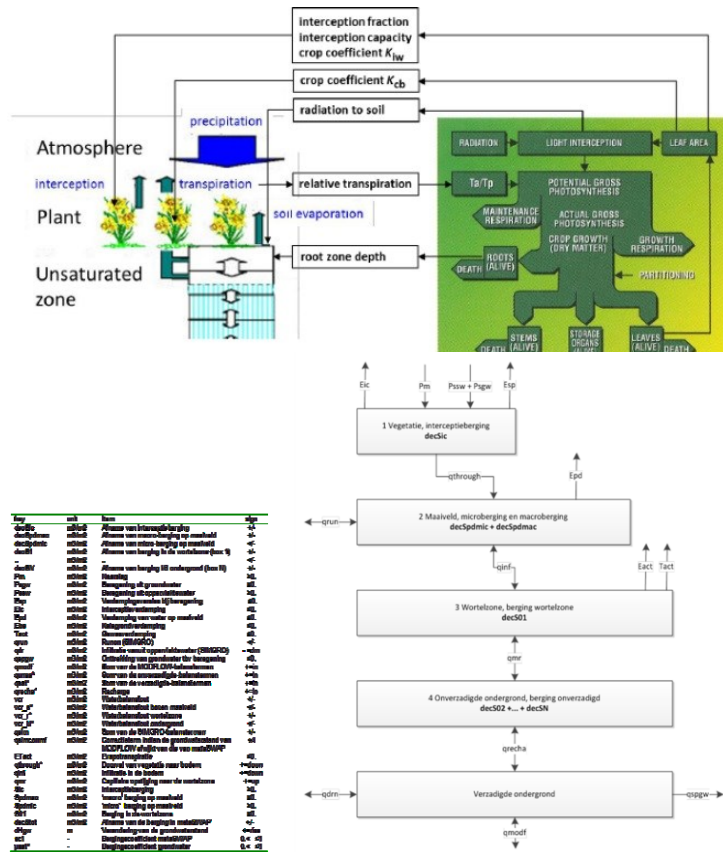


Figuur 4-9 Visualisatie modelberekeningen 'aan de kabel' met van boven naar beneden de maximale waterstand grondwaterlaag, de maximale waterstand maaiveldlaag, ontwikkeling dwarsprofiel grondwaterstand op verschillende tijdstippen tijdens simulatie en tijdsverloop grondwater- en maaiveldlaag.



Figuur 4-10 Veel gebruikte verdeelsleutel van bruto neerslag naar verdamping, grondwater en riolering in relatief ruim opgezette naoorlogse wijken in Nederland (Bron: Van de Ven, 2007).

In grondwatermodellen met meer focus op het ondiepe grondwatersysteem wordt de onverzadigde zone, inclusief de fysiologie van de begroeiing, in meer detail benaderd (Figuur 4-11).



Figuur 4-11 Benadering onverzadigde zone en vegetatie met METASWAP, zoals bijvoorbeeld toegepast in het Landelijk Hydrologisch Model van NHI (LHM-NHI)(Bron: NHI www.nhi.nu).

Een detaillistische benadering van de onverzadigde zone leidt tot lagere rekensnelheden en daardoor langere rekentijden, maar geeft een vollediger beschrijving van de relevante processen. Een eenvoudige benadering vergt minder rekentijd, maar leidt (mogelijk) tot grotere onnauwkeurigheid. Gezien de beoogde integrale en interactieve toepassing van 3Di is het gewenst om voor de onverzadigde zone een balans tussen beide te vinden: Snelle rekentijden zonder gangbare en bewezen concepten geweld aan te doen. Daarom is een vergelijkende studie uitgevoerd naar verschillende methoden om waterstroming in de onverzadigde zone te modelleren (Bijlage III).

#### 4.10 Toepassingsbereik bodemschematisaties

In deze paragraaf wordt ingegaan op het toepassingsbereik van 3Di Grondwater, uitgaande van voldoende doorontwikkeling in de toekomst voor inzet in praktijkstudies. Het gaat daarbij vooral om de vragen: Bij welke bodemschematisaties 3Di Grondwater kan worden toegepast? En onder welke voorwaarden geldt dat?

Op het Prinseneiland is de bodemschematisatie en het grondwatersysteem eenvoudig: Een ophooglaag waarin het freatische grondwater zich bevindt en direct daaronder de geohydrologische basis in de vorm van slecht doorlatende klei- en veenlagen.

Complexere bodemschematisaties doen zich voor in delen van Nederland waar het ondiepe grondwatersysteem in direct contact staat met een dieper grondwatersysteem. Dit is het geval in gebieden met ondiep voorkomende, maar dunne en/of discontinue klei-, veen- of leemlagen boven een dik watervoerend pakket. Als voorbeelden worden de situaties in Den Haag (Marlot) en Utrecht (Wittevrouwen) nader bekeken:

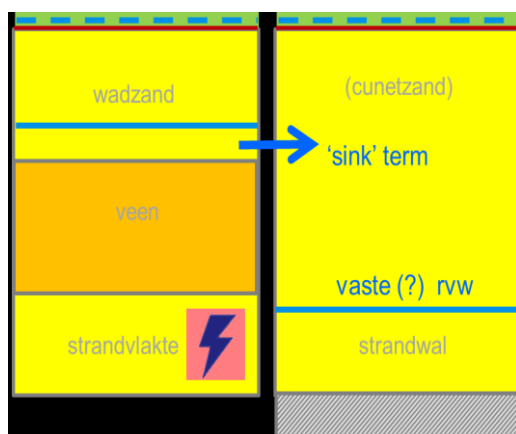
##### Den Haag (Marlot)



Marlot is een wijk in Den Haag uit de jaren '20 van de vorige eeuw. Een groot deel van de hierna volgende beschrijving is ontleend aan een grondwateronderzoek dat in 2010 door Wareco is uitgevoerd (Kuiper, 2010).

Het onderzoeksgebied ligt aan de voet van de duinen, met in het zuiden lager gelegen polders. De woningen zijn voorzien van souterrains. De maaiveldhoogte in het openbaar terrein varieert van circa NAP +0,2 m tot maximaal circa NAP +0,9 m NAP. De ondergrond van dit deel van Den Haag bestaat uit afwisselend strandvlakten en strandwallen. De bovenste meters bestaan uit antropogeen zand, vooral ter plaatse van de wegen (cunetzand). Ter plaatse van de strandvlakten komen discontinu veenlagen voor. Zowel boven als onder deze veenlagen bevinden zich de voor grondwaterstroming relevante watervoerende pakketten. Het veen ontbreekt plaatselijk, op die plaatsen is sprake van één watervoerend pakket.

Omdat 3Di slechts één grondwaterlaag kan bevatten doet zich hier een probleem met de schematisatie voor (Figuur 4-12). De grondwaterstand op de locatie zonder veen is onderdeel van een diep grondwatersysteem, de grondwaterstand boven de veenlagen is onderdeel van een ondiep grondwatersysteem. De diepe grondwaterstand reageert trager op regenval dan de ondiepe grondwaterstand. De meest eenvoudige oplossing voor deze situatie is om de diepe grondwaterstand als vaste randvoorwaarde te beschouwen, maar dit is niet altijd te verantwoorden. Marlot ligt aan de binnenduinrand, het diepere grondwatersysteem wordt gevoed vanuit de duinen en kent zodoende een trage (seizoenale), maar niet te verwaarlozen grondwaterdynamiek.

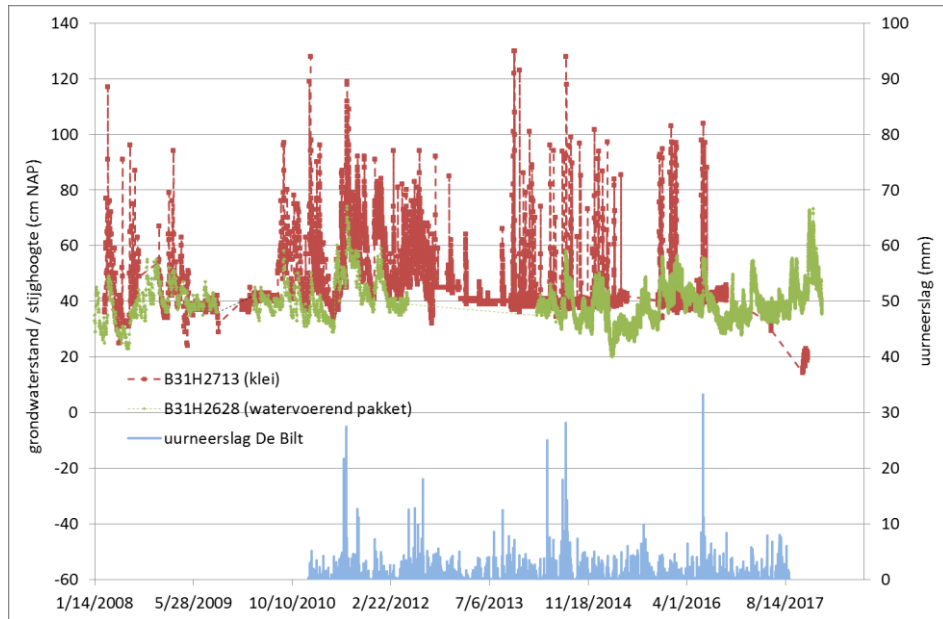


Figuur 4-12 Schematisatie van testgebied Marlot in 3Di, als voorbeeld van een complexere bodemschematisatie.

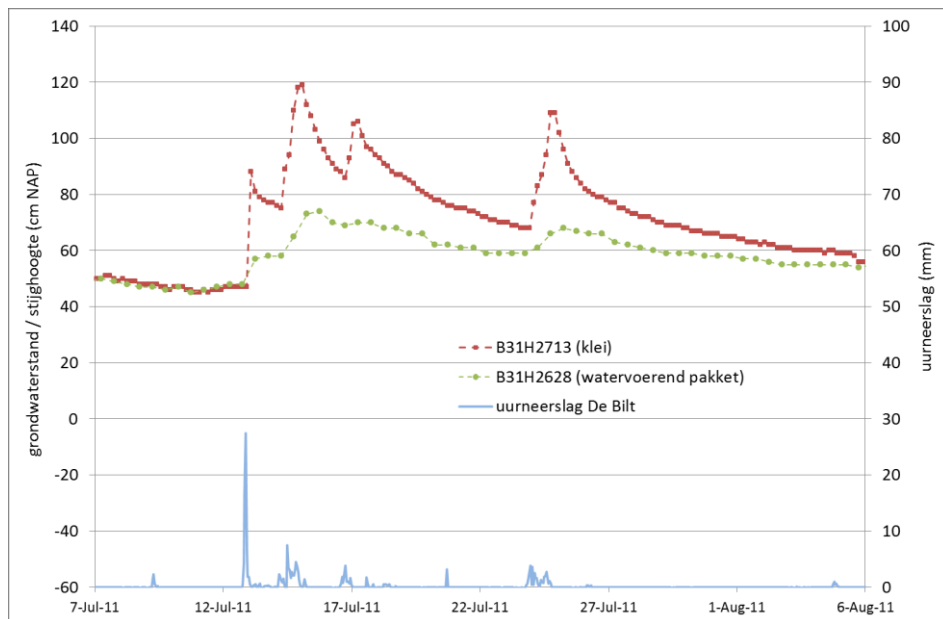
### Utrecht (Wittevrouwen)

Een vergelijkbare bodemsituatie komt voor in Utrecht. Het diepe watervoerende pakket is hier enkele tientallen meters dik. Verder is er geen sprake van ondiep veen, maar van een ondiepe kleilaag, mogelijk lokaal verwijderd door diepe weg- en rioolcunetten.

Het gemeten grondwaterstandsverloop op een meetlocatie in de wijk Wittevrouwen is weergegeven in Figuur 4-13. Deze meetlocatie heeft peilfilters in de klei en in het onderliggende zandpakket. De grondwaterstand in de klei (rode lijn) reageert sterk op regenval, zoals verwacht. De grondwaterstand in het onderliggende zand (groene lijn) reageert echter ook. Een situatie waar dit nog beter zichtbaar is, is weergegeven in Figuur 4-14. Het betreft een hevige regenbui op 14 juli 2011.



Figuur 4-13 Gemeten grondwaterstandsverloop in klei en onderliggend watervoerend (zand)pakket, Wittevrouwen, Utrecht (Bron: Gemeente Utrecht).

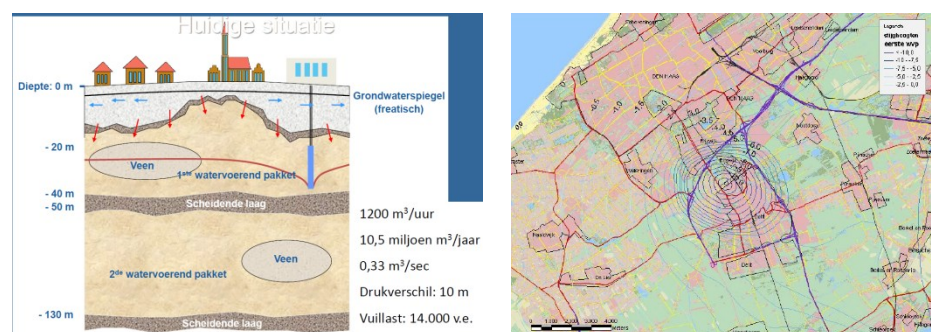


Figuur 4-14 Gemeten grondwaterstandsverloop in klei en onderliggend watervoerend (zand)pakket, Wittevrouwen, Utrecht; detail situatie rond 14 juli 2011 (Bron: Gemeente Utrecht).

Geconcludeerd kan worden dat in veel situaties de aanname van een constante diepe grondwaterstand niet zal standhouden. De situaties in Den Haag en Utrecht zijn wat dit betreft niet uniek in Nederland. Andere voorbeelden van beïnvloeding van de freatische grondwaterstand door diepere c.q. meer regionale systemen zijn te vinden aan de voet van stuwwallen en dekzandruggen en in het rivierengebied.



De aanbevolen oplossing voor deze situaties is om de diepe grondwaterstand niet als vaste maar als variabele randvoorwaarde te beschouwen. De hiervoor benodigde informatie kan in eerste plaats worden ontleend aan stijghoogtemetingen in diepere watervoerende pakketten. Deze informatie is echter op puntniveau beschikbaar en moet voor toepassing in 3Di worden omgezet naar een gebiedsdekkend kaartbeeld. Aanbevolen wordt om in deze gevallen de randvoorwaarden voor de uitwisseling met diepere grondwatersystemen te betrekken uit bestaande 'klassieke' grondwatermodellen. Veel gemeenten beschikken al over, of liggen in, een gebiedsdekkend of regionaal grondwatermodel. Een voorbeeld hiervan is het grondwatermodel dat is ontwikkeld om een verwachting op te stellen van de effecten van stopzetting van de grondwateronttrekking Delft-Noord (voorheen DSM)(Figuur 4-15).



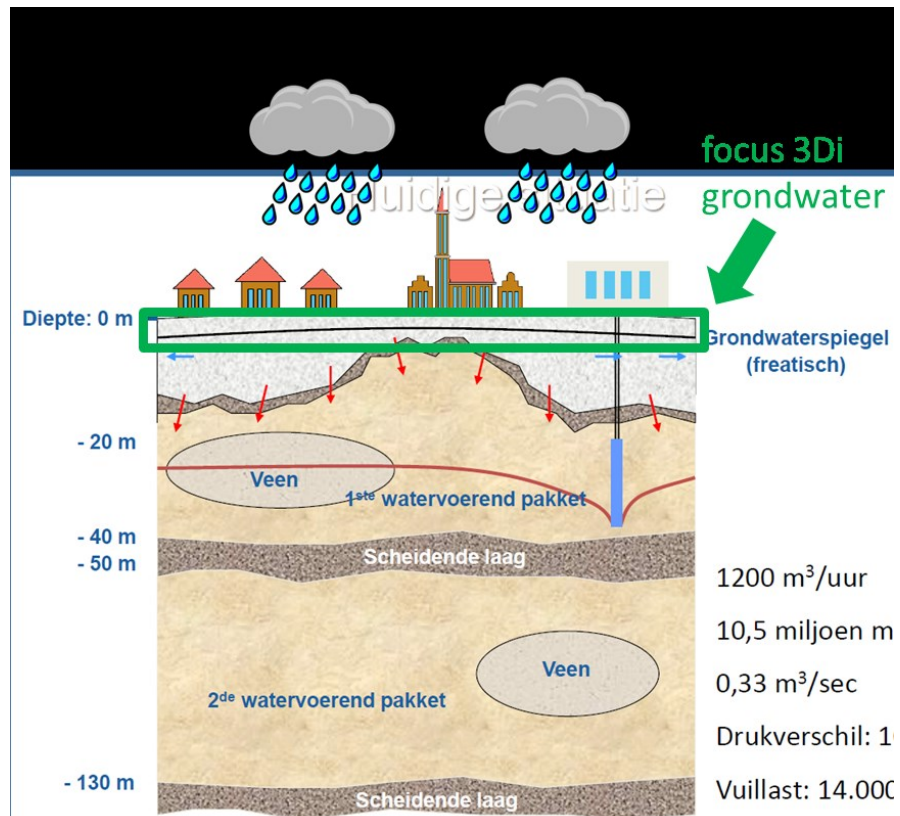
Figuur 4-15 Situatie grondwateronttrekking Delft-Noord, waarvoor een regionaal grondwatermodel is opgesteld (Bron: Roelofsen et al. 2008).

Het interpretatieniveau van deze modellen is vaak regionaal (hele stad of stadsdeel). Verder ligt de focus van deze modellen meestal op een termijn van meerdere jaren, om grondwaterregimes te kunnen kwantificeren (GHGs en GLGs<sup>1</sup>). Ten slotte bestrijken 'klassieke' grondwatermodellen niet alleen het ondiepe (freatische) grondwatersysteem, maar ook het grondwater in diepere watervoerende pakketten, tot tientallen en soms enkele honderden meters diepte.

In tegenstelling tot de 'klassieke' grondwatermodellen is bij 3Di Grondwater bewust gekozen voor beperking tot het bovenste (freatische) grondwater. Het gaat namelijk niet zozeer om het simuleren van het grondwatersysteem op zichzelf, maar om de interactie met andere waterdomeinen in de stedelijke omgeving (hemelwater, water op straat, oppervlaktewater en riolering).

Daarom wordt verwacht dat gecombineerd gebruik van 3Di Grondwater en 'klassieke' grondwatermodellen meerwaarde zal opleveren. Dit is gevisualiseerd in Figuur 4-16.

<sup>1</sup> GHG = Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand, GLG = Gemiddeld Laagste Grondwaterstand. Dit zijn in Nederland gangbare karakteristieken van grondwaterregimes. Om ze te bepalen zijn minimaal 8 jaar aan grondwaterstanden nodig.



Figuur 4-16 Relatie 3Di met bestaande grondwatermodellen: Focus op de bovenrand.



## 5 Datamodel

Auteur is Jelle Buma (Deltares)

### 5.1 Inleiding

#### 5.1.1 Informatiebeschikbaarheid stedelijke watermodellen

In het hedendaagse waterbeheer wordt bij de bouw van grootschalige numerieke simulatiemodellen steeds vaker gebruik gemaakt van datamodellen. Een datamodel is een digitale bestandsstructuur waarin kwantitatieve ruimtelijke informatie is opgeslagen van modelparameters en achterliggende parameters waaruit de modelparameters worden afgeleid. De modelleur kan op basis van een datamodel naar eigen inzicht modellen bouwen voor een bepaald gebied, met een bepaalde discretisatie, voor een bepaalde periode, enzovoort.

Ook integraal boven- en ondergronds rekenen aan stedelijk water is gebaat bij datamodellen, doordat veel verschillende soorten informatie nodig zijn vanuit de verschillende waterdomeinen. Daarbij is een groot verschil in informatiebeschikbaarheid van enerzijds de bovengrond en anderzijds de ondergrond.

#### 5.1.2 Beschikbaarheid bovengrondse informatie

Bovengrondse informatie is in een steeds groter detail toegankelijk. 3Di maakt gebruik van detailinformatie van de maaiveldhoogte (AHN3<sup>2</sup>) en van het landgebruik c.q. verhardingstypen (BGT<sup>3</sup>) (Figuur 5-1).



Figuur 5-1 Detail van de Basisadministratie Grootschalige Topografie, met onderscheid in verschillende soorten verharding. Het getoonde voorbeeld komt uit Rotterdam.

<sup>2</sup> Actueel Hoogtebestand Nederland, versie 3.

<sup>3</sup> Basisadministratie Grootschalige Topografie





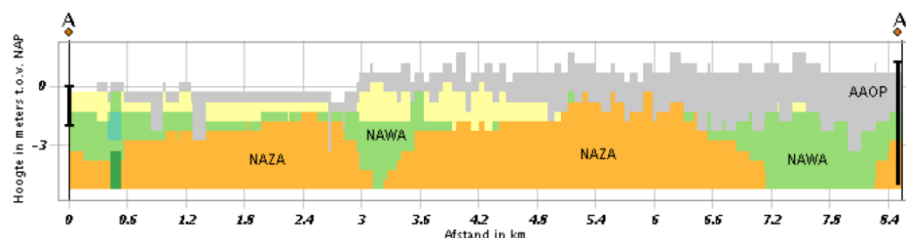
### 5.1.3 Beschikbaarheid ondergrondse informatie

Informatie van de stedelijke ondergrond is schaarser. Op landelijke schaal is informatie over de opbouw van de bovenste 30 meter van de Nederlandse ondergrond beschikbaar in GeoTOP. GeoTOP is een volledig 3D model waarbij tot een diepte van 30 - 50 m onder maaiveld de ondergrond in voxels (3D cellen) van 100 x 100 x 0,5 m wordt ingedeeld (Stafleu et al., 2013). GeoTOP wordt regiogewijs gemaakt: Figuur 5-2 toont het gebied in Nederland waarvoor GeoTOP momenteel beschikbaar is.



Figuur 5-2 Huidige dekkingsgraad van GeoTOP (Bron: [www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)).

Een groot deel van de ondiepe ondergrond in stedelijk gebied wordt in GeoTOP ingedeeld in de geologische eenheid 'Antropogeen opgebrachte grond' (AAOP). In deze eenheid wordt geen nader onderscheid gemaakt in grondsoort (Figuur 5-3).



Figuur 5-3 Antropogeen opgebrachte grond (AAOP), de geologische eenheid waarin het grootste deel van de stedelijke ondergrond is ingedeeld in GeoTOP. Het profiel loopt van het Westland (A) door de gemeente Den Haag naar Leidschendam. De onder AAOP liggende eenheden (NAWA, NAZA) behoren tot de Formatie van Naaldwijk, en worden wel onderverdeeld in zandige en kleiige lagen.

Omdat de horizontale doorlatendheid, een belangrijke sturende parameter voor grondwaterstroming, sterk afhankelijk is van de grondsoort, kan op basis van alleen GeoTOP geen betrouwbare geohydrologische parameterisatie van de stedelijke ondergrond worden gemaakt. In stedelijk gebieden is wel veel lokale informatie verzameld in de vorm van boringen, sonderingen en doorlatendheidsproeven. Veel van deze informatie is versnipperd bij o.a. gemeenten, ingenieursbureaus en aannemers aanwezig. Voor zover deze informatie wel landelijk is ontsloten (via [www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)), ontbreekt het aan een betrouwbare methode om deze te vertalen naar gebiedsdekkende informatie. De oorzaak hiervan is de zeer grote ruimtelijke variabiliteit in de stedelijke ondergrond, als gevolg van de vele vormen van menselijk ingrijpen: ophogen, vergraven, dempen, etcetera.



Met het project 3Di Down Under is het niet mogelijk om vast te stellen of een gebiedsdekkend informatiebestand van de stedelijke ondergrond überhaupt mogelijk is. Wel wordt gesignaleerd dat een combinatie van de eerder in dit rapport beschreven bovengrondse informatiebronnen met ondergrondse gegevens uit GeoTOP kansen biedt om een stap voorwaarts te zetten.

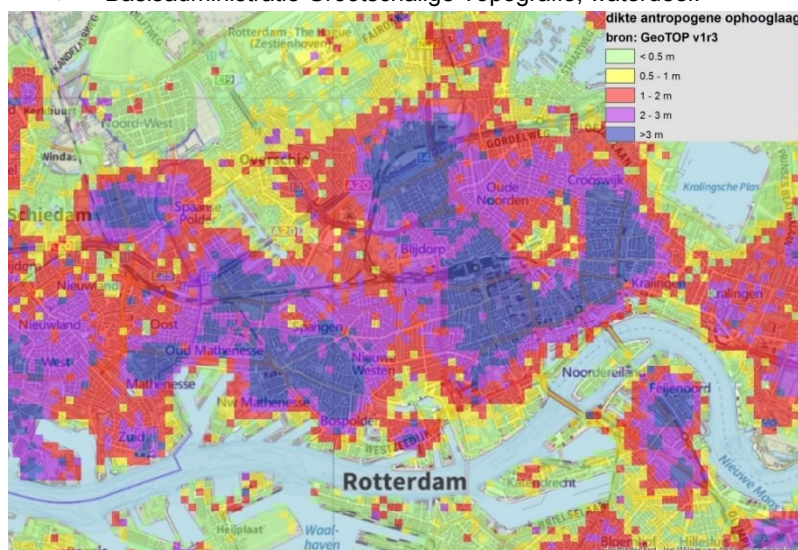
Onderstaand wordt een conceptueel raamwerk gepresenteerd voor een datamodel voor de ondergrondse component van stedelijke watermodellen, door koppeling van boven- en ondergrondse informatie. Het raamwerk biedt de mogelijkheid om te komen tot een datamodel in de vorm van een initiële parameterisatie van de stedelijke ondergrond (lithologie, doorlatendheid, bergingscapaciteit). Dit datamodel is bedoeld als 'discussiemodel': het moet vervolgens getoetst worden aan lokale gebiedskennis bij gemeenten, om vast te stellen in hoeverre het raamwerk in staat is om betrouwbare informatie te genereren. Als dit geval is, kan het datamodel worden verfijnd en aangescherpt met lokale metingen (boorbeschrijvingen, doorlatendheidsproeven). Als dit niet het geval is, is in ieder geval een structuur (en een proces) gecreëerd waarbij partijen hun ondergrond-gerelateerde gegevens kunnen toeleveren aan een groeiend datamodel.

## 5.2 Conceptueel raamwerk datamodel stedelijke ondergrond

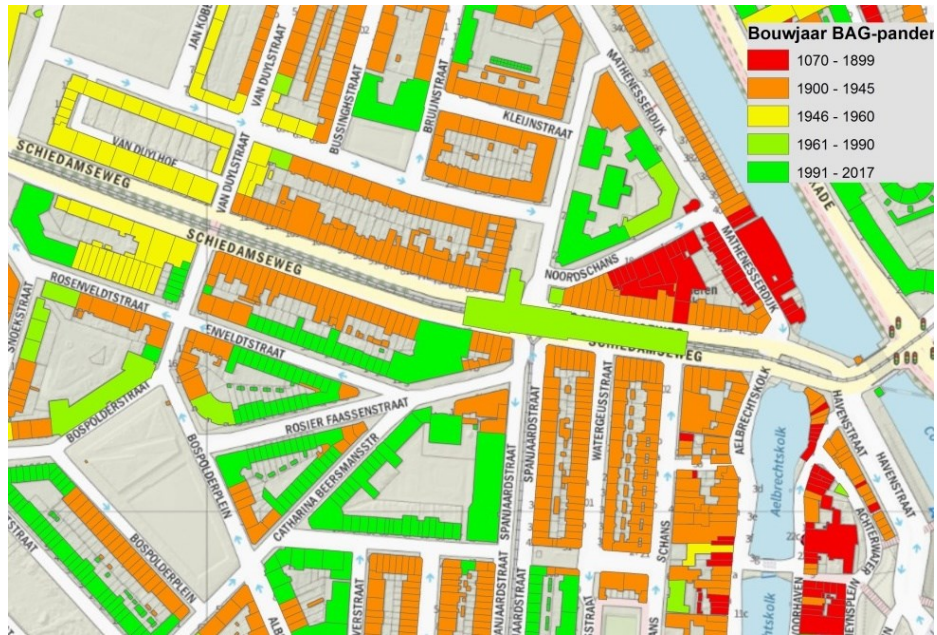
In deze paragraaf wordt eerst een overzicht gegeven van de informatiebronnen die bruikbaar worden geacht voor een datamodel van de stedelijke ondergrond. Vervolgens wordt aangegeven op welke manier de verschillende informatietypen gecombineerd zouden kunnen worden.

Mogelijk bruikbare informatiebronnen hiervoor zijn:

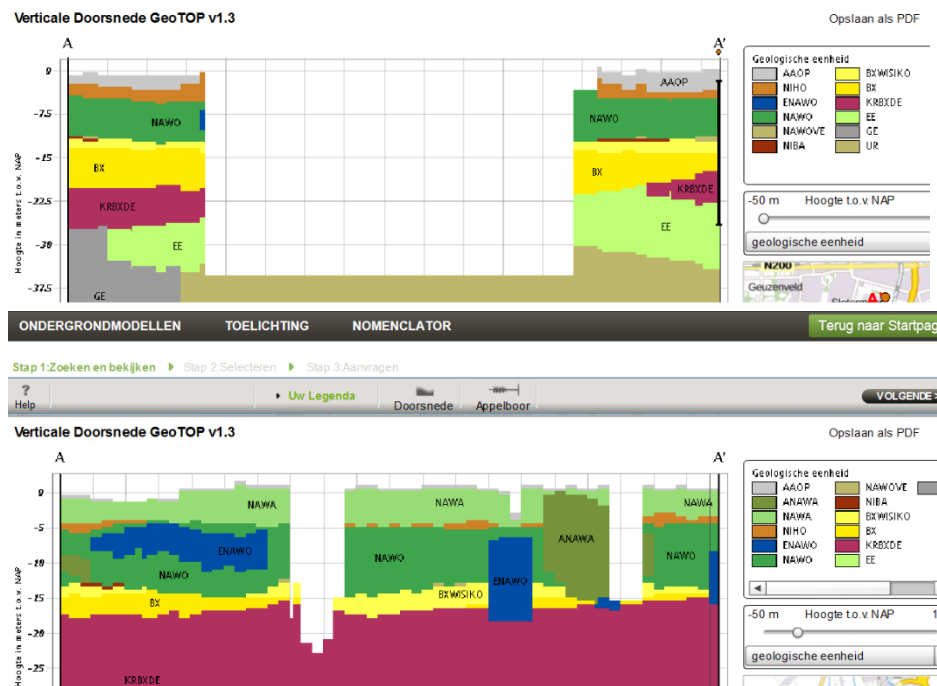
- › GeoTOP: Dikte, niveau top en niveau onderkant van de antropogeen opgebrachte laag (AAOP) (Figuur 5-4).
- › GeoTOP: Geologische eenheid en lithologie die direct onder en/of naast AAOP aanwezig is (aangrenzende eenheid)
- › GeoTOP: Maaiveld- en waterbodemoogte (Figuur 5-6).
- › Basisadministratie Adressen en Gebouwen: bouwjaar (Figuur 5-5).
- › Basisadministratie Grootchalige Topografie, wegdeel, begroeid terreindeel, onbegroeid terreindeel: type verharding (Figuur 5-1).
- › Basisadministratie Grootchalige Topografie, waterdeel.



Figuur 5-4 Dikte van de antropogeen opgebrachte ophooglaag (eenheid AAOP) in GeoTOP.



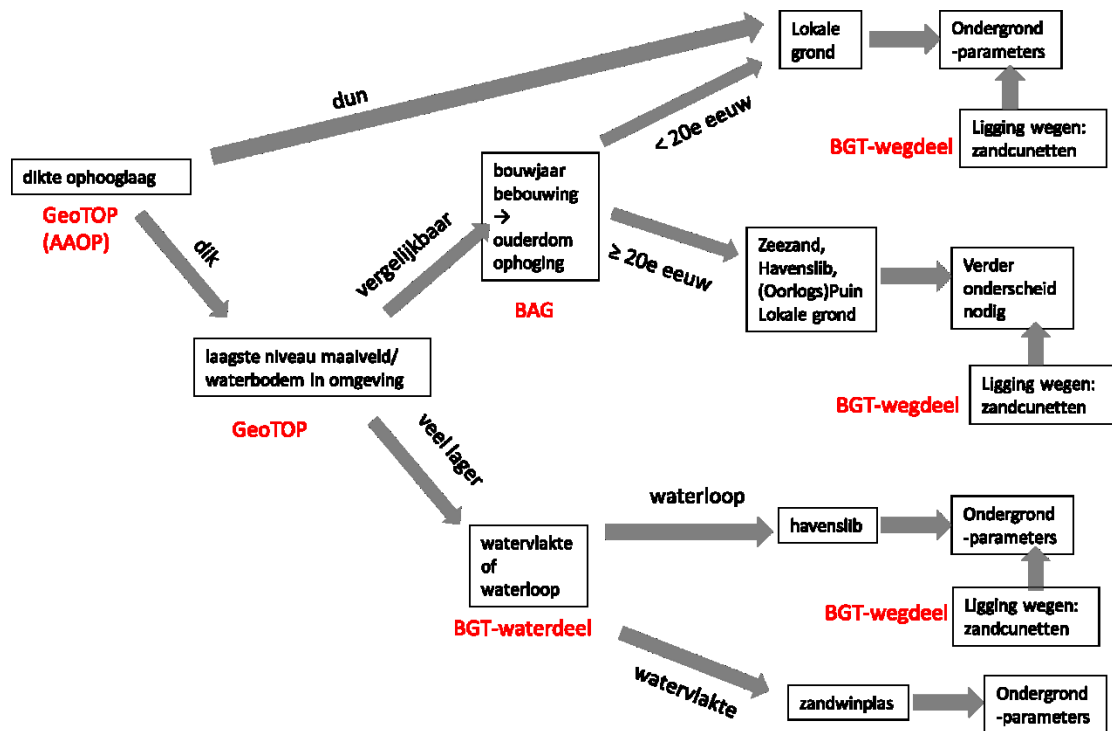
Figuur 5-5 Detail uit de Basisadministratie Adressen en Gebouwen (BAG). Het getoonde voorbeeld komt uit Rotterdam.



Figuur 5-6 Dwarsprofielen over de Sloterpas (boven) en het Westelijk Havengebied (onder) in Amsterdam. De Sloterpas is een zandwinplas en is in GeoTOP te herkennen aan het lage maaiveld/waterbodenniveau van circa NAP -35 m. De havens zijn ook te herkennen aan een laag maaiveld/waterbodenniveau (Bron: GeoTOP).



In Figuur 5-7 is een voorbeeld van een raamwerk weergegeven dat kan ontstaan door combinatie van deze informatiebronnen. Het doel van het raamwerk is om een globaal onderscheid naar ondergrondparameters (lithologie, doorlatendheid, bergingscoëfficiënt) in stedelijk gebied mogelijk te maken, gebruik makend van aanvullende informatie, deels ondergronds, deels bovengronds.



Figuur 5-7 Conceptueel raamwerk voor datamodel van de stedelijke ondergrond. De gebruikte informatiebronnen zijn met rode letters weergegeven.



## 6 Literatuurlijst

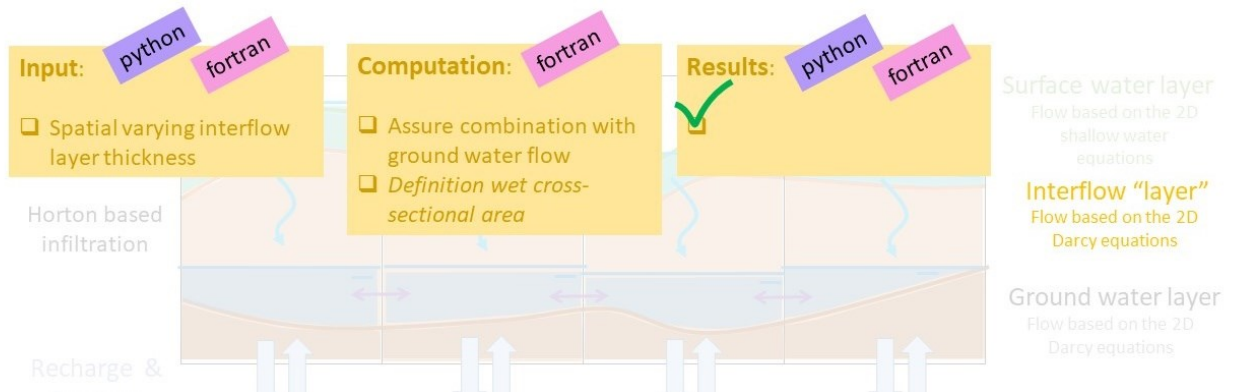
- Boogaard, F.C. (2015) Stormwater characteristics and new testing methods for certain sustainable urban drainage systems in The Netherlands. PhD thesis, TU Delft.
- Bot, B. (2016) Grondwaterzakboekje, 2e editie, Rotterdam.
- Casulli V. (2009) A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 60(4), 391-408.
- Hooghoudt, S.B. (1940) Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond. *Versl. Landbouwk. Ond.*, no. 46: p.515-707.
- Kuiper, M.J. (2010) Grondwateronderzoek Marlot te Den Haag. Wareco rapport KH19, RAP20100526 (concept).
- Mogos, B.M. (2018) Prinseneiland, Amsterdam: a water balance. MSc thesis, Utrecht University i.s.m/. Waternet.
- Roelofsen, F., Goorden, N. (2008) Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht): Onderzoek naar effecten van stopzetting grondwaterontrekking DSM Delft - Technisch rapport. Delft Cluster rapport 092.35161.
- Rutten, P.J.P. (2013) The urban water cycle: A case study of the Prinseneiland, Amsterdam. MSc thesis, TU Delft, i.s.m. Deltares.
- Stafleu, J., Maljers D., Busschers F.S., Gunnink J.L., Schokker J., Dambrink R.M., Hummelman H.J., Schijf M.L. (2013) GeoTOP modellering. TNO-rapport 2012 R10991.
- Stelling, G.S. (2012) Quadtree flood simulations with sub-grid digital elevation models. *Water Management* 165 (10), 567-580.
- Ven, F.H.M. van de (2007) Water management in urban areas. Collegedictaat CT5510 TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- Volp, N.D., Van Prooijen, B.C., Stelling G.S. (2013) A finite volume approach for shallow water flow accounting for high-resolution bathymetry and roughness data. *Water Resources Research* 49 (7), 4126-4135.



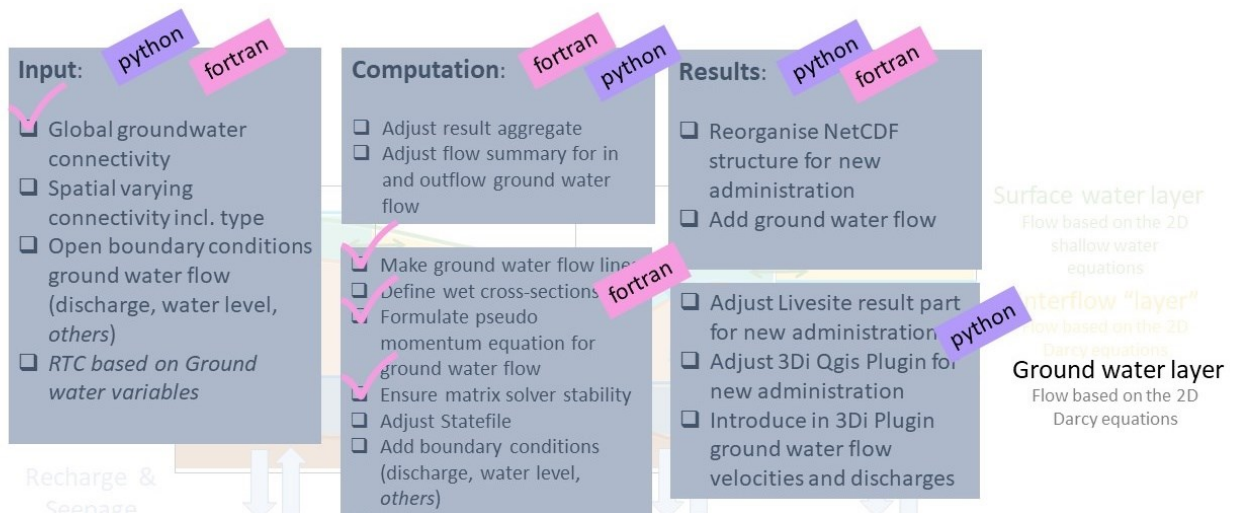
# I. Testoverzicht d.d. 10-11-2017

- Really done
- Test phase in python part
- Test phase in fortran part

## Interflowlaag



## Grondwaterlaag

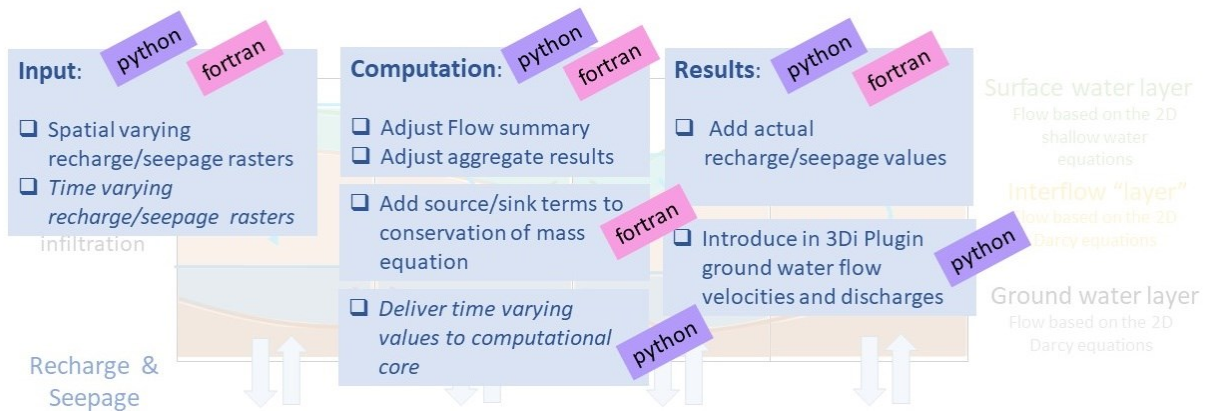




## Infiltratie



## Kwel en wegzijging

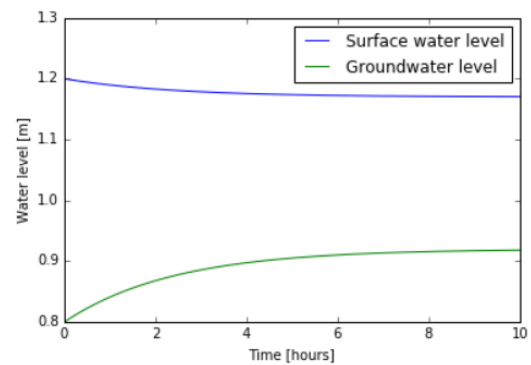
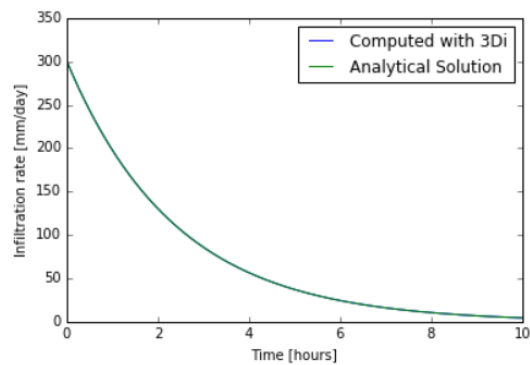
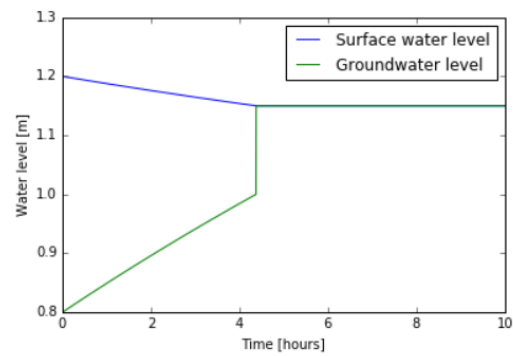
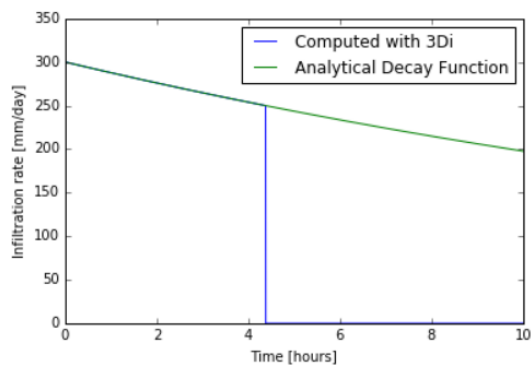




## II. Testresultaten

### Theoretische testen van infiltratie

- › Horton met initieel water op maaiveld (volume boven moet onder eindigen)
- › Horton met neerslag (boven en onder de Horton intensiteit)
- › Horton met grondwaterstijging tot boven maaiveld







### III. Overzicht van onverzadigde-zone simulatiemodellen

Numerous infiltration equations exist. Four frequently used approaches are described in this chapter.

#### Richards equation

The Richards equation is a general partial differential equation describing water movement in unsaturated non-swelling soils. The transient state form of this flow equation in 1-D is:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_{\theta} \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

$K$	conductivity [-]
$\theta$	soil moisture content [-]
$t$	time [T]
$h$	water potential [L]
$z$	place potential [L]

If soil moisture content prediction is the objective of simulation, solving the Richards equation is generally a good option. Solving the Richards equation can however be computationally expensive.

The Richards equation and derivatives are widely used for soil moisture simulation. Most often it is assumed that infiltration only occurs in the vertical direction requiring solving the equation only in one direction. The soil profile is discretized in multiple soil layers. In reality water will infiltrate along the potential gradient which results from both the gravity and soil moisture potential. In case that this gradient is not in vertical direction the direction of infiltration will not be vertical either, e.g. in sloping areas or when the surface is not wetted uniformly.

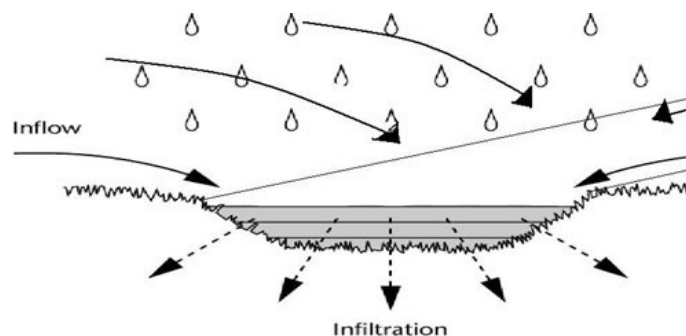


Figure 6.1 Infiltration occurs along the soil moisture potential gradient (Source: <http://www.netregs.org.uk/environmental-topics/water/sustainable-urban-drainage-systems-suds/>)

Sharp boundaries in soil physical parameters (e.g. sand on top of clay) often require additional layers to increase numerical stability.



Criticism according to Wikipedia:

The numerical solution of Richards equation has been criticized for being computationally expensive and unpredictable because there is no guarantee that a solver will converge for a particular set of soil constitutive relations. This prevents use of the method in general applications where the risk of non-convergence is high. The method has also been criticized for over-emphasizing the role of capillarity, and for being in some ways 'overly simplistic'. In one dimensional simulations of rainfall infiltration into dry soils, fine spatial discretization less than one cm is required near the land surface. In three-dimensional applications the numerical solution of Richards' equation is subject to aspect ratio constraints where the ratio of horizontal to vertical resolution in the solution domain should be less than about 7.

To simulate flow in the unsaturated zone the soil can be discretized in multiple layers. In general the more layers, the better flow and soil moisture content can be simulated at the cost of calculation time. The number of layers to simulate the unsaturated zone depends on the objective of the simulation and the properties of the unsaturated zone.

If the objective is to simulate soil moisture content of a homogeneous soil three layers seems to be the minimum:

- › Topsoil to simulate soil evaporation (ca. 5 cm)
- › Rootzone to simulate soil transpiration (ca. 40-100 cm)
- › Deep unsaturated zone to simulate flow between the rootzone and groundwater (>0cm)

To simulate infiltration during a rainfall event it is not strictly necessary to simulate 3 layers.

The layers can be used to represent layers with different soil physical parameters, e.g. clay and sand. Different layers with contrasting properties cause numeric instability (small timesteps). The same counts for very thin model layers.

In case of an explicit calculation scheme, the thickness and number of the layers influences the flow rates. Simulation of fluxes in a thick unsaturated zone is less precise as it is generally based on an average or equilibrium soil moisture content. Progression of infiltration fronts is not simulated within layers.

## Horton equation

The Horton approach is an empirical approximation based on infiltration of a wetting front in a homogeneous soil. The infiltration rate reduces from an initial infiltration rate to the final infiltration rate over time as result of the downward progression of the wetting front. Parameters of the equation are fitted based on field experiments.

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c)e^{-\beta t}$$

$f_p$	infiltration capacity or potential infiltration rate [ $\text{Lt}^{-1}$ ]
$f_c$	final constant infiltration rate [ $\text{Lt}^{-1}$ ]
$f_0$	infiltration capacity at $t=0$ [ $\text{Lt}^{-1}$ ]
$\beta$	soil parameter that controls the rate of decrease of infiltration rate over time [ $\text{t}^{-1}$ ]
	dependent on initial soil moisture content and application rate
$t$	time after start of infiltration [t]



The original Horton equation is valid only if the rate of rainfall is always higher than the infiltration capacity of the soil throughout a rainfall-infiltration process.

The Horton equation is valid under the following conditions and assumptions:

- › Infiltration along sharp wetting front
- › Infiltration time is dependent rather than based on progression of the infiltration front
- › Homogeneous soil profile is assumed
- › Water depth (ponding) has no effect in infiltration
- › Original equation is only applicable when the precipitation rate is larger than the infiltration rate (E.g. Verma (1982)). This means that during rainfall events in which the initial precipitation rate is smaller than the infiltration rate, the infiltration capacity is underestimated.
- › Initial soil moisture content is a parameter in the equation and is not accounted for. If the equation is applied under other wetting conditions the parameters need to be adjusted.

### Limitations of Horton and workarounds

Standaardbui08 from Leidraad Riolering, C2100 is given as an example of a rainfall event which starts with a low rainfall intensity. In this case for many soils the precipitation intensity is lower than the infiltration capacity.

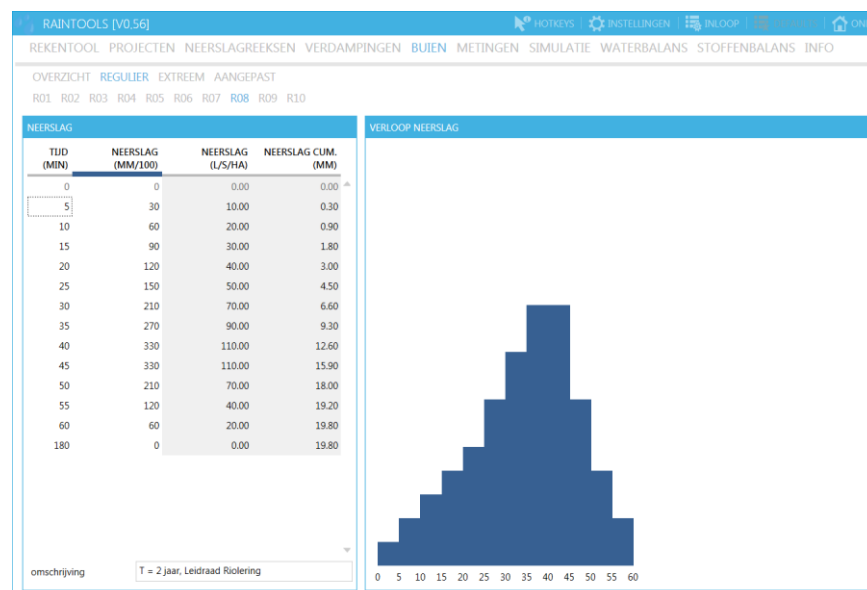


Figure 6.2 Bui 8 Leidraad Riolerling (source: raintools)

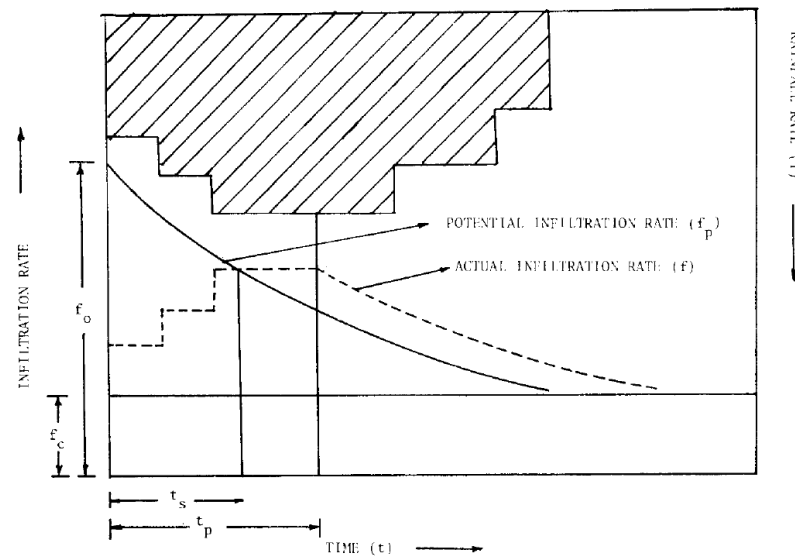


Figure 6.3 Infiltration capacity in case initial precipitation rate is smaller than infiltration rate

Additionally the initial precipitation capacity depends on the initial soil moisture content. This can be accounted for as assumption for the  $t=0$  situation, i.e. the infiltration capacity and  $\beta$  need to be adjusted accordingly.

In case of simulation of a series of rainfall events drying of the soil by percolation, rootwater uptake or soil evaporation influences the initial infiltration rate for the next rainfall event. Assuming that separate rainfall events occur, the initial water content and thereby the initial infiltration rate needs to be accounted for. Furthermore, definition of events rainfall events or infiltration events is not simple. Especially because infiltration events do not end at the same time as rainfall events. The dilemma is to recognize in which cases to reset the timer and start a new infiltration event with a lower initial infiltration rate (as soil moisture content has increased) and in which case to continue an event with a low infiltration rate due to continued progression of the infiltration front.

### Philip equation

The Philip (1955) approach assumes the progression of a sharp wetting front. The infiltration reduces over time since beginning of the rainfall event and depends on the sorptivity and a final constant infiltration rate:

$$f = \frac{S}{2} t^{-1/2} + C_a$$

- $f$  Infiltration rate [ $Lt^{-1}$ ]
- $S$  Sorptivity [ $Lt^{-1/2}$ ]
- $t$  Time after start of infiltration [t]
- $C_a$  Constant rate [ $Lt^{-1}$ ]

Also Philip assumes the precipitation to be larger than the infiltration rate.

Wikipedia: Sorptivity is a measure of the capacity of the medium to absorb or desorb liquid by capillarity. According to C Hall and W D Hoff, the sorptivity expresses the tendency of a material to absorb and transmit water and other liquids by capillarity.

Sorptivity thus results from a matric potential of the soil, a place potential and unsaturated conductivity. Sorptivity can be determined from field experiments.



Main assumptions that are made:

- › Sharp wetting front
- › Rainfall rate larger than the infiltration rate
- › Homogeneous soil profile
- › Ponding is not accounted for

Application of the Philip equation in situations where the initial precipitation rate is smaller than the infiltration rate results in underestimation of the infiltration capacity.

## Green-Ampt equation

Green and Ampt (1911) described an approach for infiltration on porous media based on physics. The approach simulates infiltration as a sharp wetting front. Contrary to Horton and Philip, the infiltration rate depends on the volume of infiltrated water (depth of wetting front) rather than the time since infiltration started. It assumes steady state rain in case of determination of cumulative infiltration.

Mein R.G. and C.L. Larson (1973) formulate Green and Ampt (1911) for the infiltration rate  $f$  [Lt<sup>-1</sup>] as follows:

$$f(t) = K_s + K_s \frac{|\psi_f| (\theta_s - \theta_i)}{F} \text{ for } t < T_p \text{ and } f(t) = P \text{ for } t > T_p$$

where,

- $K_s$  Saturated conductivity [-]
- $\theta_s$  Saturated soil moisture content [-]
- $\theta_i$  Initial soil moisture content [-]
- $\psi_f$  Matric potential at the wetting front [L]
- $F$  Depth of the wetting front [L]
- $T_p$  Time to ponding [T]

Matric potential at wetting front can be difficult to estimate from data.

Assumptions:

- › Sharp wetting front
- › A constant rainfall rate
- › Homogeneous soil profile

For functions relating soil moisture content to matric potential see: Mein R.G. and C.L. Larson (1973), Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources Research 9(2): 384-394.



## Summary

The table below shows a brief overview of infiltration equation properties.

Table Overview properties of infiltration equations

Equation	Type	Rainfall	Infiltration front	Nr Unknowns	Soil profile
<b>Horton</b>	Empirical	Prec>Inf	Sharp wetting front	4	Homogeneous
<b>Philip</b>	Empirical	Prec>Inf	Sharp wetting front	2	Homogeneous
<b>Green Ampt</b>	Empirical	Prec constant	Sharp wetting front	6	Homogeneous
<b>Richards</b>	Physically based, partial differential	P variable	Soil moisture concentration	4	Heterogeneous (Homogeneous within node)

The Horton, Philip and Green Ampt are empirical equations. All equations estimate the infiltration rate at time (t) from the initial conditions and all require a precipitation rate that is larger than the infiltration rate or a constant precipitation rate. In practice this is (almost) never the case. For Horton and Philip there are approaches to overcome this shortcoming by assuming that the progression of the wetting front is limited to the amount of infiltrated precipitation and adjusting time since start of the precipitation event accordingly. Similarly, in the Green Ampt approach the progression of the wetting front can be limited by the amount of precipitation and consequent amount of infiltrated water.

Because hydrological simulation models are time dependent this provides a relatively easy option for coping with conditions of variable precipitation rates and situations where the precipitation rate is lower than the infiltration capacity.

Richards equation is a physically based partial differential equation and is widely used and probably the best equation for soil moisture and unsaturated flow predictions. It comes however at a relatively high computational cost and is not known for its stability, e.g. the simulation at the interface of layers with different soil physical properties.

Horton, Philip, and GreenAmpt infiltration equations simulate the progression of a wetting front during a rainfall event, while Richards simulates soil moisture fluxes between soil layers based on potential differences.

As long as the rainfall intensity is larger than the infiltration rate as can be the case with extreme rainfall events sharp wetting fronts can occur. Due to soil heterogeneity these fronts are not straight, but irregular. In other cases infiltration will occur more like the situation that is shown in the figure below, where due to a large soil moisture potential gradient the wetting front is diffuse.

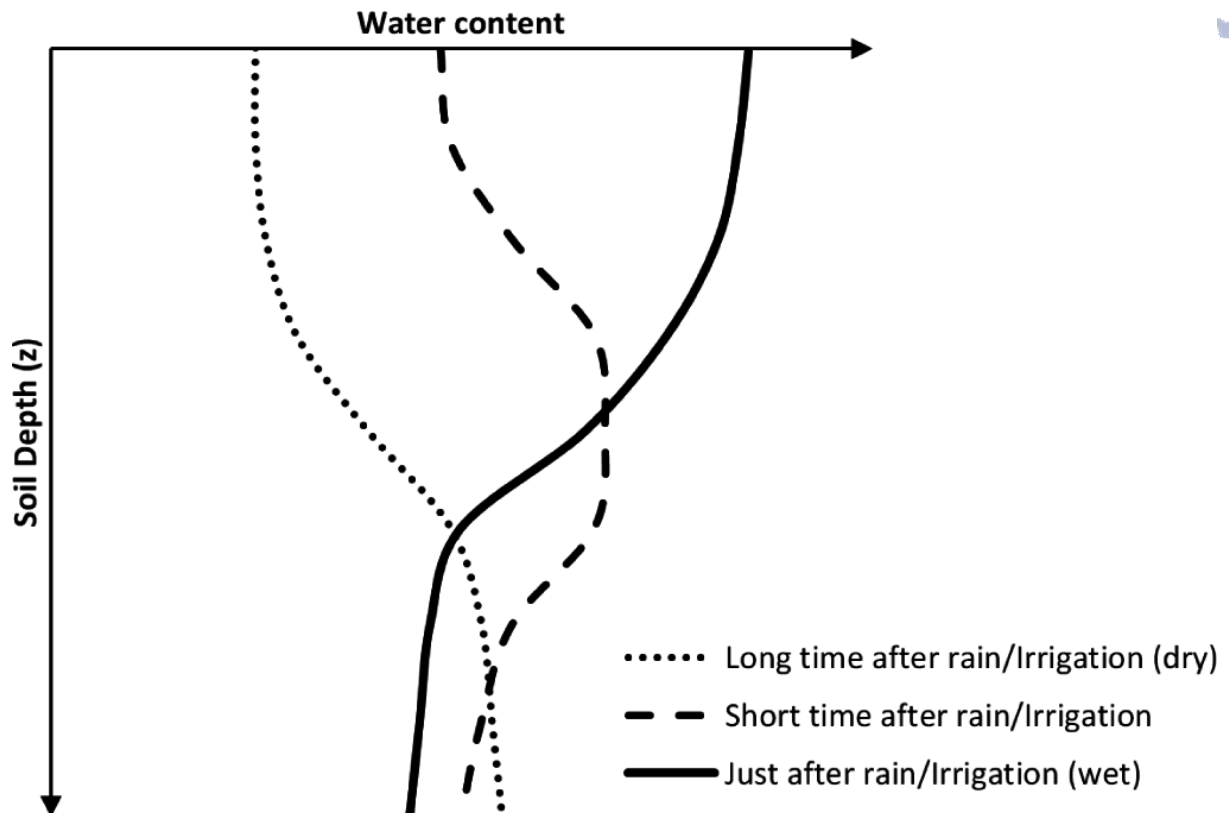


Figure 6.4 Soil moisture content profile after infiltration (<http://www.mdpi.com/1099-4300/17/6/4454/htm>)

A major consideration for the choice of the infiltration equation comes from the methods that are currently used. For example the 'NWRW-inloopmodel Leidraad Riolerig of Rioned' uses an adjusted version of Horton.

Also data availability determines the choice for a certain infiltration equation. As Horton is widely used in hydrological models many parameters sets are available. The same accounts for the Richards equation. At the same time the soil type or texture are major unknowns in urban areas, because urban areas have been poorly mapped and the human interference in the subsurface is large and often poorly documented. Therefore there is a large uncertainty of soil characteristics and especially soil physical parameters.

Given the large uncertainty about soil physical parameters the choice for a simple equation for which parameters are relatively well known can be justified.

In a comparison study for cumulative infiltration equations (Zolfhagari, 2012) Horton performed slightly better than Philip equation. The here not mentioned Kostiaikov model ( $I = \alpha_1 t^{\beta_1}$ ) and models derived from it performed better than Philip and Horton.

However all equations in the comparison were capable of reproducing the cumulative infiltration rates with a  $R^2 > 0.99$ .



When using one on the empirical solutions the user should realize at least:

- › Infiltration is assumed to occur along sharp wetting front, which is not always the case
- › Infiltration is assumed to be either time or wetting front depth dependent
- › Horton does not account for initial soil moisture conditions, Philip uses sorptivity to account for soil moisture, and in Green-Ampt soil moisture is a parameter in the equation.
- › A homogeneous soil profile is assumed
- › Precipitation should be larger than the infiltration rate or constant, a modified version of the equations can be used to account for this