

A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size, with some being significantly larger than others, and they are interconnected in a complex, non-linear fashion.

KWR 2023.062 | December 2023

**Effect van  
waterbesparing in  
stedelijk gebied op het  
regionale  
watersysteem**

**Casus SUPERLOCAL**



# Rapport

## Effect van waterbesparing in stedelijk gebied op het regionale watersysteem

Casus SUPERLOCAL

**KWR 2023.062 | December 2023**

### Opdrachtnummer

403664-001

### Projectmanager

Dr. Klaasjan Raat

### Opdrachtgever

Dit onderzoek is mede mogelijk gemaakt door het programma Water in de Circulaire Economie (WiCE), onderdeel van het Bedrijfstakonderzoek van de drinkwatersector, en het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

### Auteurs

Dr.ir. Henk Krajenbrink, Dr. Sija Stofberg

### Kwaliteitsborger

Dr.ir. Ruud Bartholomeus

### Verzonden naar

Programma Water in de Circulaire Economie (WiCE), Deltaprogramma Zoetwater

Dit rapport is openbaar.

### Keywords

Watersysteem, waterbesparing, stedelijk gebied, systeemmodellering

Jaar van publicatie  
2023

Meer informatie  
Dr.ir. Henk Krajenbrink  
T +31 (0)30 606 9647  
E [henk.krajenbrink@kwrwater.nl](mailto:henk.krajenbrink@kwrwater.nl)

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)

**KWR**

December 2023 ©

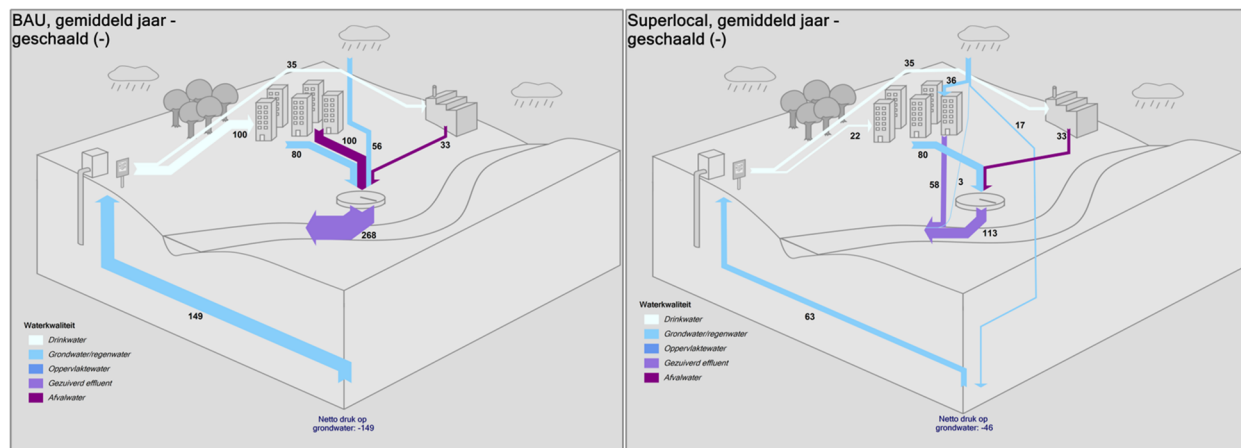
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen,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

# Managementsamenvatting

## Grootschalige toepassing van waterbesparing en -hergebruik in stedelijk gebied beïnvloedt het regionale watersysteem en vraagt om systeembegrip

**Auteurs:** Henk Krajenbrink en Sija Stofberg.

Waterbesparing, hergebruik en het afkoppelen van hemelwater in stedelijk gebied kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan het verlichten van de druk op de zoetwatervoorziening. De laatste jaren zijn op lokale schaal diverse waterbesparende initiatieven opgestart, zoals het concept SUPERLOCAL in Kerkrade. We hebben met verschillende methoden onderzocht wat het effect is op het regionale watersysteem wanneer dit concept op grote schaal wordt toegepast. Toepassing van SUPERLOCAL kan leiden tot een lagere netto druk op het grondwatersysteem en geringere fluctuatie in de oppervlaktewaterafvoer. Sankey-diagrammen geven een eerste indruk van de globale effecten van waterbesparingsmaatregelen, maar bieden geen inzicht in eventuele wisselwerkingen in het watersysteem. Aanvullende systeemmodellering laat zien dat het precieze effect van maatregelen op het watersysteem sterk afhankelijk is van gebiedskenmerken, gekozen randvoorwaarden en de interactie tussen grond- en oppervlaktewater. Kenmerken van bijvoorbeeld het systeem van ontwatering en afwatering (systeemweerstand) hebben grote invloed op de omvang van de effecten bij toepassing van SUPERLOCAL. De hier gepresenteerde aanpak kan snel inzichten bieden, maar is relatief grof. Bij de keuze voor specifieke maatregelen blijven gedetailleerde ruimtelijke simulaties noodzakelijk.



Sankey-diagrammen geven snel inzicht in de waterstromen in stedelijk gebied in de conventionele situatie (links) en met toepassing van SUPERLOCAL (rechts)

### Belang: water besparen in de stad kan druk op de watervoorziening verminderen

De zoetwatervoorziening staat de laatste jaren onder toenemende druk door klimaatverandering en een stijgende watervraag. Een groot deel van het geproduceerde drinkwater is niet voor bestemd voor menselijke consumptie, maar gaat naar huishoudelijk

gebruik. Waterbesparing, hergebruik en het afkoppelen van hemelwater in stedelijk gebied kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan het verlichten van de druk op de zoetwatervoorziening. De laatste jaren zijn er op lokale schaal diverse waterbesparende initiatieven opgestart, zoals SUPERLOCAL in Kerkrade.

Opschaling is nodig om een wezenlijke bijdrage te leveren aan de zoetwatervoorziening. Het is belangrijk te weten hoe maatregelen voor waterbesparing en -hergebruik doorwerken op het regionale watersysteem als ze op grote schaal worden toegepast.

### **Aanpak: opschaling SUPERLOCAL kwantificeren met Sankey-diagrammen en systeemmodellering**

We gebruiken het project SUPERLOCAL in Kerkrade als casus om de effecten van waterbesparing en -hergebruik in stedelijk gebied op regionale schaal te verkennen. We onderzoeken dit op twee manieren:

- Visualisatie van veranderingen in het watersysteem met Sankey-diagrammen, zonder modelstudie.
- Modellering van de interactie tussen waterketen en watersysteem met het systeem-dynamische model Vensim. Een systeem-dynamisch model geeft inzicht in niet-lineair gedrag van complexe systemen en biedt de mogelijkheid om de doorwerking van veranderingen in het stedelijke watersysteem in het natuurlijke watersysteem te kwantificeren.

### **Resultaten: gebiedskenmerken bepalen hoe SUPERLOCAL regionaal watersysteem beïnvloedt**

Toepassing van SUPERLOCAL kan de vraag naar drinkwater verminderen met ruim 50% op jaarbasis. Hergebruik van hemelwater maakt de drinkwatervraag wel meer afhankelijk van klimaatfactoren als droogte. De combinatie van waterbesparing en het afkoppelen van hemelwater zorgt ervoor dat de totale jaarlijkse restwaterstroom met bijna 60% afneemt. De stroom richting RWZI wordt bovendien constanter in de tijd. SUPERLOCAL beïnvloedt ook het watersysteem. De netto druk op het grondwater kan aanzienlijk verminderen door extra infiltratie van hemelwater en een verminderde grondwateronttrekking voor drinkwater, afhankelijk van de beschouwde ruimtelijke schaal. Doordat er minder effluent wordt geproduceerd, kan de afvoer naar oppervlaktewater lager worden.

Systeemmodellering met Vensim leert dat de precieze effecten van de toepassing van SUPERLOCAL ook afhankelijk zijn van de interactie

tussen grondwater en oppervlaktewater. Extra infiltratie van hemelwater en verminderde (freatische) grondwateronttrekking kunnen leiden tot extra afvoer richting oppervlaktewater, waardoor het netto-effect van verminderde effluentafvoer naar oppervlaktewater tijdens droge perioden wordt gedempt of zelfs positief is. Toepassing van SUPERLOCAL zorgt zo voor een constantere afvoer met minder fluctuaties. Hoe omvangrijk dergelijke effecten op het watersysteem zijn, hangt sterk af van (combinaties van) gebiedskenmerken, zoals de eigenschappen van het systeem van ontwatering en afwatering (systeemweerstand).

### **Toepassing: keuze van maatregelen in het watersysteem vraagt om systeembegrip**

Grootschalige toepassingen van waterbesparingsconcepten als SUPERLOCAL kunnen het regionale watersysteem beïnvloeden. Hoe groot de effecten zijn, en op welke schaal ze optreden, hangt sterk samen met gebiedskenmerken en gekozen randvoorwaarden. Kennis van deze factoren is essentieel om te kunnen vaststellen of (grootschalige) toepassing van dergelijke concepten zinvol is op een bepaalde locatie.

Welke methode het meest geschikt is om de effecten in beeld te brengen, hangt af van het precieze doel. Beide hier toegepaste methoden hebben voordelen en beperkingen. Visualisatie met Sankey-diagrammen geeft snel inzicht in de globale effecten van een groot aantal combinaties van maatregelen. Dit kan beleidsmakers helpen in de afweging hoe kansrijk maatregelen zijn. Interacties in het watersysteem worden hierin echter niet meegenomen. Via een systeembenadering kunnen variaties en interacties wel worden verkend en eventuele kansrijke richtingen worden onderzocht. De hier gepresenteerde systeem-dynamische benadering (Vensim) kan snel inzichten bieden, maar is relatief vereenvoudigd. Voor het kiezen van maatregelen blijven gedetailleerde ruimtelijke simulaties noodzakelijk.

### **Rapport**

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Effect van waterbesparing in stedelijk gebied op het regionale watersysteem* (KWR-2023.062).

# Inhoud

<b>Managementsamenvatting</b>	<b>3</b>
<b>Inhoud</b>	<b>5</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1 Aanleiding en probleemstelling	7
1.2 Doel en leeswijzer	8
<b>2 SUPERLOCAL</b>	<b>10</b>
2.1 Projectbeschrijving	10
2.2 Aanpassingen in het ontwerp en berekende waterbesparing	10
<b>3 Doorwerking SUPERLOCAL op het stedelijke watersysteem – Sankey-benadering</b>	<b>12</b>
3.1 Inleiding	12
3.2 Aannames voor waterstromen in stedelijk gebied	12
3.3 Sankey-diagrammen	13
3.4 Effecten binnen waterketen	15
3.4.1 Drinkwaterproductie en -levering	15
3.4.2 Afvoer naar RWZI	17
3.5 Effecten op watersysteem	19
3.5.1 Effluentlozing op oppervlaktewater	19
3.5.2 Infiltratie van hemelwater en afname van grondwateronttrekking voor drinkwater	21
<b>4 Doorwerking SUPERLOCAL op het regionale watersysteem – Vensim-benadering</b>	<b>23</b>
4.1 Inleiding	23
4.2 Modelbeschrijving en aannames	23
4.3 Resultaten	26
4.3.1 Waterbalans basismodel	27
4.3.2 Effect op grondwater	27
4.3.3 Effect op afvoer	29
<b>5 Discussie en synthese</b>	<b>34</b>
5.1 Potentiële effecten van SUPERLOCAL op waterketen en watersysteem	34
5.2 Aanvullende inzichten via de Vensim-benadering	35
5.3 Synthese	37
<b>6 Bronvermelding</b>	<b>39</b>

<b>Bijlagen</b>	<b>40</b>
I <b>Overzicht van de variabelen in het Vensim-model</b>	<b>41</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en probleemstelling

De zoetwatervoorziening in Nederland en Vlaanderen staat de laatste jaren steeds meer onder druk, door een combinatie van klimaatverandering (drogere zomers) en een toenemende vraag vanuit verschillende sectoren. De problematiek gaat ook niet voorbij aan de drinkwatervoorziening. Enerzijds is er een toenemende druk op de bronnen voor drinkwaterproductie (grondwater en oppervlaktewater), anderzijds staat ook de drinkwaterinfrastructuur onder druk tijdens piekvragen. Een groot deel van het geproduceerde drinkwater is bestemd voor huishoudelijk gebruik. Waterbesparing in huishoudens, zowel op woning- als op wijkniveau, kan zodoende een bijdrage leveren aan het verminderen van de druk op de watervoorziening.

De laatste jaren zijn er diverse waterbesparende initiatieven in stedelijk gebied (huishoudens en bedrijven; grote industrie wordt hier niet onder geschaard) opgestart in Nederland en daarbuiten. Deze initiatieven kunnen worden ingedeeld in drie categorieën:

1. **Waterbesparing** in huishoudens en bedrijven. Maatregelen om huishoudelijk watergebruik terug te dringen komen het vaakst voor. Enerzijds zijn dit technologische oplossingen, zoals de installatie van zuiniger apparaten; denk hierbij aan een waterbesparende douchekop, een vacuümtoilet, of een zuinige wasmachine. Anderzijds betreft dit campagnes die zich richten op waterbesparing door gedragsverandering: korter douchen, geen zwembadjes vullen bij grote droogte en spaarzaam de tuin sproeien. De effecten van gedragsveranderingen zijn vaak relatief beperkt (Brouwer et al., 2020) en op dit moment zijn er geen aanwijzingen dat hier op termijn grotere effecten te verwachten zijn.
2. **Hergebruik**. Daarnaast zijn er ook mogelijkheden om met technologische ingrepen in de waterketen het huishoudelijke watergebruik te verminderen. Deze ingrepen zijn veelal gericht op hergebruik van (fracties van het) afvalwater en hemelwater voor 'laagwaardige' huishoudelijke toepassingen, dat wil zeggen niet voor menselijke consumptie of blootstelling. Hierbij valt te denken aan het doorspoelen van toiletten of het draaien van de wasmachine. Een belangrijke aandachtspunt bij huishoudelijk hergebruik is de microbiologische veiligheid en het risico van foutieve aansluitingen (Hofman-Caris et al., 2023). Niettemin is de potentie van dergelijke maatregelen groot, wat ze interessant maakt om te verkennen.
3. **Hemelwater afkoppelen**. Door regenwater niet direct af te voeren naar de RWZI, zoals in conventionele systemen nog veel gebeurt, maar het langer vast te houden in stedelijk gebied en waar mogelijk lokaal te verwerken, kan de stedelijke watervraag ook worden teruggedrongen. Regenwater kan in stedelijk gebied infiltreren of tijdelijk worden opgeslagen, waardoor het ten goede komt aan bijvoorbeeld openbaar of particulier groen. Het biedt een buffer voor droge perioden, zodat dan niet met drinkwater hoeft te worden berekend.

De meeste initiatieven voor waterbesparing in stedelijk gebied zijn kleinschalig en worden doorgaans alleen op lokale schaal onderzocht. Om een wezenlijke bijdrage te leveren aan de zoetwatervoorziening, zouden maatregelen moeten worden opgeschaald. Een belangrijke vraag is dan wat het effect van grootschalige waterbesparing en -hergebruik is op het regionale watersysteem. Hoe werken bijvoorbeeld infiltratie van stedelijk hemelwater, verminderde drinkwaterproductie en een reductie van de afvoer naar de RWZI door op het regionale grond- en oppervlaktewater?



## 1.2 Doel en leeswijzer

Het overkoepelende doel van deze studie is het verkennen van de effecten van (grootschalige) waterbesparingen in stedelijk gebied op het regionale watersysteem. De interactie tussen de stedelijke waterketen, het grondwater en het oppervlaktewater is daarin een belangrijke component. De focus van het onderzoek ligt hierbij op Hoog Nederland, waar de relatie met het grondwater een belangrijke rol speelt. Het is een hypothetische studie, waarbij we proberen de bovengrens van de effecten van grootschalige inzet van waterbesparingsmaatregelen in beeld te brengen. We gebruiken het project SUPERLOCAL als casus om de effecten van waterbesparing en -hergebruik in stedelijk gebied op grotere schaal te verkennen. SUPERLOCAL is een herontwikkeling van een wijk in Kerkrade. Daarbij worden diverse waterbesparende maatregelen toegepast, waaronder hergebruik. Het project en de toegepaste maatregelen worden beknopt beschreven in hoofdstuk 2, met een verwijzing naar uitgebreidere achtergronddocumentatie.

We onderzoeken de effecten op twee verschillende manieren:

1. **Toepassing van Sankey-stroomdiagrammen, kortweg Sankey's.**

Sankey-stroomdiagrammen geven een schematische weergave van verbindingen binnen/tussen waterketen en watersysteem, waarbij de dikte van de pijlen proportioneel is voor de watervolumes per tijdseenheid. Visualisatie met stroomdiagrammen zoals Sankey's zijn zeer geschikt voor een snelle verkenning ('hoog over') van veranderingen in het watersysteem: veranderingen per waterstroom kunnen worden gevisualiseerd zonder uitgebreide modellering van het watersysteem als geheel. Voor SUPERLOCAL vergelijken we de conventionele situatie zonder waterbesparende maatregelen (*business as usual* ofwel *BAU*) met het scenario waarbij SUPERLOCAL wordt toegepast. De focus ligt hierbij op weergave van de waterstromen in de waterketen. Dit doen we zowel op de schaal van een (fictieve) wijk of regio als op de schaal van Hoog Nederland voor een gemiddeld jaar. De resultaten van deze verkenning worden beschreven in hoofdstuk 3.

2. **Modellering van de interactie tussen stedelijk water, grondwater en oppervlaktewater met behulp van watersysteemmodellering in het model Vensim.**

Het nadeel van een eenvoudige verkenning en visualisatie met Sankey-diagrammen is dat waterstromen doorgaans op zichzelf worden beschouwd, zonder interactie met andere componenten in het watersysteem (superpositie van effecten). Bovendien worden waterstromen uit het natuurlijke watersysteem vaak buiten beschouwing gelaten (denk aan interactie tussen grond- en oppervlaktewater), aangezien ze deels worden gestuurd door niet-lineaire processen in de tijd waarvoor meer modellering nodig is. Om de interactie tussen waterketen en natuurlijk watersysteem beter te onderzoeken, rekenen we de toepassing van SUPERLOCAL binnen een fictieve regio ook door in het model Vensim. Dit is een zogenaamd systeemdynamisch model dat geschikt is om niet-lineair gedrag van complexe systemen te onderzoeken door middel van onder andere *feedback loops*. Het biedt de mogelijkheid om de doorwerking van veranderingen in het stedelijke watersysteem in het natuurlijke watersysteem te kwantificeren. De beschrijving van het model en de resultaten van de scenarioberekeningen zijn opgenomen in hoofdstuk 4.

Bovenstaande methoden wijken af van meer traditionele methoden om watersystemen door te rekenen, bijvoorbeeld met gedistribueerde modellen van deelsystemen. Gedistribueerde modellen maken gebruik van partiële differentiaalvergelijkingen om verschillen in ruimte en tijd binnen deelsystemen te overbruggen. Een nadeel hiervan is de relatief lange rekentijd. Systeemdynamische modellen werken op een hoger abstractieniveau, met minder (ruimtelijke) details, waardoor het mogelijk is om verschillende deelsystemen te koppelen en de onderlinge interactie te onderzoeken. Het grote voordeel hiervan is de korte rekentijd, wat de gebruiker in staat stelt om uitgebreide gevoeligheidsanalyses te doen om het gedrag binnen het systeem beter te begrijpen. Dit is vooral interessant wanneer er niet-lineaire processen in het spel zijn, die voor de menselijke intuïtie lastiger te voorspellen zijn. Systeemdynamische modellen kunnen daarom worden gebruikt om systemen op strategisch niveau beter te begrijpen. Ze worden nog relatief weinig gebruikt in de hydrologie, maar zijn veelbelovend voor

strategische verkenningen binnen het waterbeheer, zoals bijvoorbeeld het afwegen van maatregelen voor waterbesparing (Stofberg et al., 2024 *(in voorbereiding)*). Zodoende hebben we in deze studie gekozen voor de toepassing van een systeemdynamisch model, naast het gebruik van Sankey-diagrammen.

## 2 SUPERLOCAL

### 2.1 Projectbeschrijving

De pilot SUPERLOCAL<sup>1</sup>, een project binnen het EU Life Climate Action Programma, is een herontwikkelingsproject in Bleijerheide, in de wijk Kerkrade-Oost. Op de projectlocatie stonden oorspronkelijk vier hoogbouwflats uit de jaren zestig. Een combinatie van noodzakelijke renovatie en bevolkingskrimp leidde ertoe dat een van de flats in 2012 werd gesloopt. Kort daarna, in 2015, werd besloten om het gebied inclusief de overgebleven flatgebouwen opnieuw in te richten volgens een circulaire gebiedsontwikkeling. Hierbij zijn twee flats op een circulaire manier gesloopt, gericht op hergebruik, en is een vierde flat gerenoveerd. In het gebied zijn vervolgens 130 woningen gebouwd en is het openbaar gebied heringericht. De circulaire visie is behalve op de (nieuw)bouw ook toegepast op de waterketen. Het doel was om de waterketen te veranderen van een lineair systeem, waarbij water van buiten het gebied wordt aangevoerd en weer naar buiten wordt afgevoerd, in een meer circulair systeem op wijkniveau, op basis van besparing en hergebruik. In de pilot SUPERLOCAL werken verschillende partijen samen, waaronder de gemeente Kerkrade, drinkwaterbedrijf WML, woningbouwcorporatie HEEMwonen en Waterschapsbedrijf Limburg (WBL; verantwoordelijk voor de afvalwaterbehandeling). Daarnaast draait ook de Vlaamse Watergroep als vijfde partner mee in het project, onder meer met een soortgelijk maar kleinschaliger project in West-Vlaanderen.

In de zomer van 2020 zijn de nieuwe woningen opgeleverd en aangesloten op de gesloten waterkringloop. Voor de realisatie van een meer circulair stedelijk watersysteem op wijkniveau is gebruik gemaakt van verschillende technieken en oplossingen om drinkwater te besparen en water langer in het gebied vast te houden. Het oorspronkelijke ontwerp voorzorg in de volgende voorzieningen:

- De woningen zijn voorzien van waterbesparende kranen en sanitair;
- Hemelwater van verhard oppervlak (daken en bestrating) wordt opgevangen, gezuiverd en gedeeltelijk hergebruikt als vervanging van een deel van de watervraag in woningen;
- Overtollig hemelwater dat niet kan worden hergebruikt, wordt zoveel mogelijk lokaal geïnfiltreerd via een 'waterplein';
- Lichtgrijs afvalwater uit o.a. de douche wordt apart ingezameld, op natuurlijke wijze gezuiverd (helofytenfilter) en waar mogelijk ingezet voor laagwaardige toepassingen in de wijk (gemeenschappelijke wasserette en een wasstraat);
- De woningen zijn voorzien van vacuümtoiletten en voedselvermalers, in combinatie met een vergister, met als doel een sterk verminderde stroom 'zwart' afvalwater en de mogelijkheid om grondstoffen terug te winnen.

Het overkoepelende doel van bovenstaande maatregelen is het terugdringen van de benodigde hoeveelheid drinkwater die van buiten moeten worden aangevoerd, het langer vasthouden van hemelwater in het gebied om het effect van droge periodes te verzachten, en het terugdringen van de stroom afvalwater die naar buiten wordt afgevoerd.

### 2.2 Aanpassingen in het ontwerp en berekende waterbesparing

Het oorspronkelijke ontwerp van SUPERLOCAL is doorgerekend en beschreven in Bouziotas & Van Duuren (2019) en gepubliceerd in Bouziotas et al. (2019). De uitgangspunten van het ontwerp en het stedelijke watersysteem zijn

---

<sup>1</sup> <https://www.superlocal.eu/>

te vinden in de tabellen 3, 4 en 5 en in Appendix I van eerstgenoemde bron. Bij de realisatie van het project zijn een aantal veranderingen opgetreden:

- De opvang van hemelwater vanaf de daken en overige verharding geschiedt via een gezamenlijke buffer van 250 m<sup>3</sup>. Dit is een grotere buffer dan de geplande gemengde buffer van 50 m<sup>3</sup> (tabel 4 in Bouziotas & Van Duuren (2019)). Als gevolg hiervan treedt minder overstort op voorafgaand aan de zuivering van hemelwater;
- Vanwege tegenvallende infiltratiecapaciteit is afgezien van de aanleg van een 'waterplein' (inhoud 450 m<sup>3</sup>) voor de infiltratie van hemelwater. In plaats daarvan is een wadi aangelegd met een inhoud van circa 150 m<sup>3</sup> met overstortmogelijkheden richting het nabijgelegen oppervlaktewater (Anselderbeek). In nieuwe berekeningen is de infiltratiecapaciteit ingeschat op 0,05 m/dag (was 0,10-0,15 m/dag).
- Gezuiverd grijs water wordt vooralsnog niet hergebruikt voor de gemeenschappelijke wasserette, maar afgevoerd naar het oppervlaktewater. De wasserette gebruikt drinkwater. Mogelijk wordt hergebruik van grijs water in de toekomst alsnog ingezet;
- De autowasstraat is komen te vervallen, aangezien in de nabije omgeving al een wasstraat aanwezig is.

Met bovenstaande wijzigingen is het ontwerp van SUPERLOCAL in de huidige studie opnieuw doorgekend met Excel voor de periode 1986-2016. Het circulaire systeem levert de volgende veranderingen op in de waterketen:

- Het **watergebruik in huishoudens** wordt met **41%** gereduceerd, uitgaande van een constant waterverbruik door het jaar heen;
- **Drinkwaterlevering naar de huishoudens** wordt gemiddeld met **78%** op jaarbasis gereduceerd als gevolg van het hergebruik van hemelwater. De besparing varieert enigszins door het jaar heen (71-81%), afhankelijk van de gevallen neerslag, met doorgaans de kleinste besparing in de periode maart tot en met mei;
- Het **afvalwater** (grijs en zwart), dat in de conventionele situatie naar de RWZI wordt afgevoerd, wordt lokaal gezuiverd en daarna op het lokale oppervlaktewater geloosd. De afvoer naar de RWZI komt geheel te vervallen;
- Door hergebruik en infiltratie van hemelwater komt de afvoer van hemelwater naar de RWZI geheel te vervallen. Gemiddeld is de reductie van de **afvoer van hemelwater** naar buiten het gebied **96%** op jaarbasis, met een variatie door het jaar heen van 88-99%. Het kleine beetje dat nog wel wordt afgevoerd (overstort uit de infiltratievoorziening), gaat direct naar het oppervlaktewater zonder tussenkomst van de RWZI;
- Er vindt op jaarbasis gemiddeld **35% extra infiltratie van hemelwater** plaats ten opzichte van de bestaande infiltratie via onverhard oppervlak in de wijk. Het gaat hier om hemelwater dat op verharde oppervlakken is gevallen en dat in conventionele situaties naar het riool wordt afgevoerd. De variatie door het jaar heen bedraagt 26-42%, met de laagste hoeveelheid extra infiltratie in april.

## 3 Doorwerking SUPERLOCAL op het stedelijke watersysteem – Sankey-benadering

### 3.1 Inleiding

De berekende hoeveelheden besparing en hergebruik van het systeem SUPERLOCAL, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk, gelden specifiek voor de huishoudelijke waterstromen. Een wijk als SUPERLOCAL staat echter niet op zichzelf, maar is onderdeel van een groter stedelijk gebied. Daarin bevinden zich bijvoorbeeld ook zakelijke drinkwatergebruikers, die in SUPERLOCAL niet zijn meegenomen. Om vast te stellen wat het effect is van grootschalige toepassing van een circulair concept zoals SUPERLOCAL op het bredere stedelijke watersysteem, hebben we de berekende veranderingen in waterketen en watersysteem vertaald naar een (fictief) groter gebied. Dit kan bijvoorbeeld de schaal van een RWZI-aanvoergebied of een volledige wijk of stad zijn. Op deze schaal kunnen ook andere stedelijke waterstromen worden meegenomen, zoals kleinzakelijk drinkwatergebruik en afvalwaterproductie. Daarnaast kan zo worden bepaald wat het effect op waterketen en watersysteem is wanneer een circulair concept als SUPERLOCAL op grotere schaal zou worden geïmplementeerd. In dit hoofdstuk wordt aan de hand van Sankey-stroomdiagrammen gevisualiseerd en bediscussieerd hoe een grootschalige implementatie van een stedelijk waterconcept doorwerkt op waterketen en watersysteem. We hebben hierbij gekozen voor een weergave op zowel de schaal van een hele wijk of stad, als op de schaal van Hoog Nederland. Sankey-diagrammen geven snel inzicht in de veranderingen in afzonderlijke waterstromen tussen scenario's. Belangrijke aantekening hierbij is dat de veranderingen in waterstromen niet in samenhang zijn gemodelleerd en dat het natuurlijke watersysteem grotendeels buiten beschouwing blijft (bijvoorbeeld interactie grondwater-oppervlaktewater). Een meer geavanceerde modeloefening met Vensim wordt beschreven in het volgende hoofdstuk.

### 3.2 Aannames voor waterstromen in stedelijk gebied

Voor het bepalen van de doorwerking van SUPERLOCAL op het stedelijk watersysteem op grotere schaal, hebben we enkele onderbouwde aannames gedaan over verschillende onderdelen van de stedelijke waterketen, zoals drinkwaterproductie en -levering en de samenstelling van RWZI-effluent. Het gaat hier specifiek om aannames ten aanzien van de waterkwantiteit (volumestromen).

#### Drinkwaterlevering:

- Op de schaal van heel Nederland is de zakelijke drinkwatervraag (kleinzakelijk en grootzakelijk/industrie gecombineerd) ongeveer 35% van de grootte van de huishoudelijke drinkwatervraag (303M om 855M m<sup>3</sup>/jaar; Geudens & Kramer, 2022). Het onderscheid tussen groot- en kleinzakelijk is moeilijk te maken en in bepaalde mate arbitrair, dus in de huidige studie is dit onderscheid op wijk- en stadsniveau niet gemaakt;
- Bij de productie van drinkwater treden spui- en lekverliezen op, waardoor meer grondwater moet worden opgepompt dan kan worden omgezet naar drinkwater. De totale verliezen bedragen ongeveer 10% op jaarbasis (Pronk et al., 2020).

#### Huishoudelijk watergebruik:

- Aansluitend bij eerdere berekeningen met het SUPERLOCAL-systeem (Bouziotas & Van Duuren, 2019), hebben we het huishoudelijke watergebruik door het jaar heen als constant verondersteld. In werkelijkheid zal enige variatie door het jaar optreden: zo kan de vraag in een droge periode hoger zijn doordat bewoners de tuin extra sproeien of zwembadjes in de tuin vullen.

### RWZI-effluent:

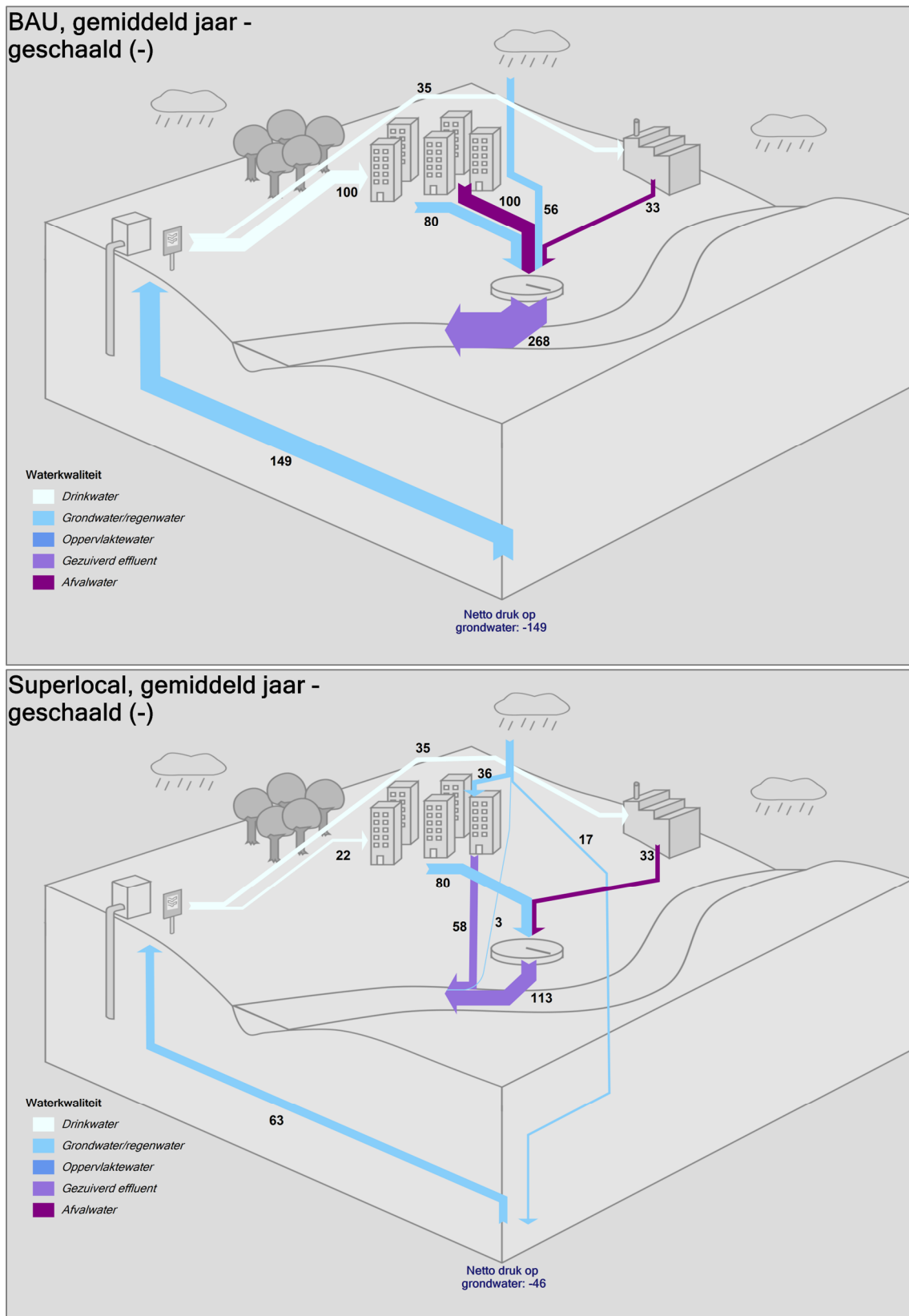
- In SUPERLOCAL wordt aangenomen dat vrijwel de gehele huishoudelijke drinkwatervraag wordt afgevoerd als Droogweerafvoer (DWA), minus enig gebruik (<1%) voor het sproeien van de tuin;
- Het volume van zakelijk DWA wordt geschat op 33% ten opzichte van het volume huishoudelijk DWA in de conventionele situatie. Deze schatting is ontleend aan de DWAAS-studie van STOWA (Van de Kerk, 2005);
- Naast DWA en hemelwater (HWA) bestaat de totale stroom afvalwater naar de RWZI (influent) in een conventionele situatie voor een belangrijk deel uit rioolvreemd water. De herkomst van rioolvreemd water verschilt per regio in Nederland en is doorgaans lastig vast te stellen. Belangrijke puntbronnen van rioolvreemd water zijn onder andere aangesloten straatkolken voor doorspoeling van vuilwaterriolen, bronneringen en de afvoer van drainage uit stedelijk gebied, maar bijvoorbeeld ook niet geregistreerde zakelijke lozingen. Daarnaast blijkt de hoeveelheid rioolvreemd water vaak gerelateerd aan variatie in rivierwaterstanden en grondwaterstanden. In heel Nederland wordt de hoeveelheid rioolvreemd water ingeschat op ongeveer 60% ten opzichte van de grootte van de totale (theoretische) DWA-stroom (Van de Kerk, 2005). In deze studie is dit percentage ten opzichte van de DWA-stroom in de conventionele situatie berekend.

## 3.3 Sankey-diagrammen

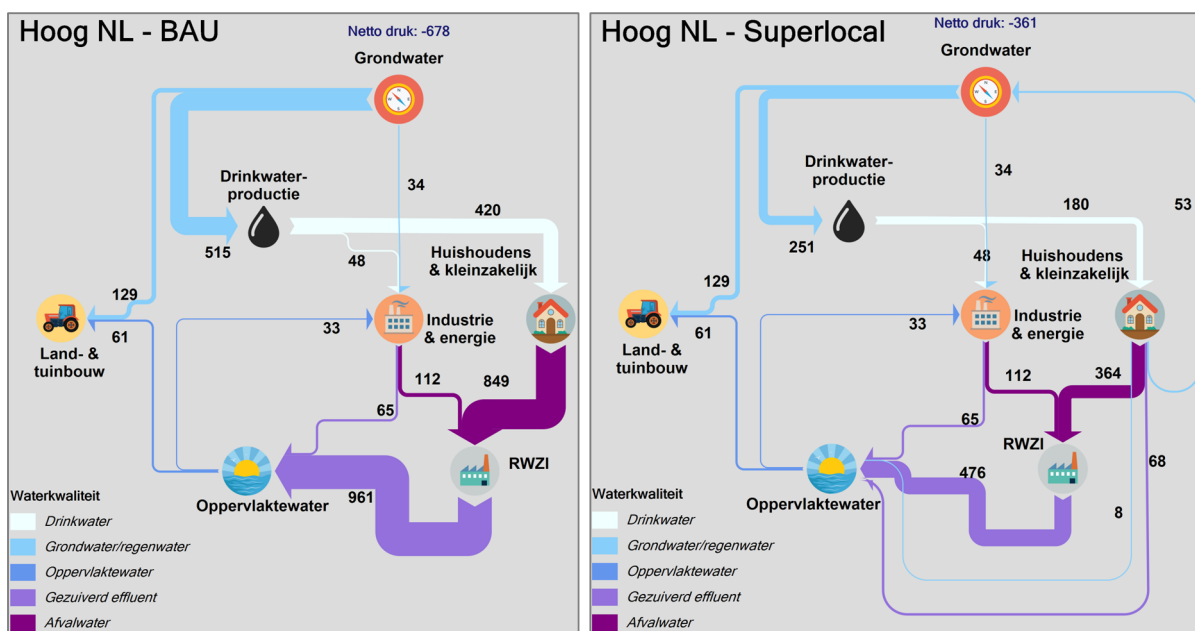
De veranderingen in waterstromen in het stedelijke gebied zijn gevisualiseerd met behulp van Sankey-stroomdiagrammen. In deze stroomschema's is de dikte van een pijlen evenredig met de grootte van de waterstromen. Op deze manier geven Sankey-diagrammen snel inzicht in relatieve veranderingen van waterstromen als gevolg van maatregelen, maar ook in de relatieve grootte van bepaalde stromen ten opzichte van andere stromen in het systeem. De Sankey-diagrammen voor SUPERLOCAL zijn opgesteld voor een gemiddeld jaar (gemiddelde over de periode 1986-2016), waarbij de huidige situatie (*business as usual* oftewel BAU) is vergeleken met de toepassing van SUPERLOCAL. De vergelijking is toegepast op twee verschillende schalen:

- Fictieve wijk/stad/RWZI-aanvoergebied. De stromen in deze Sankey's zijn geschaald, waarbij de **drinkwaterlevering aan huishoudens** in de huidige situatie (BAU) gelijk is gesteld aan **100**. Dit geeft een beeld van de theoretische besparingen die optreden als een concept als SUPERLOCAL zou worden toegepast op een hele wijk of stad;
- Hoog-Nederland. Hierbij is gebruik gemaakt van de Sankey-diagrammen uit Pronk et al. (2020), waarbij de toepassing van het concept SUPERLOCAL is voorgesteld als een extra scenario voor besparing van grondwater. Dit schaalniveau geeft een indruk van de theoretische besparingen en afname van de druk op het grondwater op schaal van de hoge zandgronden in Nederland en Vlaanderen indien het concept maximaal zou worden toegepast, op het gehele stedelijke gebied. Dit geeft een idee van de bovengrens van het effect dat kan worden bereikt. De resultaten uit de SUPERLOCAL-berekeningen zijn hier toegepast op de verzamelde informatie uit Pronk et al. (2020), waarbij de watervolumes niet zijn geschaald.

De beschrijving van de veranderingen en effecten binnen de waterketen en het natuurlijke watersysteem worden nader beschreven en geanalyseerd in de volgende paragrafen.



Figuur 1: Sankey-diagrammen van de waterstromen op stad-/wijkniveau in de huidige situatie (boven) en bij toepassing van SUPERLOCAL (onder). De getallen bij de pijlen zijn relatieve volumes, in verhouding tot de drinkwaterlevering aan huishoudens in de huidige situatie (waarde 100).



Figuur 2: Sankey-diagrammen van de waterstromen op de schaal van Hoog-Nederland in de huidige situatie (links) en bij grootschalige (fictieve) toepassing van SUPERLOCAL in het volledige stedelijke gebied (rechts). De getallen bij de stromen zijn watervolumes in miljoen m3.

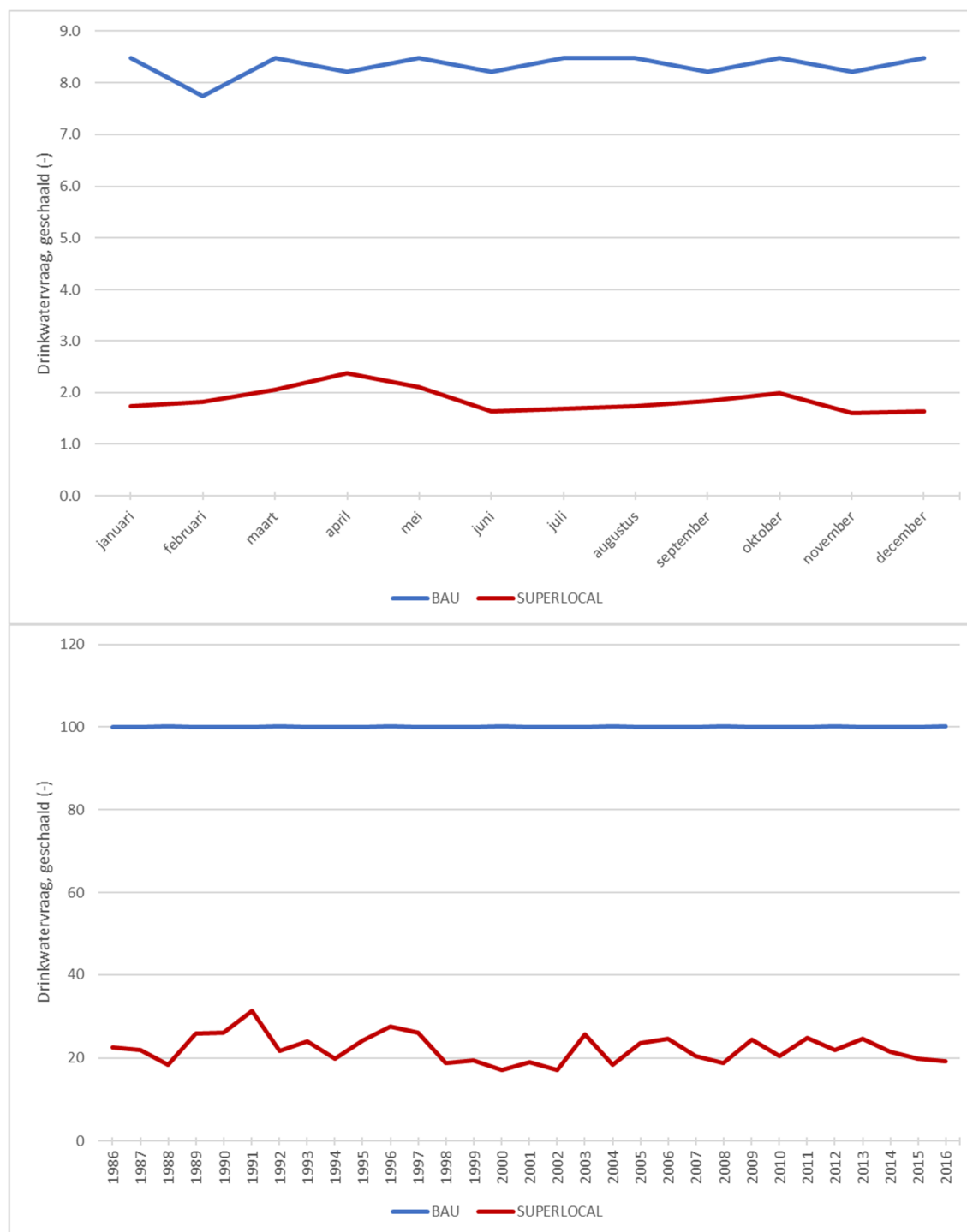
### 3.4 Effecten binnen waterketen

Twee onderdelen van de waterketen ondervinden effecten van implementatie van een circulair concept zoals SUPERLOCAL: de productie en levering van drinkwater, en de afvoer van afvalwater richting de RWZI. De effecten op beide onderdelen wat betreft waterkwantiteit worden hieronder besproken en gevisualiseerd. Alle getallen en grafieken zijn gebaseerd op de waterbalansberekeningen in Excel die in de huidige studie zijn uitgevoerd. De getoonde grafieken zijn in feite een verfijning in de tijd ten opzichte van de eerder getoonde Sankey-diagrammen.

#### 3.4.1 Drinkwaterproductie en -levering

De toegepaste technieken voor waterbesparing en hergebruik in het concept SUPERLOCAL resulteren in een reductie van 78% van de benodigde levering van drinkwater aan huishoudens (Figuur 1). Aangezien zakelijk drinkwatergebruik geen onderdeel is van het concept, verandert de drinkwaterlevering aan kleinzakelijke en industriële afnemers niet. Hierdoor valt de reductie van de volledige drinkwaterproductie en -levering kleiner uit, te weten iets meer dan 50% (Figuur 2). In de achtergrondstudie en modelberekeningen van SUPERLOCAL wordt de huishoudelijke watervraag door het jaar heen constant verondersteld (Bouziotas & Van Duuren, 2019). Met deze aanname is de benodigde drinkwaterlevering door het jaar heen ook vrij constant (Figuur 3), evenals in de conventionele situatie (BAU). De levering in het voorjaar, met name in april, is relatief iets hoger dan in het referentiescenario. De maand april is in Nederland de droogste maand, waardoor dan minder hemelwater beschikbaar is voor hergebruik en relatief meer drinkwater nodig zal zijn. De inzet van hemelwater zorgt er zodoende voor dat de benodigde drinkwaterlevering variabel wordt, afhankelijk van het voorkomen van droge en natte jaren (Figuur 3).





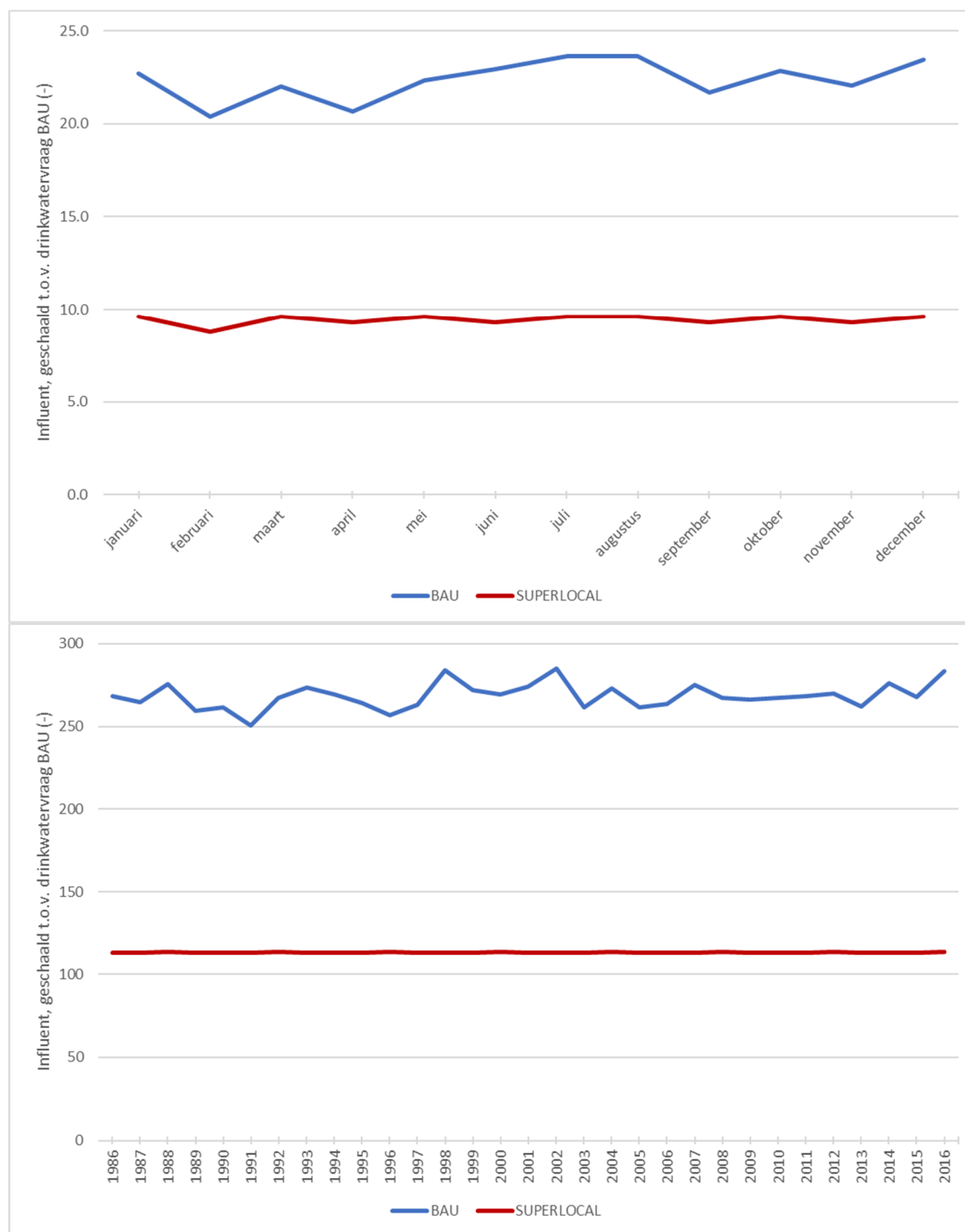
Figuur 3: Drinkwatervraag van huishoudens in de referentiesituatie (BAU) en bij grootschalige implementatie van SUPERLOCAL. Boven: verloop van de maandelijkse vraag door het jaar heen. Onder: variatie in jaarlijkse vraag voor de berekende periode 1986-2016. De getallen op de y-as zijn geen werkelijke volumes, maar zijn geschaald op basis van de jaarlijkse drinkwatervraag in de referentiesituatie (= 100).

### 3.4.2 Afvoer naar RWZI

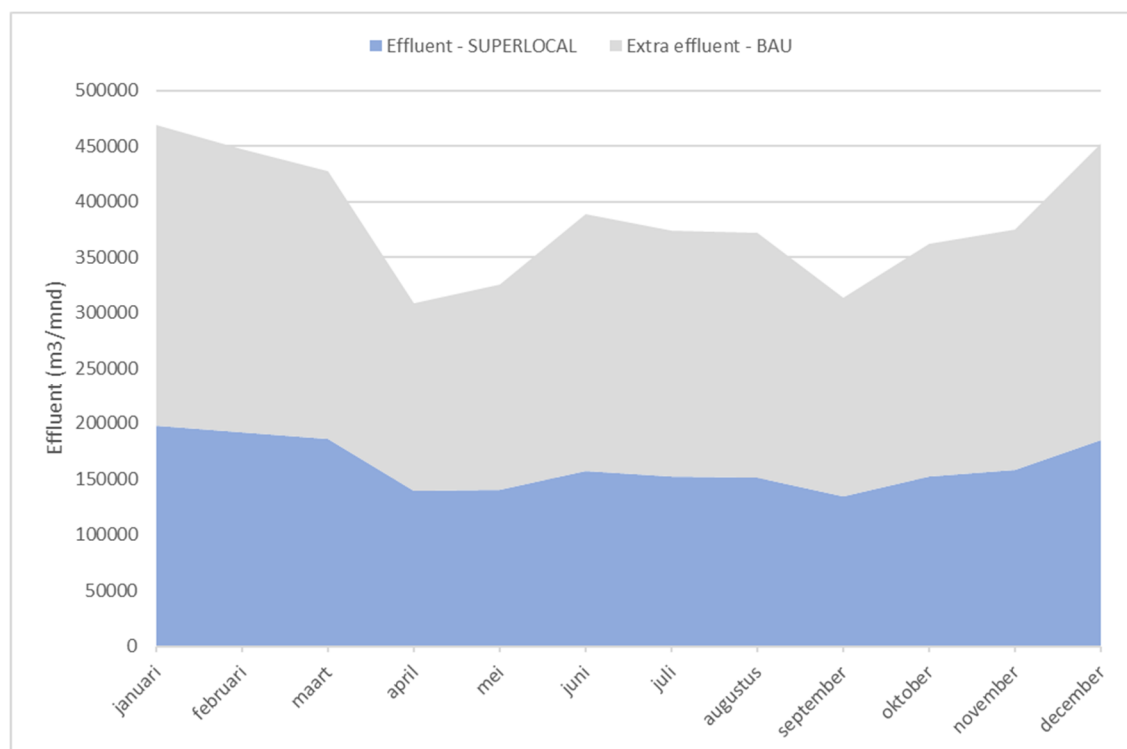
Het concept SUPERLOCAL voorziet in verschillende waterbesparende technieken om de huishoudelijke watervraag terug te dringen. Dit betekent ook dat huishoudens minder afvalwater produceren. De gemiddelde besparing van huishoudelijk afvalwater op jaarbasis is in de huidige studie berekend op 42%. Aangezien het afvalwater na lokale zuivering direct naar het oppervlaktewater wordt afgevoerd en niet naar de RWZI, valt de huishoudelijke afvalwaterstroom naar de RWZI binnen SUPERLOCAL geheel weg. RWZI-influent omvat naast de huishoudelijke component van de droogweerafvoer (DWA) nog meer stromen, zoals DWA van zakelijke gebruikers, rioolvreemd water en de afvoer van hemelwater (HWA). Door verregaand hergebruik en infiltratie van hemelwater dat valt op verhard oppervlak, valt binnen SUPERLOCAL ook de HWA-component geheel weg. De hoeveelheid rioolvreemd water en zakelijk DWA blijven echter gelijk. Wanneer al deze stromen worden gecombineerd, bedraagt de netto reductie van influent naar de RWZI op jaarbasis gemiddeld 58%.

De afvoer van hemelwater is veruit het meest variabele deel van de influentstroom bij een RWZI in de traditionele situatie. Dit betekent ook dat de hoeveelheid influent in die situatie afhankelijk is van natte en droge maanden en jaren (Figuur 4, blauwe grafieken). Doordat in SUPERLOCAL geen hemelwater meer wordt afgevoerd via het riool, zal de instroom van influent bij een RWZI veel constanter zijn door het jaar heen en tussen jaren onderling (Figuur 4, rode grafieken).

De omgeving van de projectlocatie van SUPERLOCAL voert het afvalwater af naar RWZI Kaffeberg, die het effluent loost op de Anselderbeek. De berekende afname van het volume aan influent binnen SUPERLOCAL is toegepast op gegevens van effluentlozingen bij deze RWZI. Figuur 5 geeft het verloop van de effluentlozingen door het jaar heen ( $\text{m}^3/\text{maand}$ ), gebaseerd op de jaren 2015 t/m 2021. In de referentiesituatie (grijze en blauwe vlak gecombineerd) loost Kaffeberg gemiddeld 4,6 miljoen  $\text{m}^3$  per jaar op de Anselderbeek, met het grootste volume in januari (468.000  $\text{m}^3$ ) en het kleinste volume in april (309.000  $\text{m}^3$ ). Indien het concept SUPERLOCAL in het gehele aanvoergebied van RWZI Kaffeberg zou worden toegepast, neemt de jaarlijkse hoeveelheid effluent af tot 1,9 miljoen  $\text{m}^3$ . De absolute afname is het grootst in de wintermaanden en het kleinst in de droge maanden in het voorjaar. Als gevolg hiervan zal de effluentstroom door het jaar heen lager en constanter worden (blauwe vlak).



Figuur 4: Totale hoeveelheid influent (DWA + HWA + rioolvreemd) in de referentiesituatie (BAU) en bij grootschalige implementatie van SUPERLOCAL. Boven: verloop door het jaar heen. Onder: variatie in jaarlijkse vraag voor de berekende periode 1986-2016. De getallen op de y-as zijn geen werkelijke volumes, maar zijn geschaald op basis van de jaarlijkse drinkwatervraag in de referentiesituatie (= 100).



Figuur 5: Gemiddelde hoeveelheid geloosd effluent per maand door RWZI Kaffeberg (2015-2021). Beide vlakken samen vormen het effluentvolume in de referentiesituatie; het blauwe vlak is de hoeveelheid effluent bij grootschalige implementatie van SUPERLOCAL.

### 3.5 Effecten op watersysteem

Grootschalige toepassing van SUPERLOCAL zal ook het natuurlijke watersysteem beïnvloeden via de koppelingen tussen waterketen en watersysteem. Hieronder worden drie routes beschreven:

- verminderde lozing van effluent op oppervlaktewater
- extra aanvulling van ondiep grondwater door infiltratie van hemelwater
- verminderde druk op het grondwater door minder grondwaterwinning voor drinkwaterproductie.

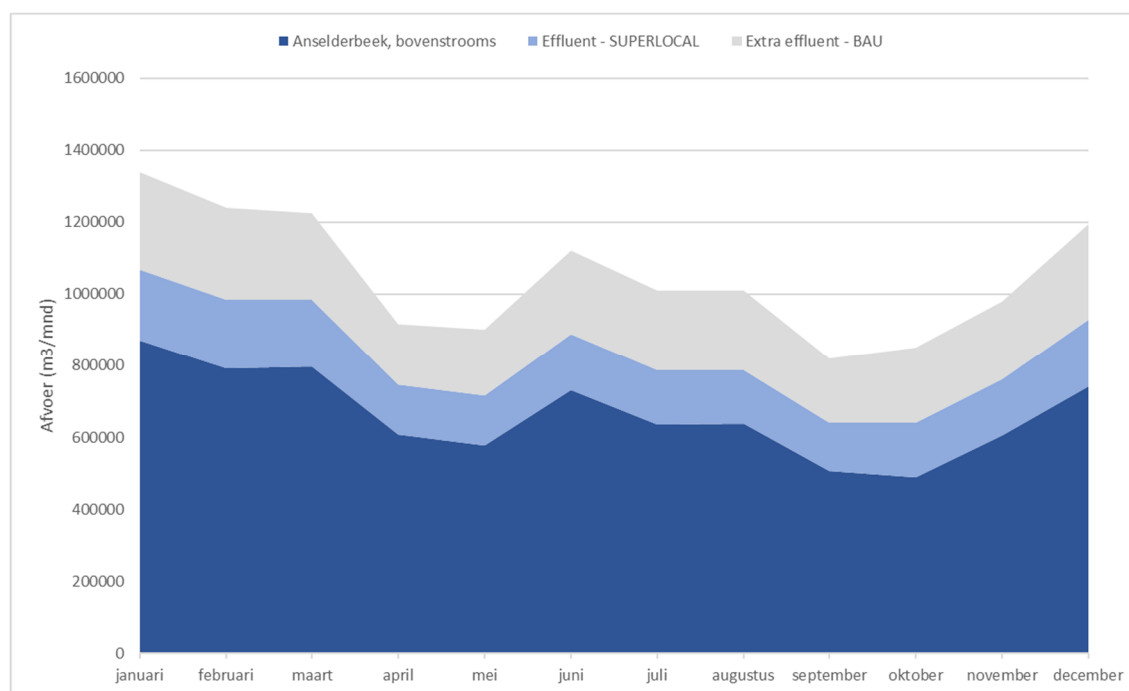
Interactie tussen grondwater en oppervlaktewater wordt in deze analyse nog buiten beschouwing gelaten.

#### 3.5.1 Effluentlozing op oppervlaktewater

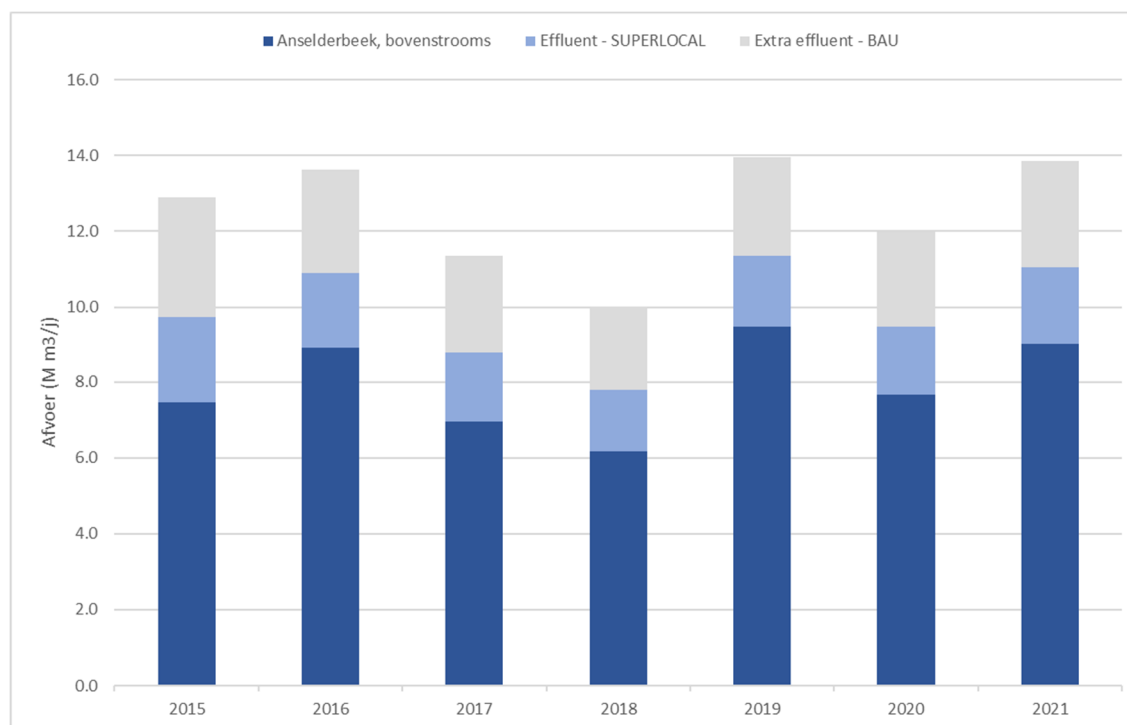
RWZI's in Nederland lozen hun effluent op oppervlaktewater. Met name in Hoog Nederland zijn dit vaak lokale of regionale waterlopen, die in natuurlijke omstandigheden in de zomer minder water afvoeren dan in de winter. Zodoende kunnen effluentlozingen in de zomer een aanzienlijke bijdrage leveren aan de watervoerendheid aan met name de kleinere waterlopen (Krajenbrink et al., 2021). In paragraaf 3.4 is beschreven dat bij grootschalige toepassing van SUPERLOCAL de hoeveelheid geloosd effluent kan afnemen met 58% op jaarbasis. Het effect van een dergelijke afname van geloosd effluent op het oppervlaktewatersysteem is sterk afhankelijk van de grootte van de ontvangende waterloop ten opzichte van de effluentlozing en zal derhalve sterk verschillen per locatie. Om hier gevoel bij te krijgen, is de berekende reductie in effluentlozing toegepast op twee RWZI-locaties in Nederland: RWZI Kaffeberg in Kerkrade en RWZI Asten.

Het terrein van SUPERLOCAL bevindt zich in het aanvoergebied van RWZI Kaffeberg. In de huidige situatie (2015-2021) loost deze RWZI gemiddeld 4,6M m<sup>3</sup>/jaar aan effluent op de Anselderbeek (zie ook paragraaf 3.4.2). Waterschap Limburg voert hoogfrequente debietmetingen uit in de Anselderbeek op meetpunt Eygelshoven, benedenstrooms van het lozingspunt van de RWZI. Op basis van meetgegevens uit de periode 2015-2021 is de gemiddelde jaarlijkse afvoer op het meetpunt bepaald op 12,5M m<sup>3</sup>. Het verloop van de afvoer door het jaar heen,

in m<sup>3</sup> per maand, is weergegeven in Figuur 6 (alle drie de vlakken opgeteld). De totale afvoer is opgesplitst in de afvoer bovenstrooms van het lozingspunt van de RWZI (donkerblauwe vlak) en de afvoer afkomstig vanuit de RWZI (lichtblauwe vlak en grijze vlak samen). Het bovenste grijze vlak geeft aan welk deel van de afvoer zal wegvallen bij implementatie van het SUPERLOCAL-concept in het gehele aanvoergebied. Het lichtblauwe vlak representeert de hoeveelheid effluent in geval van grootschalige implementatie van SUPERLOCAL. In de referentiesituatie bestaat gemiddeld 37% van de jaarlijkse afvoer op meetpunt Eygelshoven uit geloosd effluent. Dit aandeel varieert door het jaar heen (34-43%) en is het laagst in de maand april. Bij toepassing van SUPERLOCAL zal de jaarlijkse afvoer van de Anselderbeek op deze locatie met ongeveer 21% afnemen (19-25% per maand). Door de afwisseling van droge en natte jaren varieert het jaarlijkse percentage tussen de 19 en 24% (Figuur 7).



Figuur 6: Maandelijkse afvoer van de Anselderbeek op meetpunt Eygelshoven, benedenstrooms van het lozingspunt van RWZI Kaffeberg, gebaseerd op de meetperiode 2015-2021. Het totale vlak geeft de huidige afvoer aan (BAU). Het donkerblauwe en lichtblauwe deel gecombineerd vormt de geschatte afvoer na toepassing van SUPERLOCAL. Het grijze deel is de verminderde afvoer.



Figuur 7: Jaarlijkse afvoer van de Anselderbeek op meetpunt Eygelshoven, benedenstrooms van het lozingspunt van RWZI Kaffeberg. De totale staven geven de huidige jaarlijkse afvoer aan (BAU). Het donkerblauwe en lichtblauwe deel gecombineerd vormt de geschatte afvoer na toepassing van SUPERLOCAL. Het grijze deel is de verminderde afvoer.

RWZI Asten, gelegen in het beheergebied van Waterschap Aa en Maas, loost het gezuiverde afvalwater op de rivier de Aa. In de huidige situatie, bepaald op basis van gegevens uit de periode 2015-2019, wordt jaarlijks gemiddeld 5 miljoen m<sup>3</sup> effluent geloosd. Net bovenstrooms van het lozingspunt worden hoogfrequente metingen van de afvoer gedaan. Op basis van gegevens uit de periode 2015 t/m 2019 is de afvoer van de Aa net benedenstrooms van het lozingspunt bepaald op ongeveer 16M m<sup>3</sup>/jaar. In de referentiesituatie bestaat ongeveer een derde van de jaarlijkse afvoer net benedenstrooms van het lozingspunt uit effluent. Hierbij moet worden aangetekend dat de afvoer sterk varieert tussen de jaren, met in de laatste jaren een aanzienlijke lagere afvoer dan in eerdere jaren. Dit betekent dat ook het aandeel effluent van jaar tot jaar verschilt (22% in 2016, 43% in 2019). De afvoer van de Aa ter hoogte van RWZI Asten kent daarnaast een sterke seizoensfluctuatie, zie Figuur 8, waardoor ook het aandeel effluent per maand sterk verschilt: van 18% in de maanden januari en februari tot 67% in september. Indien het concept SUPERLOCAL zou worden toegepast in het gehele aanvoergebied, zou de afvoer van de Aa net benedenstrooms van het lozingspunt van de RWZI met circa 19% op jaarbasis afnemen. Door het sterke seizoenspatroon in de afvoer van de Aa verschilt het aandeel sterk tussen de maanden onderling: in wintermaanden is de afname van de afvoer 10-16%, maar in de maanden augustus en september is de afname bijna 40%. In zeer droge zomers zal de afname waarschijnlijk nog groter zijn.

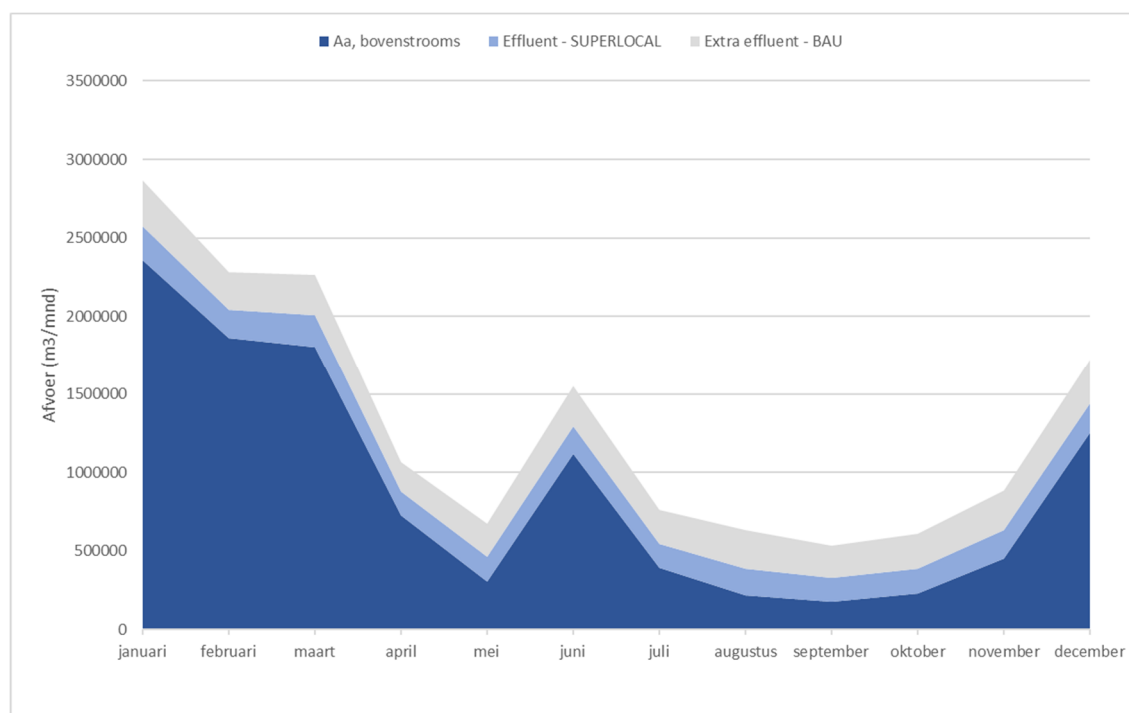
### 3.5.2 Infiltratie van hemelwater en afname van grondwateronttrekking voor drinkwater

De grootschalige implementatie van het SUPERLOCAL-concept heeft op twee manieren invloed op het grondwater in Hoog-Nederland. Ten eerste wordt overtollig hemelwater zoveel mogelijk lokaal geïnfiltreerd; ten tweede hoeft door huishoudelijke waterbesparing en -hergebruik minder grondwater te worden onttrokken voor de productie van drinkwater. In stedelijk gebied treedt ook in conventionele situaties infiltratie van regenwater op, in onverhard gebied (groenstroken en tuinen) en gedeeltelijk ook via verharding (tussen tegels, etc.). De hoeveelheid infiltratie hangt sterk samen met de totale hoeveelheid neerslag die in een jaar valt. Daarnaast treedt variatie op door het jaar heen. Een belangrijk deel van de geïnfiltreerde neerslag zal door planten en bomen worden benut voor verdamping. Deze natuurlijke stroom is niet weergegeven in de Sankey-diagrammen in paragraaf 3.3 (zie ook paragraaf 3.1). In SUPERLOCAL wordt ook ingezet op infiltratie van hemelwater dat valt op verharde oppervlakken

zoals daken en bestrating. Het gaat dan om het deel dat niet direct kan worden hergebruikt voor huishoudelijk gebruik. Met de gekozen uitgangspunten en randvoorwaarden is berekend dat grootschalige implementatie van SUPERLOCAL op jaarbasis leidt tot gemiddeld 35% extra infiltratie in stedelijk gebied ten opzichte van de reeds optredende infiltratie in de referentiesituatie. Dit percentage varieert tussen de jaren (27-40% extra infiltratie per jaar in de periode 1986-2016) en gedurende het jaar tussen maanden onderling (26% in de maand april, 42% in januari).

Bij grootschalige besparing op drinkwater in huishoudens hoeft minder drinkwater te worden geproduceerd. In Hoog Nederland betekent dit een verminderde druk op het grondwater. Bij grootschalige, regionale toepassing van SUPERLOCAL, is in theorie een reductie van de drinkwaterproductie en -levering van ruim 50% op jaarbasis mogelijk (paragraaf 3.4.1). De reductie van de grondwaterwinning voor drinkwater zou dan navenant verminderd kunnen worden: uit Figuur 1 volgt een afname van grondwateronttrekking voor stedelijk drinkwater van ongeveer 58%. Indien ook zakelijk drinkwater wordt meegenomen, is de afname ongeveer 52% (Figuur 2).

Zowel infiltratie van hemelwater als besparing op grondwateronttrekking voor drinkwaterproductie hebben een effect op het grondwater: ze 'verlichten' allebei de antropogene druk op de grondwatervoorraad. Uit de Sankey-diagrammen volgt dat de netto antropogene druk op het grondwater in stedelijk gebied kan afnemen met 69% (Figuur 1). Indien op nog grotere schaal wordt gekeken en ook onttrekkingen voor landbouw en industrie worden beschouwd, die niet worden beïnvloed door SUPERLOCAL-maatregelen, is de afname ongeveer 47% (Figuur 2).



*Figuur 8: Maandelijkse afvoer van de rivier de Aa, benedenstrooms van het lozingspunt van RWZI Asten, gebaseerd op de periode 2015-2019. Het totale vlak geeft de huidige afvoer aan (BAU). Het donkerblauwe en lichtblauwe deel gecombineerd vormt de geschatte afvoer na toepassing van SUPERLOCAL. Het grijze deel is de verminderde afvoer.*

## 4 Doorwerking SUPERLOCAL op het regionale watersysteem – Vensim-benadering

### 4.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is met behulp van Sankey-diagrammen de impact van grootschalige toepassing van het concept SUPERLOCAL op het watersysteem vastgesteld. Hoewel hiermee snel inzicht wordt verkregen in de globale verandering van waterstromen, heeft de methode een aantal nadelen. Het natuurlijke watersysteem, met name de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater, blijft grotendeels buiten beschouwing, zodat onderbelicht blijft hoe de veranderingen in de waterketen doorwerken op het natuurlijke watersysteem. De invloed van gebiedskenmerken wordt evenmin meegenomen. Daarnaast is het een vrij statische manier om het watersysteem te beschouwen, op basis van de aannames dat verschillende onderdelen van het watersysteem afzonderlijk van elkaar kunnen worden beschouwd en dat effecten van veranderingen kunnen worden opgeteld (superpositie). In werkelijkheid hangen de onderdelen van het watersysteem samen en zullen ingrepen bijeffecten hebben die in de Sankey-diagrammen niet worden getoond. Een voorbeeld: extra infiltratie van hemelwater zal leiden tot hogere grondwaterstanden, maar dit leidt mogelijk tot meer afvoer van grondwater naar het oppervlaktewater, waardoor een deel van het effect teniet wordt gedaan. Dit betekent dat aanpassingen en veranderingen in het watersysteem in samenhang moeten worden geanalyseerd, bijvoorbeeld middels een systeemmodellering.

In dit hoofdstuk wordt de toepassing van het concept SUPERLOCAL in een fictief gebied doorgerekend met behulp van een systeemdynamisch model, met als doel de invloed van aanpassingen in het stedelijke watersysteem en de afhankelijkheden en interacties in het watersysteem beter in beeld te brengen.

### 4.2 Modelbeschrijving en aannames

De analyses zijn uitgevoerd met een model in Vensim, een instrumentarium voor het draaien van systeemdynamische modellen (*System dynamics models*). Een model in Vensim kent een structuur van *stocks* (voorraden) en *flows* (verplaatsing of stroming van hoeveelheden tussen verschillende *stocks*). Een belangrijk ingrediënt van het pakket is het gebruik van *causal loop diagrams* die de afhankelijkheid van onderdelen in het model beschrijven. Door deze structuur kunnen processen op een meer conceptuele manier worden verkend, zonder dat een uitgebreide schematisatie van het modelgebied nodig is. Een hydrologisch model in Vensim geeft zodoende niet zozeer een ruimtelijk beeld van het watersysteem (hoewel dit kan worden benaderd door gebruik te maken van zeer veel *stocks*) als wel een beeld van de onderlinge samenhang van systeemonderdelen.

Voor de huidige studie is een systeemmodel gemaakt van een fictieve regio met gebiedskenmerken van de hoge zandgronden, met daarin zowel stedelijk (hoofdzakelijk verhard) als landelijk gebied (hoofdzakelijk onverhard). De ondergrond met het grondwater is weergegeven als één reservoir (*stock*) met één grondwaterstand die in de tijd varieert. Zowel drinkwaterwinning als infiltratie en drainage vinden via dit reservoir plaats. Het oppervlaktewater is niet expliciet gemodelleerd, maar is voorgesteld als de rand van het model, waarover verschillende waterstromen uit het model verdwijnen (onder andere afvoer van drainage, effluent, oppervlakkige afstroming). Daarnaast heeft het oppervlaktewater enkel een drainerende functie, er vindt geen infiltratie plaats. Om het model en de resultaten schaalbaar te maken, zijn alle waterstromen en volumes eendimensionaal uitgedrukt, in mm en mm/dag, als gemiddelde getallen voor het gehele modelgebied. Voor de modellering van het SUPERLOCAL-concept is aangesloten bij de opzet van de UWOT-modellering zoals beschreven in Bouziotas & Van Duuren (2019) en zoals toegepast in de Excel-modellering in de huidige studie, met dezelfde relatieve grootte van buffers en overstorten. Het conventionele deel van het stedelijk watersysteem is uitgerust met een gemengd rioolstelsel, dat zowel

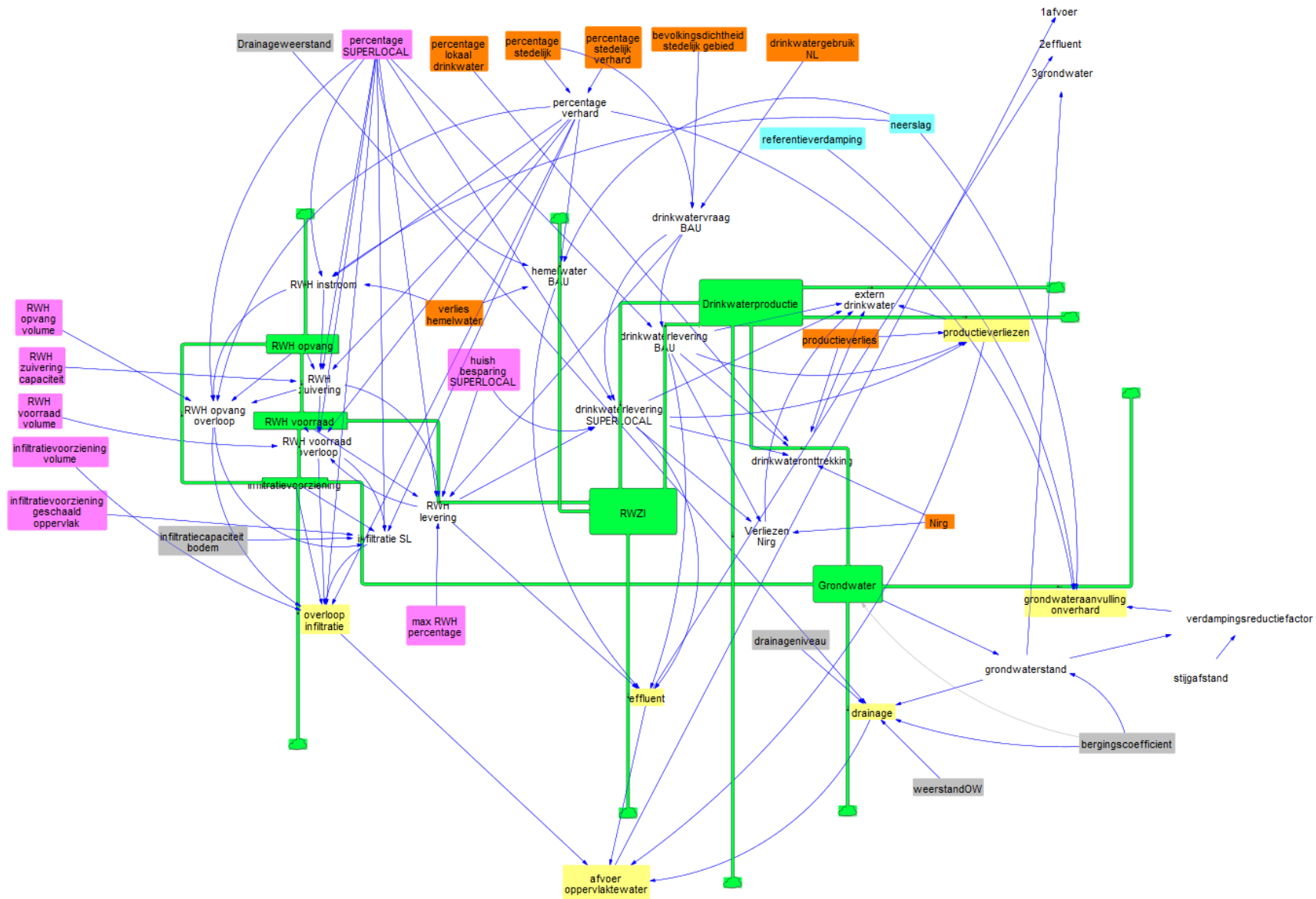


vuilwater als hemelwater afvoert naar de RWZI. Voor drinkwaterwinning is een optie toegevoegd om meer of minder te onttrekken en te produceren dan de totale drinkwatervraag binnen het modelgebied, wat betekent dat respectievelijk drinkwater kan worden geëxporteerd of moet worden geïmporteerd. Figuur 9 bevat een screenshot van het Vensim-model. Een overzicht van alle variabelen in het model, hun onderlinge samenhang en de eventuele beginwaarden of constante waarden is opgenomen in Bijlage I.

Het model is doorgerekend voor een periode van 31 jaar (1986-2016) met een tijdstap van 1 dag, gelijk aan het UWOT-model van SUPERLOCAL. Naast een basismodel zijn diverse scenario's doorgerekend, met variaties in een aantal variabelen, om het effect op het natuurlijke watersysteem (grondwater en oppervlaktewater) te bepalen. De belangrijkste daarvan is het **percentage SUPERLOCAL** dat is toegepast in het stedelijke deel van het model. In het basismodel is uitgegaan van 0% (alleen conventioneel stedelijk gebied), met daarnaast scenario's van 40% en 80% SUPERLOCAL, vanaf nu aangeduid als respectievelijk *SL40* en *SL80*. Behalve in dit percentage is bij de scenario's ook gevarieerd in twee andere variabelen, om de gevoeligheid van het model voor enkele randvoorwaarden te bepalen en hun invloed op de variatie in het percentage SUPERLOCAL vast te stellen. Ten eerste is gevarieerd het **percentage lokaal gewonnen drinkwater**. In het basismodel is dit ingesteld op 100% (al het benodigde drinkwater wordt binnen de grenzen van het model uit het grondwater onttrokken), met daarnaast scenario's met 0% (al het benodigde drinkwater wordt extern gewonnen en geproduceerd) en 200% (er wordt twee keer zoveel drinkwater geproduceerd als nodig; de rest wordt geëxporteerd). Ten tweede is gevarieerd in de **systeemweerstand**, dat wil zeggen de volledige weerstand tussen neerslag en afvoer (eenheid: dagen). We gebruiken dit als maat voor de vertraging van de afvoer van neerslag, waarin ook grootheden als de drainageweerstand zijn opgenomen. In het basismodel is een systeemweerstand van 1500 dagen aangehouden, met scenario's voor 1000 dagen en 2000 dagen. Alle mogelijke combinaties van de drie variabelen zijn doorgerekend, wat betekent dat in totaal  $3 \times 3 \times 3 = 27$  scenario's zijn doorgerekend, inclusief het basismodel.

Het effect van de toepassing van het SUPERLOCAL-concept op het natuurlijke watersysteem onder verschillende randvoorwaarden is gekwantificeerd aan de hand van zes verschillende aspecten van het natuurlijke watersysteem:

- Gemiddelde afvoer van RWZI-effluent over de gehele modelperiode;
- Gemiddelde totale afvoer van oppervlaktewater (effluent, drainage, overloop uit infiltratievoorziening en productieverliezen bij drinkwater) over de gehele modelperiode;
- Gemiddeld aantal dagen per jaar dat de totale afvoer van oppervlaktewater lager is dan de Q10-afvoer van oppervlaktewater van het basismodel, berekend over de gehele modelperiode. Een Q10-afvoer betekent dat de afvoer in 10% van de tijd even hoog of lager is. Deze Q10-afvoer is een proxy voor de *environmental flow* of *e-flow* van het oppervlaktewater, een minimale afvoer die nodig wordt geacht om het beekstelsysteem ecologisch gezond te houden;
- De gemiddelde grondwaterstand over de gehele modelperiode;
- Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) als indicatie voor de hoge grondwaterstand in een natte (winter-)periode. Hiervoor is het 93<sup>e</sup> percentiel (p93) van de grondwaterstand in het basismodel als proxy gebruikt (Averink, 2013);
- Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) als indicatie voor de lage grondwaterstand in een droge (zomer-)periode. Hiervoor is het 7<sup>e</sup> percentiel (p07) van de grondwaterstand in het basismodel als proxy gebruikt (Averink, 2013).



Figuur 9: Screenshot van het model in Vensim.

### 4.3 Resultaten

In deze paragraaf worden de berekende effecten van grootschalige toepassing van SUPERLOCAL op het watersysteem beschreven. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de effecten op het grondwater (paragraaf 4.3.2) en op de afvoer van oppervlaktewater (paragraaf 4.3.3). Zoals in de vorige paragraaf beschreven, zijn alle waterstromen en volumes eendimensionaal weergegeven, als gemiddelden voor het gehele modelgebied. Nadere interpretaties van de bevindingen en de implicaties voor de toepassing van concepten als SUPERLOCAL worden behandeld in hoofdstuk 5.

Tabel 1: Waterbalans van het basismodel, uitgedrukt in mm/jaar voor het gehele modelgebied, gemiddeld over de gehele doorgerekende periode (1986-2016). De cursieve getallen tussen vierkante haken geven de hoeveelheden (mm/jaar) aan voor het desbetreffende deelsysteem (stedelijk/verhard, of landelijk/onverhard). Boven: volledige model; onder: onderdeel grondwater.

Stroom	IN (mm/jaar)	UIT (mm/jaar)	$\Delta S$ (mm/jaar)
<i>Volledige model</i>			
Neerslag stedelijk gebied (zie Bijlage I)	64,6 [743]		
Verlies hemelwater stedelijk gebied (o.a. actuele verdamping, infiltratie – Bijlage I)		16,2 [186]	
Effluent		69,8	
Neerslag onverhard gebied	678,1 [743]		
Verdamping onverhard gebied		420,7 [461]	
Drainage		235,0 [257]	
Productieverlies & Niet in rekening gebracht gebruik (Nirg – Bijlage I)		1,9	
Verandering berging grondwater*			-0,9
<b>Totaal</b>	<b>742,7</b>	<b>743,6</b>	<b>-0,9</b>
<i>Grondwater</i>			
Neerslag onverhard gebied	678,1 [743]		
Verdamping onverhard gebied		420,7 [461]	
Drainage		235,0 [257]	
Onttrekking voor drinkwaterproductie		23,3	
Verandering berging grondwater*			-0,9
<b>Totaal</b>	<b>678,1</b>	<b>679,0</b>	<b>-0,9</b>

\* Bij afname van berging in grondwater (negatief getal) komt water beschikbaar in het model dat vervolgens via verdamping, drainage of drinkwateronttrekking het model weer kan verlaten.

### 4.3.1 Waterbalans basismodel

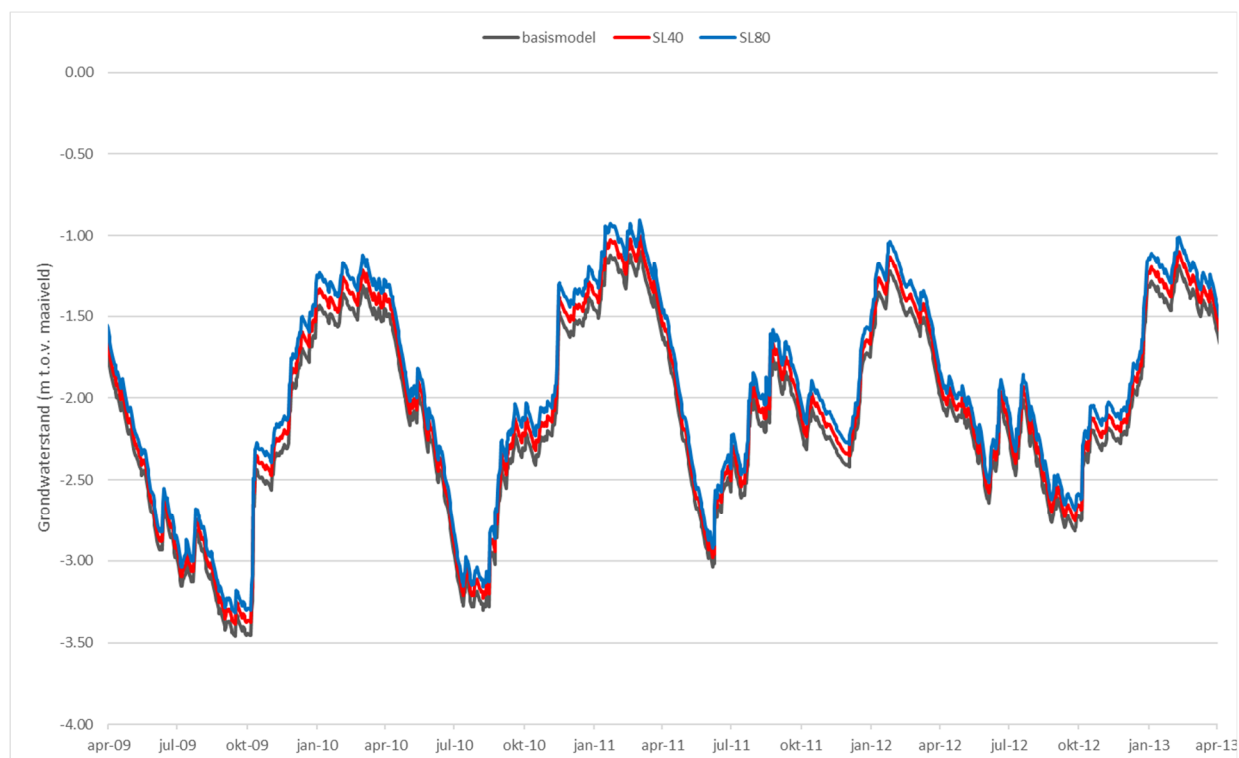
Tabel 1 bevat een eenvoudige waterbalans van het basismodel, zowel van het volledige model (bovenste onderdeel van de tabel) als van het grondwater-onderdeel (onderste deel van de tabel). De gepresenteerde getallen zijn uitgedrukt voor het gehele modelgebied. Voor enkele posten (neerslag, verdamping en drainage) is met cursieve getallen tussen vierkante haken de hoeveelheid omgerekend voor het desbetreffende deelgebied (verhard of onverhard). In de conventionele situatie bedraagt het totale neerslagoverschot in het modelgebied ongeveer 307 mm/jaar. Het grootste deel hiervan, ongeveer 77%, verlaat het gebied via drainage naar het oppervlaktewater. Drainage maakt ongeveer 91% uit van de totale grondwateraanvulling; ongeveer 9% wordt onttrokken voor drinkwater.

### 4.3.2 Effect op grondwater

In het basismodel is de langjarig gemiddelde grondwaterstand 2,05 m-mv. De grondwaterstand fluctueert in de periode april 2009 t/m maart 2013 tussen 1 en 3,5 m-mv (Figuur 10, donkergrijze curve). Toepassing van het concept SUPERLOCAL leidt tot een stijging van de grondwaterstand van 8 cm onder *SL40* tot 16 cm onder *SL80*. Uit Figuur 10 volgt dat de stijging het gehele jaar optreedt en in de zomer en winter vergelijkbaar is. De stijging van de grondwaterstand bij toepassing van SUPERLOCAL wordt deels veroorzaakt doordat minder grondwater hoeft te worden onttrokken voor drinkwaterproductie. In het basismodel gaat dit gemiddeld om 0,064 mm/d; onder *SL80* neemt dit af tot 0,03 mm/d, een afname van 0,034 mm/d. De infiltratie van hemelwater in het concept SUPERLOCAL heeft echter een groter effect op de grondwaterstand. Onder *SL40* wordt gemiddeld 0,045 mm/d hemelwater geïnfiltreerd en onder *SL80* gemiddeld 0,09 mm/d. Onder *SL80* is de toename van infiltratie bijna drie keer zo groot als de afname van onttrekking voor drinkwater.

In totaal hebben we 27 combinaties van systeemweerstand, percentage lokale drinkwaterwinning en percentage SUPERLOCAL doorgerekend. Het is interessant om te onderzoeken of het effect van implementatie van het SUPERLOCAL-concept op het watersysteem anders is bij verschillende modelrandvoorwaarden (behorende bij beperkt gewijzigde gebiedseigenschappen). In Figuur 11A (paneel linksboven) is de gemiddelde grondwaterstand in de 27 scenario's (weergegeven als stippen) in één grafiek weergegeven. Het groene driehoekje is het basismodel. De negen verschillende lijnen zijn combinaties van systeemweerstand en 'percentage lokaal drinkwater' (zie uitleg hierna), met langs de x-as variaties van het percentage SUPERLOCAL. De gebruikte kleuren zijn een aanduiding van de systeemweerstand: blauw = 1000 dagen; grijs = 1500 dagen (gelijk aan het basismodel); rood = 2000 dagen. Het lijntype van de grafiek is een aanduiding van het percentage lokaal gewonnen drinkwater: ononderbroken lijn = 0% (al het benodigde drinkwater wordt geïmporteerd); gestreepte lijn = 100% (het benodigde drinkwater wordt lokaal gewonnen; gelijk aan het basismodel); stippellijn = 200% (twee keer zoveel drinkwater geproduceerd als nodig; de helft ervan wordt geëxporteerd).

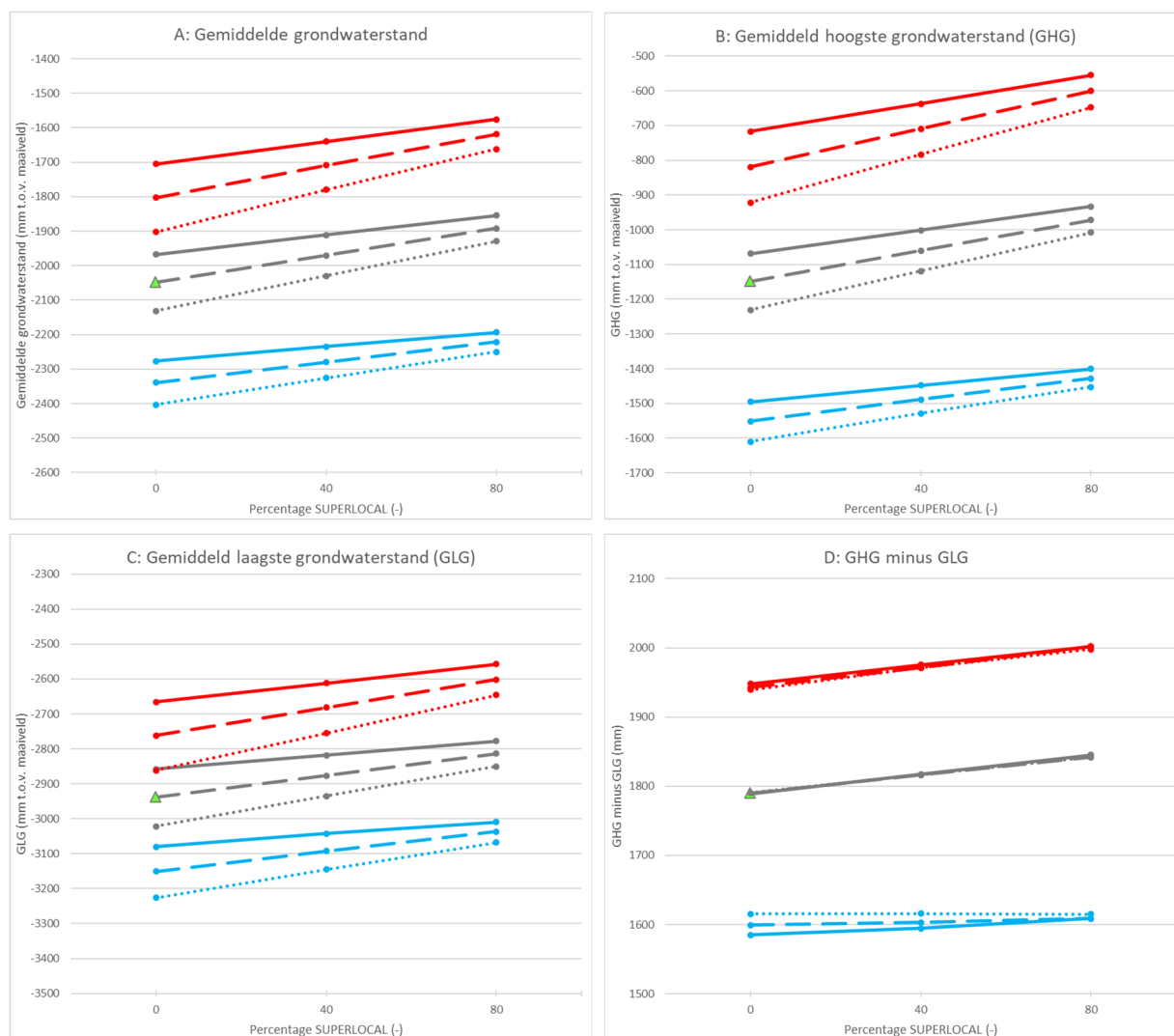
Uit Figuur 11A volgt dat voor alle combinaties van systeemweerstand en percentage lokaal drinkwater geldt dat een hoger percentage SUPERLOCAL leidt tot een hogere gemiddelde grondwaterstand. Bij toepassing in het basismodel (grijze gestreepte lijn) neemt de gemiddelde grondwaterstand toe van 2,05 m-mv tot 1,89 m-mv, een toename van 15,7 cm. Deze toename is niet hetzelfde in alle uitgangssituaties. In het algemeen is het effect van SUPERLOCAL op de grondwaterstand groter bij een hogere drinkwateronttrekking binnen het gebied (vergelijk de helling van de lijnen van gelijke kleur). Een verklaring hiervoor is dat een hogere drinkwateronttrekking binnen het gebied gepaard gaat met een lagere grondwaterstand, waarbij de hoeveelheid drainage en verdamping ook lager is. Extra infiltratie door SUPERLOCAL heeft dan sneller een effect op de grondwaterstand, doordat de verminderde hoeveelheid onttrokken water niet ook snel weer wordt afgevoerd. Het effect van toepassing van SUPERLOCAL bij een hogere grondwaterstand wordt deels gedempt door de dan optredende hogere drainage en verdamping. Tevens is het effect van SUPERLOCAL groter bij een hogere systeemweerstand (vergelijk de helling van de curves met hetzelfde lijntype). Dit kan worden verklaard doordat extra water, in dit geval geïnfiltreerd hemelwater uit stedelijk gebied, bij een hogere systeemweerstand minder snel kan worden afgevoerd. Dit vertaalt zich in een sterkere stijging van de grondwaterstand bij toepassing van SUPERLOCAL.



Figuur 10: Grondwaterstand in het Vensim-model van april 2009 t/m maart 2013, in het basismodel (donkergrijs) en bij toepassing van 40% (rood) en 80% SUPERLOCAL (blauw).

In het basismodel is de GHG 1,15 m-mv (groene driehoekje in Figuur 11B). In scenario *SL40* stijgt de GHG naar 1,06 m-mv (+9 cm) en in *SL80* naar 0,97 m-mv (+18 cm). Deze stijging is iets groter dan in geval van de gemiddelde grondwaterstand. De GLG in het basismodel is 2,94 m-mv (Figuur 11C) en neemt onder *SL40* toe tot 2,88 m-mv (+6 cm) en onder *SL80* tot 2,81 m-mv (+13 cm). Deze stijging is iets kleiner dan bij de gemiddelde grondwaterstand. Geconcludeerd wordt dat toepassing van SUPERLOCAL een groter effect heeft op de hoogste dan op de laagste grondwaterstanden. Dit kan worden verklaard doordat het effect van het opvangen en infiltreren van hemelwater groter is in de winter, wanneer meer hemelwater voorhanden is en de actuele verdamping laag is. Dit betekent dat de grondwaterfluctuatie toeneemt, wat ook volgt uit Figuur 11D (grijze curves).

De grootte van het effect van toepassing van SUPERLOCAL op de GHG en GLG verschilt per uitgangssituatie, waarbij hetzelfde patroon optreedt als bij de gemiddelde grondwaterstand: het effect is groter bij een hogere drinkwateronttrekking en bij een hogere systeemweerstand. Verder valt op dat veranderingen in de systeemweerstand het grootste effect hebben op de GHG en het laagste effect op de GLG. De hoeveelheid drinkwaterwinning is vrijwel niet van invloed op de grondwaterstandsfluctuatie. In Figuur 11D is te zien dat voor dezelfde systeemweerstand de scenario's voor het percentage lokale drinkwaterwinning elkaar vrijwel overlappen. Daarnaast blijkt dat de fluctuatie van de grondwaterstand (GHG-GLG) alleen toeneemt bij toepassing van SUPERLOCAL bij een hogere systeemweerstand (rode grafieken).



Figuur 11: Gemiddelde grondwaterstand (A, linksboven) en GxG (B-D) voor de doorgerekende scenario's. Legenda: De groene driehoek is het basismodel. De verschillende kleuren geven de systeemweerstand aan: blauw = 1000 d, grijs = 1500 d, rood = 2000 d. Het lijntype geeft het percentage lokaal drinkwater aan: ononderbroken lijn = 0%; gestreepte lijn = 100%; stippellijn = 200%. NB: de waarden op de y-assen van de grafieken A t/m C verschillen, maar het bereik van de assen is hetzelfde, zodat de grafieken op dezelfde schaal zijn getekend. De y-as in grafiek D wijkt af van A t/m C.

### 4.3.3 Effect op afvoer

#### Afvoer van effluent

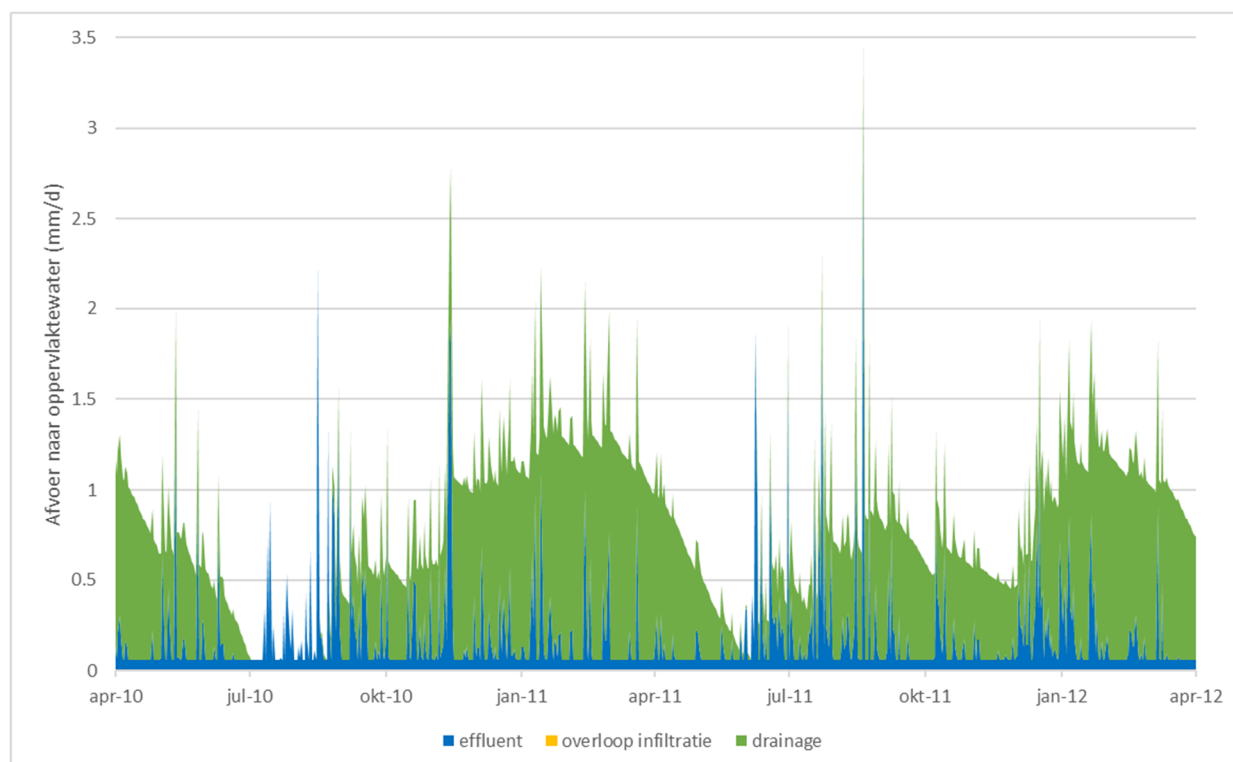
In het basismodel, zonder toepassing van het SUPERLOCAL-concept, bedraagt de stroom effluent gemiddeld 0,19 mm/dag. In scenario *SL40* neemt de hoeveelheid effluent af met een derde naar gemiddeld 0,13 mm/dag. In scenario *SL80* is de dagelijkse stroom effluent 0,07 mm/dag (afname van twee derde ten opzichte van het basismodel). Deze afname is niet verrassend, aangezien het concept SUPERLOCAL de hoeveelheid huishoudelijk afvalwater beperkt door waterbesparing binnenshuis en gedeeltelijk hergebruik van hemelwater. Daarnaast wordt het restant aan hemelwater niet naar de RWZI afgevoerd maar zoveel mogelijk geïnfiltreerd. De gevarieerde modelrandvoorwaarden systeemweerstand en percentage lokaal drinkwater hebben geen invloed op de afvoer van effluent.

#### Totale afvoer naar oppervlaktewater

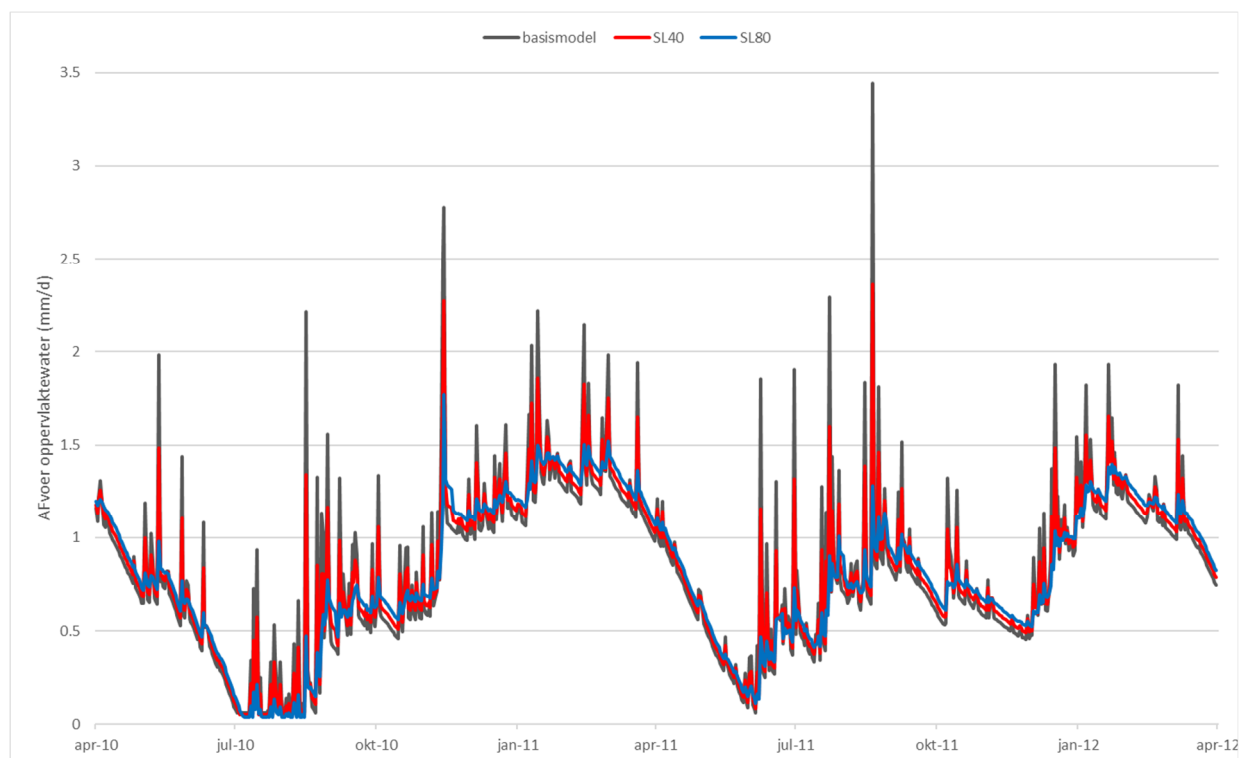
De grafiek van de dagelijkse afvoer van april 2010 t/m maart 2012 in het basismodel is opgenomen in Figuur 12. De verschillende componenten van de afvoer zijn daarbij uitgesplitst. De dagelijkse afvoer naar oppervlaktewater bedraagt gemiddeld 0,84 mm/dag en varieert globaal tussen 0 en 2 mm/d, met enkele uitschieters daarboven na

veel neerslag. In de zomermaanden van 2010 is de afvoer in perioden zonder neerslag bijna 0 mm/d, op de afvoer van effluent na. Op zulke dagen is het oppervlaktewater voor watervoerendheid vrijwel geheel afhankelijk van de aanvoer van effluent.

In Figuur 13 is de totale oppervlaktewaterafvoer weergegeven voor zowel het basismodel als voor *SL40* en *SL80*. In *SL40* neemt de gemiddelde afvoer af tot 0,83 mm/dag (-1%), in *SL80* neemt de afvoer af tot 0,81 mm/d (-3%). De afname in afvoer naar oppervlaktewater wordt deels opgeheven door een gemiddeld iets hogere actuele verdamping. Uit de grafieken volgt echter dat bij toepassing van SUPERLOCAL de afvoer het grootste deel van de tijd iets hoger is dan in het basismodel. De uitzonderingen zijn de pieken na flinke neerslagperioden, die in het basismodel aanzienlijk hoger zijn dan in *SL40* en vooral *SL80*. Toepassing van SUPERLOCAL zorgt voor een geringere fluctuaties in de oppervlaktewaterafvoer met minder extremen. Daarnaast blijkt bij toepassing van SUPERLOCAL de absolute afname van de totale afvoer naar oppervlaktewater geringer dan de afname van de effluentstroom. Zo leidt scenario *SL40* tot een afname van effluentafvoer met gemiddeld 0,06 mm/dag, maar de gemiddelde dagelijkse hoeveelheid drainage stijgt met ongeveer 0,05 mm/dag, zodat de totale afvoer naar oppervlaktewater afneemt met slechts 0,01 mm/dag. Een toename van de basisafvoer compenseert dus grotendeels de afname van de lozing van effluent.



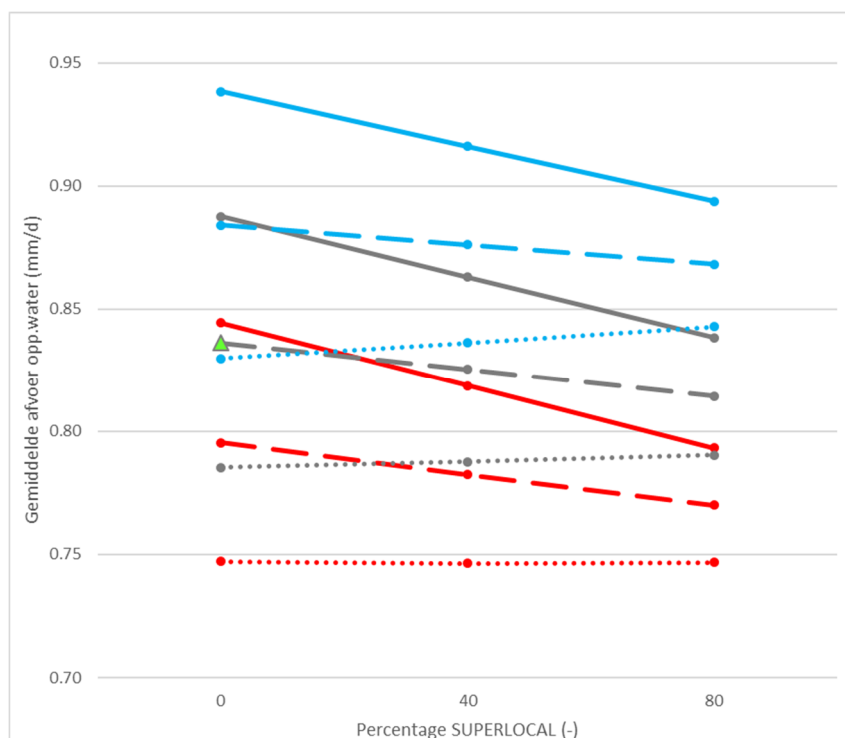
Figuur 12: Afvoer naar het oppervlaktewater in het basismodel, uitgesplitst naar componenten.



Figuur 13: Totale afvoer van oppervlaktewater (in mm/d) in het Vensim-model van april 2010 t/m maart 2012, in het basismodel (donkergrijs) en bij toepassing van 40% (rood) en 80% SUPERLOCAL (blauw).

In het basismodel zorgt toepassing van SUPERLOCAL voor een geringe afname van de gemiddelde afvoer naar het oppervlaktewater. Uit Figuur 14 volgt dat dit niet voor alle combinaties van systeemweerstand en percentage lokaal drinkwater geldt. Bij 0% lokale drinkwaterwinning (ononderbroken lijnen) treedt bij toepassing van SUPERLOCAL een grotere afname van de afvoer op dan bij 100% lokale drinkwaterwinning (gestreepte lijnen). In geval van 200% lokale drinkwaterwinning (stippellijnen) blijft de gemiddelde afvoer gelijk of treedt zelfs een toename op. Dit laatste is ook deels afhankelijk van de systeemweerstand: de toename is sterker in de scenario's met de laagste systeemweerstand (1000 d; blauwe lijnen). Een verklaring hiervoor ligt in de veranderde verhouding tussen de hoeveelheid effluent en de hoeveelheid drainage in de verschillende scenario's. De hoeveelheid effluent richting oppervlaktewater neemt af bij toename van het percentage SUPERLOCAL. Deze afname wordt niet beïnvloed door de systeemweerstand of het percentage lokaal gewonnen drinkwater. De hoeveelheid drainage vanuit grondwater naar oppervlaktewater neemt juist toe bij een hoger percentage SUPERLOCAL, het gevolg van extra infiltratie. Echter, deze toename is wel afhankelijk van systeemweerstand en percentage lokaal drinkwater: het effect is sterker bij een grotere hoeveelheid drinkwateronttrekking en bij een lagere systeemweerstand (de blauwe stippellijn in Figuur 14).



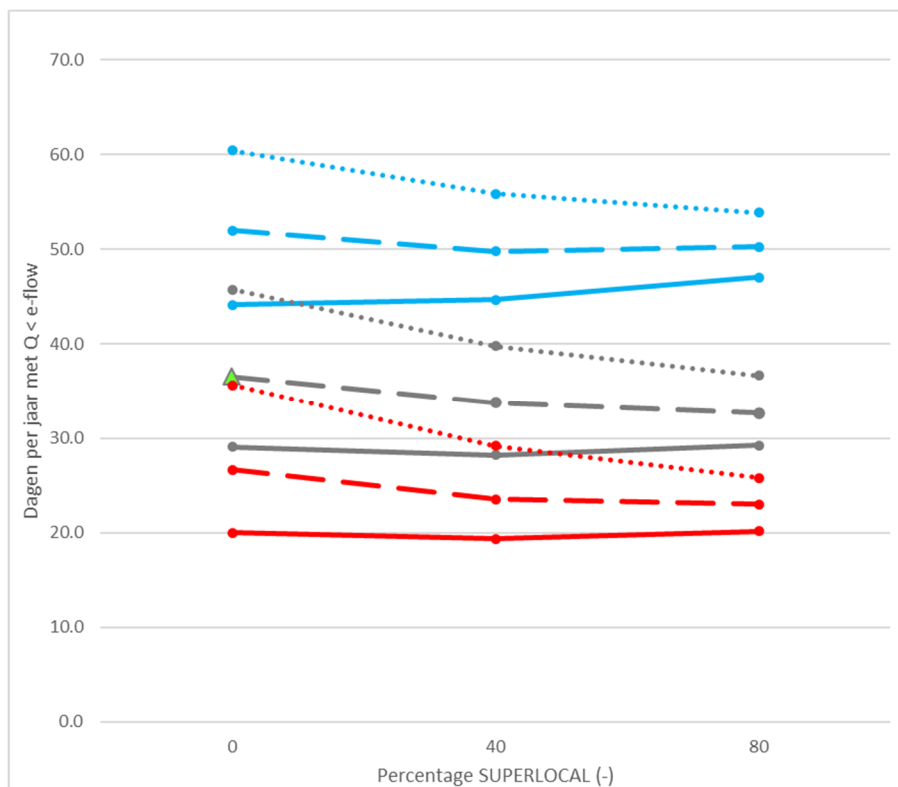


Figuur 14: Gemiddelde afvoer naar het oppervlaktewater voor de doorgerekende scenario's. Legenda: De groene driehoek is het basismodel. De verschillende kleuren geven de systeemweerstand aan: blauw = 1000 d, grijs = 1500 d, rood = 2000 d. Het lijntype geeft het percentage lokaal drinkwater aan: ononderbroken lijn = 0%; gestreepte lijn = 100%; stippelij = 200%.

#### Aantal dagen met afvoer lager dan Q10 (e-flow)

De Q10-afvoer in het basismodel bedraagt 0,24 mm/d. In 10% van de tijd (36,5 dagen per jaar) is de totale afvoer naar oppervlaktewater in het basismodel gelijk aan of lager dan deze *e-flow*. Toepassing van SUPERLOCAL zorgt in het basismodel voor een lichte afname van het aantal dagen per jaar met afvoeren lager dan *e-flow*: onder SL40 neemt het aantal dagen af tot 33,8 dagen per jaar, onder SL80 tot 32,7 dagen per jaar. Uit de bespreking van Figuur 13 was al vastgesteld dat toepassing van SUPERLOCAL het grootste deel van de tijd leidt tot een toename van de totale oppervlaktewaterafvoer. Dit is ook terug te zien in een afname van het aantal dagen met zeer lage afvoer.

Uit Figuur 15 volgt dat deze afname afhankelijk is van de systeemweerstand en het percentage lokaal gewonnen drinkwater, zoals ook het geval was voor de gemiddelde oppervlaktewaterafvoer. De afname is het sterkst bij een hoge systeemweerstand en een hoog percentage lokale drinkwaterwinning. Een hogere systeemweerstand zorgt voor een stabielere drainage, met minder uitschieters naar beneden. Een hoger percentage lokale drinkwaterwinning zorgt voor een lagere grondwaterstand en dus minder drainage, waarbij het effect van minder effluentafvoer als gevolg van SUPERLOCAL-maatregelen relatief sterker doorwerkt. Ook valt op dat bij sommige combinaties van systeemweerstand en percentage lokale drinkwaterwinning het effect omgekeerd is, met name bij scenario's met SL80: het aantal dagen met afvoer lager dan *e-flow* neemt dan licht toe. Dit effect is het duidelijkst bij de laagste systeemweerstand en bij afwezigheid van lokale drinkwaterwinning. Wanneer er lokaal weinig tot geen drinkwater wordt gewonnen, is het effect van gereduceerde grondwaterwinning niet tot nauwelijks merkbaar in het gebied zelf. Het netto effect wordt dan vooral bepaald door de afname in effluentafvoer, hetgeen zorgt voor lagere afvoeren en dus een toename van het aantal dagen met zeer lage afvoer.



Figuur 15: Gemiddeld aantal dagen per jaar dat de oppervlaktewaterafvoer lager is dan e-flow (Q10 basismodel). Legenda: De groene driehoek is het basismodel. De verschillende kleuren geven de systeemweerstand aan: blauw = 1000 d, grijs = 1500 d, rood = 2000 d. Het lijntype geeft het percentage lokaal drinkwater aan: onderbroken lijn = 0%; gestreepte lijn = 100%; stippellijn = 200%.

## 5 Discussie en synthese

### 5.1 Potentiële effecten van SUPERLOCAL op waterketen en watersysteem

Het potentiële effect van de maximale toepassing, in het gehele stedelijke gebied, van het concept SUPERLOCAL op zowel lokale als regionale schaal is met behulp van Sankey-stroomdiagrammen overzichtelijk in beeld gebracht. Binnen de waterketen gaat het om veranderingen in drinkwaterproductie en -levering en in de verwerking van afvalwater. Toepassing van SUPERLOCAL kan in theorie de vraag naar drinkwater terugbrengen met ruim 50% op jaarbasis. Doordat deels gebruik wordt gemaakt van opgevangen hemelwater, wordt de drinkwatervraag wel meer afhankelijk van klimaatfactoren, zoals het voorkomen van droge en natte jaren. In droge jaren is minder neerslag beschikbaar en zal meer ‘conventioneel’ drinkwater nodig zijn dan in natte jaren, met als gevolg dat het drinkwaterverbruik en de reductie per jaar sterk kan verschillen. Welke invloed dit heeft op het productieproces van drinkwater en de infrastructuur van de levering en zal nader moeten worden onderzocht, waarbij ook bergingsmogelijkheden zoals ASR kunnen worden overwogen. De te behalen reductie is bovendien sterk afhankelijk van aannames rondom verbruik en toepassing, en kan anders uitvallen bij andere uitgangspunten. Zo gaat SUPERLOCAL enkel uit van toepassing in huishoudens. De reductie in drinkwatergebruik kan groter worden indien SUPERLOCAL of een soortelijk concept ook bij zakelijke klanten wordt toegepast. Een tweede belangrijke aantekening is dat de huishoudelijke watervraag in de modellering constant is verondersteld. In werkelijkheid is de vraag vaak iets hoger in de zomer dan in de winter (Krajenbrink et al., 2021), zeker in droge zomers. In droge periodes zal zodoende meer drinkwater nodig zijn, waardoor de totale besparing op drinkwaterproductie en -levering lager kan uitvallen dan we in deze studie hebben berekend.

SUPERLOCAL kan door besparing in het huishoudelijk watergebruik de Droogweerafvoer (DWA) op jaarbasis met ruim 40% beperken. Tevens wordt de Hemelwaterafvoer (HWA) afgekoppeld en deels hergebruikt, zodat de besparing op de totale restwaterstroom oploopt tot bijna 60%. Daarnaast wordt de stroom influent constanter, doordat de sterk fluctuerende HWA-stroom niet meer in het riool terecht komt. Hierbij is wel aangenomen dat de stromen DWA en rioolvreemd water door het jaar heen constant zijn. In werkelijkheid zal ook het volume van deze stromen enigszins variabel zijn. Zo bestaat rioolvreemd water voor een deel uit drainagewater (Van de Kerk, 2005), waardoor het volume van RWZI-influent in de winter wat groter zal zijn. Grootchalige toepassing van SUPERLOCAL kan implicaties hebben voor het proces van afvalwaterverzameling en -zuivering. Bij een constantere stroom, zonder pieken van hemelwater, kunnen rioolbuizen in theorie kleiner worden gedimensioneerd. Het ontbreken van HWA zorgt voor minder verdunning van de vuilvracht bij de RWZI. De precieze implicaties voor de afvalwaterbehandeling zijn in deze studie verder niet in beeld gebracht.

Ook het watersysteem zal worden beïnvloed door toepassing van SUPERLOCAL, zowel via het oppervlaktewater als het grondwater. In Hoog Nederland wordt effluent geloosd op lokale waterlopen, die zodoende voor hun watervoerendheid deels afhankelijk worden van de effluentstroom. De jaarlijkse afvoer van de Anselderbeek, nabij de locatie van SUPERLOCAL, bestaat gemiddeld voor 37% uit effluent, met enige variatie door het jaar heen. Toepassing van SUPERLOCAL kan de totale jaarlijkse afvoer van die beek verminderen met iets meer dan 20%. De jaarlijkse afvoer van de Aa bij Asten, onderwerp van de studie RWZI als Waterfabriek (Krajenbrink et al., 2021), kan bij toepassing van SUPERLOCAL met eenzelfde percentage worden gereduceerd. De Aa kent echter een sterke seizoensvariatie, waardoor de afname van de afvoer in zomermaanden groter kunnen zijn. Op basis van beide voorbeelden concluderen we dat het effect van grootchalige implementatie van SUPERLOCAL op het oppervlaktewater sterk afhangt van de locatie. In veel gevallen zal het effect van verminderde effluentlozingen relatief gering zijn, zeker op jaarbasis, zoals het geval is bij RWZI Kaffeberg. Echter, in kleine waterlopen met een sterke seizoensvariatie in de afvoer en een gering aandeel drainageafvoer kan een reductie van de effluentlozing aanzienlijk zijn in droge perioden met weinig natuurlijke beekafvoer.

De afname van effluentlozing komt voor een belangrijk deel op het conto van het volledig afkoppelen van huishoudelijk afvalwater (DWA) en hemelwater (HWA) van het riool, zoals in SUPERLOCAL wordt beoogd. Een belangrijke aantekening hierbij is dat het huishoudelijke afvalwater in SUPERLOCAL lokaal wordt gezuiverd en vervolgens op het oppervlaktewater wordt geloosd. Indien dit hetzelfde oppervlaktewater is als waar de RWZI het effluent op loost, komt het huishoudelijke afvalwater alsnog in hetzelfde watersysteem terecht en zal de afname van de watervoerendheid een stuk geringer zijn. Daarnaast is in paragraaf 2.2 beschreven dat overtollig hemelwater dat niet kan worden hergebruikt, zoveel mogelijk wordt geïnfiltreerd in de bodem. Bij hevige regenval zal dit niet altijd mogelijk zijn, waardoor een deel van het hemelwater via het oppervlak zal afstromen naar het oppervlaktewater (zie ook Figuur 1 en Figuur 2). Als dit hetzelfde oppervlaktewatersysteem is als waarop de RWZI het effluent loost, dan zal de jaarlijkse potentiële reductie van de afvoer van de waterloop eveneens kleiner zijn. Dit zal echter geen rol spelen in langdurig droge perioden, wanneer er sowieso geen sprake is van afvoer van hemelwater.

SUPERLOCAL heeft potentieel ook invloed op het grondwater. Door stedelijk hemelwater niet af te voeren naar het riool maar zoveel mogelijk lokaal te infiltreren, kan op jaarbasis circa 35% extra infiltratie plaatsvinden bovenop de hoeveelheid die normaalgesproken al infiltreert. De netto hoeveelheid is het grootst in de wintermaanden en het minst in april. Een belangrijke aantekening bij de gepresenteerde hoeveelheden is dat de hoeveelheid infiltratie staat of valt met de infiltratiecapaciteit van de bodem. Een matige of slechte doorlatendheid van de bodem, zoals ook aangetroffen tijdens de implementatie van SUPERLOCAL in Kerkrade, kan de mate van infiltratie sterk negatief beïnvloeden. Daarnaast speelt ook de indeling van het stedelijke gebied een rol, denk aan de verhouding verhard-onverhard.

Een reductie van ruim 50% van de drinkwaterproductie betekent in Hoog Nederland een navenante reductie van het benodigde grondwater. Welk effect dit heeft op het regionale grondwater, is afhankelijk van de geohydrologie en zal van locatie tot locatie verschillen. Ter plaatse van de onttrekkingsputten zal een halvering van de winning naar verwachting een vrij groot effect hebben in het desbetreffende watervoerende pakket. Bij een diepe winning zal het effect op de freatische grondwaterstand naar verwachting beperkt zijn. Bij ondiepe grondwaterwinningen, zoals bijvoorbeeld in het oosten van Nederland voorkomen (Achterhoek, Twente), kan aan maaiveld een verhoging van de grondwaterstand optreden. Of dit tot problemen leidt, hangt af van het landgebruik in de omgeving van de winning.

Extra infiltratie en gereduceerde drinkwaterwinning beïnvloeden beide het grondwatersysteem. In stedelijk gebied kan het gecombineerde effect van de maatregelen in SUPERLOCAL in theorie de netto druk op het grondwater met ruim twee derde verminderen. Wanneer we kijken op grotere schaal en ook onttrekkingen voor landbouw en industrie in beschouwing nemen, is de vermindering van de netto druk iets lager, maar nog steeds bijna 50%. Of het zinvol en wetenschappelijk correct is om de invloed van toegenomen hemelwaterinfiltratie en afgenomen grondwateronttrekking bij elkaar op te tellen, hangt sterk af van de lokale situatie en de wijze van infiltratie en onttrekking. Ten eerste heeft lokale infiltratie van hemelwater in stedelijk gebied via lokale afkoppeling een diffusere invloed op het grondwater dan infiltratie van verzameld hemelwater op één of enkele locaties. Ten tweede is het effect van een diepe drinkwaterwinning aan maaiveld diffuser dan van een ondiepe drinkwaterwinning. Indien het ondiepe (waarin doorgaans wordt geïnfiltreerd) en diepe grondwater worden gescheiden door een of meerdere weerstandslagen, is het fysisch gezien beter is om te spreken van verschillende systemen.

## 5.2 Aanvullende inzichten via de Vensim-benadering

Veranderingen in waterstromen van en naar het ondiepe grondwater kunnen niet los worden gezien van de invloed van het oppervlaktewatersysteem en andersom. Extra infiltratie naar het grondwater kan bijvoorbeeld leiden tot extra afvoer van grondwater naar het oppervlaktewater, waardoor het effect van infiltratie op de grondwaterstand deels weer wordt opgeheven, afhankelijk van de vertraging van drainageafvoer in het systeem. In feite is het beter om te kijken wat de invloed van verschillende gebiedskenmerken en (combinaties van) maatregelen is op de

grondwaterstand en de afvoer op een bepaalde locatie. Hiervoor is de toepassing van een systeemdynamisch model geschikter. We hebben het systeemmodel Vensim toegepast op een fictieve regio, waarbij het concept SUPERLOCAL in meer of mindere mate is toegepast in het stedelijke gebied, met als doel de invloed van het concept op verschillende (niet-lineaire) processen binnen het watersysteem beter te begrijpen.

Toepassing van SUPERLOCAL leidt tot hogere grondwaterstanden als gevolg van minder grondwateronttrekking en extra infiltratie. Dit verlicht de netto druk op het grondwater, zoals we eerder ook hadden vastgesteld in de Sankey-benadering. Daarnaast neemt de fluctuatie van de grondwaterstand (GHG-GLG) licht toe. Het precieze effect op het grondwater hangt echter sterk samen met andere gebiedskenmerken en zal dus per locatie verschillen. Zo is het effect van SUPERLOCAL groter wanneer meer onttrekking voor drinkwaterwinning in de omgeving plaatsvindt. Door onttrekkingen is grondwaterstand lager, waarbij eerder effect optreedt van infiltratie. Merk op dat dit effect ook zal optreden bij de aanwezigheid van andere onttrekkingen, bijvoorbeeld voor landbouw of industrie. Dit betekent ook dat extra infiltratie het effect van een lokale winning of onttrekking deels kan compenseren. Omgekeerd geldt dat SUPERLOCAL minder zin heeft in 'natte' gebieden met een hoge grondwaterstand, of zelfs tot lokale wateroverlast kan leiden. Extra hemelwater zal immers versneld worden afgevoerd via het oppervlaktewater en deels via verdamping. We hebben eveneens vastgesteld dat SUPERLOCAL meer effect heeft in gebieden met een hogere systeemweerstand (langere responstijd). Extra infiltratie kan niet zo snel worden afgevoerd, wat leidt tot een sterkere stijging van de grondwaterstand. In gebieden met een lagere systeemweerstand (kortere responstijd) heeft infiltreren minder zin, omdat het water snel wordt afgevoerd. We concluderen dat voor succesvolle implementatie van maatregelen zoals SUPERLOCAL ook aanpassingen in de ontwatering nodig zullen zijn, om te voorkomen dat bijvoorbeeld geïnfilterd water te snel weglekt. Daarnaast is het zeer belangrijk om te bepalen of het grondwatersysteem in het systeemmodel als één systeem kan worden beschouwd of als meerdere deelsystemen. Indien infiltratie en onttrekking plaatsvinden uit verschillende watervoerende pakketten, van elkaar gescheiden door weerstandslagen, zal het effect van ondiepe infiltratie niet of nauwelijks effect hebben op de stijghoogte in diepere pakketten waaruit onttrokken wordt en dus op eventuele kwel vanuit diepere pakketten. Wel zal het effect dat diepere onttrekkingen aan maaiveld uitoefenen iets worden verzacht. Maatregelen zoals voorgesteld in SUPERLOCAL zullen een groter effect hebben op locaties met freatische onttrekkingen. Voordat een concept zoals SUPERLOCAL grootschalig kan worden toegepast, moeten daarom de gebiedskenmerken van een regio goed in beeld worden gebracht, idealiter in combinatie met modelberekeningen.

Toepassing van SUPERLOCAL in 80% van het stedelijk gebied (scenario *SL80*) leidt tot een afname van de effluentstroom van ongeveer 66%. Dit getal verschilt iets van de afname die eerder in de Sankey-benadering is vastgesteld, hoewel de afwijking gering is. De gemiddelde totale afvoer naar het regionale oppervlaktewater neemt licht af (enkele procenten) bij toepassing van SUPERLOCAL. Dit wordt vooral veroorzaakt door de sterke afname van (neerslag)pieken in de stedelijke afvoer, in combinatie met een gemiddeld iets hogere verdamping. Buiten deze neerslaggebeurtenissen is de basisafvoer (*baseflow*) in bijvoorbeeld scenario *SL80* juist iets hoger. Toepassing van SUPERLOCAL zorgt voor een constantere afvoer met minder fluctuaties, zoals eveneens geconcludeerd in de analyse van het effect op lokale waterlopen: de basisafvoer uit grondwater is beter op orde en er is netto een vertraging in de afvoer van neerslag. Daarnaast blijkt de absolute toename van de afvoer van oppervlaktewaterafvoer niet even groot als de afname van de effluentstroom. Dit komt door een toename in de drainage als gevolg van hogere grondwaterstanden en de daaruit voortkomende hogere baseflow. We concluderen dat de afname van effluent door de toepassing van SUPERLOCAL niet één-op-één kan worden doorvertaald naar een afname in de oppervlaktewaterafvoer (superpositie). Er treden neveneffecten op die het effect van de afname dempen. Toepassing van SUPERLOCAL kan voor bepaalde lokale waterlopen betekenen dat ze minder afhankelijk worden van effluent en meer gestuurd zullen worden door basisafvoer, wat zeer wenselijk kan zijn.

Zoals ook is vastgesteld voor het grondwater, is ook het effect van toepassing van SUPERLOCAL op het oppervlaktewater afhankelijk van de uitgangssituatie. Dit komt doordat de hoeveelheid drainage afhankelijk is van gebiedskenmerken, onder ander de systeemweerstand en de hoeveelheid onttrekking voor drinkwaterproductie binnen het gebied. Het netto effect op de oppervlaktewaterafvoer van enerzijds een toename van drainage en anderzijds een afname van de hoeveelheid effluent zal daardoor per locatie verschillen. Behalve voor de

gemiddelde afvoer geldt dit ook voor de lage afvoer van waterlopen, bijvoorbeeld rondom Q10 (*e-flow*). Toepassing van SUPERLOCAL zorgt in de meeste berekende scenario's voor een lichte daling van het aantal dagen met lage afvoer, maar ook dit hangt samen met factoren als systeemweerstand en grondwaterwinningen.

Daarnaast zullen klimaatfactoren van invloed zijn op de precieze invloed van SUPERLOCAL op het watersysteem. Zo kan het hiervoor beschreven netto effect anders zijn onder extreme weersomstandigheden zoals langdurige droogte. Als grondwaterstanden dermate laag worden dat het effect van de iets verhoogde basisafvoer wegvalt, wordt het effect van lagere effluentafvoer niet meer gecompenseerd en zal het effect van SUPERLOCAL vooral negatief zijn. Dit zal eerder het geval zijn in gebieden met een lage systeemweerstand.

Het effect van SUPERLOCAL op de ecologie van de waterloop zal op sommige locaties positief zijn, doordat de waterloop minder kans heeft op droogval, maar ook dit is sterk locatie-afhankelijk. Daarbij geldt dat de resultaten uit het Vensim-model een gemiddeld regionaal beeld geven, een gevolg van noodzakelijke en gewenste vereenvoudiging in de schematisatie. Het effect is op regionale schaal gering, maar lokaal kan dat anders zijn. Zo zal in de buurt van het lozingspunt van een RWZI het effect eerder negatief zijn, en bovendien groter dan gemiddeld voor de regio is berekend.

## 5.3 Synthese

### 5.3.1 Effecten op het watersysteem

We hebben via verschillende benaderingen vastgesteld dat grootschalige toepassing van stedelijke concepten van waterbesparing zoals SUPERLOCAL het regionale watersysteem beïnvloedt. De maatregelen kunnen in potentie bijdragen aan een verhoging van de grondwaterstand en aan iets hogere en meer gelijkmatige oppervlaktewaterafvoeren, mits aan een aantal voorwaarden wordt voldaan. Zo moet de systeemweerstand voldoende hoog zijn om geïnfiltreerd water lang genoeg vast te kunnen houden en moeten grondwaterstanden niet te diep wegzakken om te voorkomen dat de basisafvoer te laag wordt. Dit kan worden bewerkstelligd door bijvoorbeeld de ontwatering te extensiveren door het verondiepen of dempen van sloten. Overigens zijn ook het drainageniveau en de infiltratiecapaciteit daarbij belangrijke factoren, die in deze studie echter niet in detail onderzocht zijn. Maatregelen zoals in SUPERLOCAL lijken daarom vooral kansrijk in gebieden die een lange responstijd. In de praktijk zijn veel gebieden in Nederland en Vlaanderen echter sterk ontwaterd (met dus een lage systeemweerstand). In dergelijke gebieden met een lage responstijd kunnen concepten als SUPERLOCAL nog steeds zinvol zijn, bijvoorbeeld als ze eventuele lokale onttrekkingen verminderen. In perioden van extreme droogte en zeer lage grondwaterstanden, wanneer er van nature al weinig basisafvoer is, kunnen maatregelen die de effluentstroom beperken juist een nadelig effect op lokaal oppervlaktewater hebben, dat dan grotendeels of volledig afhankelijk is van de aanvoer van effluent. In dat laatste geval is het verstandig om waterbesparingsmaatregelen te combineren met ingrepen die de basisafvoer verbeteren, zoals het verminderen van drainage of extensiveren van de ontwatering, waardoor de grondwaterstand over langere perioden wordt verhoogd.

Voor het netto effect op het watersysteem maakt het veel uit of drinkwater lokaal wordt onttrokken of van elders wordt aangevoerd. In het tweede geval zal drinkwaterbesparing weinig tot geen effect op het grondwater en de oppervlaktewaterafvoer in de omgeving hebben, maar vooral elders een (positief) effect hebben. Tevens is het belangrijk om vast te stellen of het grondwatersysteem als één (freatisch) systeem kan worden opgevat of dat handelingen als infiltratie en grondwateronttrekking in verschillende pakketten plaatsvinden, gescheiden door weerstandslagen. Tot slot is het goed om te beseffen dat infiltratie van hemelwater in gebieden met hoge grondwaterstanden juist kunnen leiden tot lokale wateroverlast. Voordat maatregelen zoals beschreven in het concept SUPERLOCAL op grote schaal kunnen worden toegepast, moet het netto effect van de voorgestelde maatregelen uitvoerig worden onderzocht, inclusief de juiste gebiedskenmerken.

### 5.3.2     **Systeemvisualisatie en -modellering**

We stellen vast dat zowel visualisatie van waterbalansberekeningen met Sankey-stroomdiagrammen als systeemmodellering met Vensim nuttige inzichten geeft in het te verwachten effect van concepten zoals SUPERLOCAL op de waterketen en het watersysteem. Sankey-diagrammen bieden de kans om veranderingen in de verhoudingen tussen waterstromen op grove schaal snel inzichtelijk te maken, met name binnen de waterketen, bijvoorbeeld voor beleidsmakers. Er is geen modellering voor nodig, hoewel de systematiek uiteraard kan worden gebruikt om modelresultaten te presenteren. Indien ze alleen worden toegepast op bijvoorbeeld meetgegevens of snelle waterbalansberekeningen, kunnen veranderingen in het watersysteem alleen met behulp van superpositie (het stapelen van onafhankelijk berekende veranderingen) worden gevisualiseerd. Interactie tussen onderdelen en niet-lineariteit blijven hierdoor noodgedwongen buiten beschouwing, zodat de visualisatie een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid geeft, met name wat betreft het watersysteem. Voor inzichten op grote schaal kan dit evenwel nog steeds zeer nuttig zijn, zeker voor beleidsmakers. Een ander nadeel van Sankey-diagrammen is het feit dat de weer te geven waterstromen qua orde grootte niet al te veel van elkaar kunnen verschillen omwille van de leesbaarheid. Als gevolg hiervan worden sommige processen op een ander schaalniveau vaak weggelaten, met name onderdelen van het watersysteem zoals afvoer van oppervlaktewater. Indien dit duidelijk is aangegeven, hoeft dit geen probleem te zijn, maar voor het totale beeld van het watersysteem is dit een beperking.

Een vereenvoudigde modellering met een systeemdynamisch model zoals Vensim kan voor de genoemde beperkingen van de Sankey-benadering een uitkomst bieden. Systeemdynamische modellen bieden de mogelijkheid om systemen en de onderlinge samenhang tussen deelsystemen beter te begrijpen, maar zijn in vergelijking met gedistribueerde modellen voldoende eenvoudig om snel te kunnen doorrekenen. In de huidige studie hebben we goed inzicht kunnen verkrijgen in de samenhang tussen systeemonderdelen, met name de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater, wat met een eenvoudige waterbalansberekening niet mogelijk is. We hebben hiermee een aantal uitkomsten van de Sankey-benadering ten aanzien van het effect van SUPERLOCAL kunnen aanvullen en nuanceren. Tegelijkertijd schuilt in het hoge abstractieniveau alsnog een risico: door met gebiedsgemiddelden te werken, blijven lokale effecten van aanpassingen in het watersysteem mogelijk onderbelicht. Daarnaast zijn wegens gebrek aan detailinformatie ook in het systeemmodel een aantal onderdelen en processen in het watersysteem weggelaten of vereenvoudigd, zoals de component rioolvreemd water en de weerstandscoefficiënt in oppervlaktewater (Manning). We schatten in dat dit geen noemenswaardige invloed heeft op het vergelijken van de doorgerekende SUPERLOCAL-scenario's. Een systeemmodel als Vensim is geschikt voor een eerste verkenning van de effecten van grootschalige inzet van SUPERLOCAL-maatregelen op een bepaalde locatie. Als uit deze verkenning blijkt dat de maatregelen kansrijk zijn, moet het precieze effect uitvoeriger worden bepaald met een gedetailleerde ruimtelijke simulaties, met inbegrip van gebiedskenmerken en randvoorwaarden. De gekozen modelaanpak is daarmee van belang voor het snel verkrijgen van eerste inzichten voor een groot aantal combinaties van maatregelen en scenario's, waaruit een selectie van kansrijke oplossingsrichtingen volgt. Voor deze selectie kan vervolgens een uitgebreidere, ruimtelijk expliciete modellering worden opgezet.

## 6 Bronvermelding

Averink, J., 2013. Methoden voor bepalen hoogste en laagste grondwaterstanden. Universiteit Twente u0909

Bouziotas, D., D. van Duuren, 2019. SUPERLOCAL – UWOT model. KWR

Bouziotas, D., D. van Duuren, H.J. van Alphen, J. Frijns, D. Nikolopoulos, C. Makropoulos, 2019. Towards Circular Water Neighborhoods: Simulation-Based Decision Support for Integrated Decentralized Urban Water Systems. *Water* 11(60), 1227. doi:10.3390/w11061227

Broks, K., H. van Lujtelaar, 2015. Groene daken nader beschouwd. STOWA 2015-12. ISBN 978.90.5773.674.2

Brouwer, S., N. van Aalderen, S. Koop, 2020. Waterbesparing door burgers: welke maatregelen zijn mogelijk en hoe overtuig je mensen? H2O Online. <https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/waterbesparing-door-burgers-welke-maatregelen-zijn-mogelijk-en-hoe-overtuig-je-mensen>

Geudens, P.J.J.G., O.A.A. Kramer, 2022. Drinkwaterstatistieken 2022. Vewin

Hofman-Caris, R., J. Vreeburg, G. Cirkel, P. Smeets, 2023. Alternatieve bronnen en toepassingen van water. H2O Online. <https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-podium/uitgelicht/alternatieve-bronnen-en-toepassingen-van-water>

Van de Kerk, A.J., 2005. DWAAS – vervolgonderzoek rioolvreemd water. STOWA 2005-20, ISBN 90.5773.309.9

Krajenbrink, H., S. Stofberg, R. Bartholomeus, 2021. RWZI als Waterfabriek voor een robuuste watervoorziening. STOWA 2021-31. ISBN 978.90.5773.952.1

Pronk, G., T. van Dooren, S. Stofberg, R. Bartholomeus, 2020. Waterhergebruik en de zoetwatervoorziening. BTO 2020.011

Van der Roest, E., G. Cirkel, S. Clevers, M. Paalman, 2019. City Nieuwegein: klimaat-adaptief en energieneutraal. Water- en energiebalans City Nieuwegein. KWR 2018.119

Stofberg, S., M. van Huijgevoort, H. Krajenbrink, E. Brakkee, 2024. Interventies in het watersysteem (*in voorbereiding*)



# Bijlagen

# I Overzicht van de variabelen in het Vensim-model

Variabele	Type	Beschrijving	Berekening	(Start)waarde in basismodel	Opmerking/bron
<i>Stedelijk gebied algemeen</i>					
Percentage stedelijk	Constante	Aandeel stedelijk gebied (verhard + onverhard) in het gehele modelgebied (-)	-	0,1	Ongeveer 10% in Nederland
Percentage stedelijk verhard	Constante	Aandeel verhard oppervlak binnen stedelijk gebied (-)	-	0,87	Landelijk gemiddelde in Nederland ongeveer 87% (Van der Roest et al., 2019)
Percentage verhard	Variabele	Aandeel verhard oppervlak in gehele model (-)	[Percentage stedelijk] * [Percentage stedelijk verhard]	-	
Bevolkingsdichtheid stedelijk gebied	Constante	Aantal inwoners per km <sup>2</sup> stedelijk gebied (p/km <sup>2</sup> )	-	4866	Gebaseerd op CBS-data. Aandeel bebouwd gebied vermenigvuldigd met dichtheid. uitersten o.b.v. Oost-Groningen vs. regio Den Haag. Gemiddeld 4866, variërend tussen 2552 en 9315.
<i>Meteorologie</i>					
Neerslag	Data/tijdreeks	Neerslag op KNMI neerslagstation Roermond (mm/d). Dagelijkse waarden van 1986 t/m 2016	-	-	Zelfde data gebruikt als in UWOT SUPERLOCAL-model
Referentieverdamping	Data/tijdreeks	Referentiegwasverdamping op KNMI-station Maastricht (mm/d). Dagelijkse waarden van 1986 t/m 2016	-	-	Zelfde data gebruikt als in UWOT SUPERLOCAL-model

Variabele	Type	Beschrijving	Berekening	(Start)waarde in basismodel	Opmerking/bron
Verlies hemelwater	Constante	Aandeel hemelwater dat niet tot afstroming komt vanaf verhard oppervlak (-). Betreft vooral verdamping.	-	0,25	0,1 in UWOT, maar 0,25 is realistischer (Broks & van Luijtelaar, 2015).
Hemelwater BAU	Flow	Hoeveelheid hemelwater op verhard oppervlak (mm/d) in de conventionele situatie ( <i>BAU = business as usual</i> )	$[\text{neerslag}] * [\text{percentage verhard}] * (1 - [\text{percentage SUPERLOCAL}]) * (1 - [\text{verlies hemelwater}])$		
<i>Drinkwater</i>					
Drinkwatergebruik NL	Constante	Drinkwatergebruik per inwoner per dag in Nederland (L/p/d)	-	120	Bron: Vewin Drinkwaterstatistieken 2022 (Geudens & Kramer, 2022) o.b.v. enquêtes Kantar. NB: in UWOT-model van SUPERLOCAL wordt uitgegaan van 133 L/p/d
Drinkwatervraag BAU	Variabele	Huishoudelijke en kleinzakelijke drinkwatervraag (mm/d) in de conventionele situatie ( <i>BAU</i> )	$[\text{bevolkingsdichtheid stedelijk gebied}] * [\text{drinkwatergebruik NL}] * [\text{percentage stedelijk}] / 1.000.000$	-	
Percentage lokaal drinkwater	Constante	Aandeel van het benodigde drinkwater in het modelgebied dat binnen de gebiedsgrenzen wordt onttrokken en geproduceerd (-). <1: drinkwater wordt geheel of gedeeltelijk van elders aangevoerd; >1: er wordt meer drinkwater geproduceerd dan nodig, het overschot wordt naar elders getransporteerd.	-	1	
Productieverlies	Constante	Aandeel van drinkwaterproductie dat verloren gaat als o.a. spoelwater (-)	-	0,033	Landelijk ca 3,3% (42 mln m <sup>3</sup> /j) Bron: Geudens & Kramer (2022).

Variabele	Type	Beschrijving	Berekening	(Start)waarde in basismodel	Opmerking/bron
Productieverliezen	Flow	Hoeveelheid productieverliezen (mm/d)	$[\text{productieverlies}] * ([\text{drinkwaterlevering BAU}] + [\text{drinkwaterlevering SUPERLOCAL}])$	-	
Nirg	Constante	Aandeel van drinkwaterproductie dat niet in rekening wordt gebracht (-). Dit is o.a. bluswater	-	0,058	Landelijk 74 mln m <sup>3</sup> /j ofwel 5,8% (Geudens & Kramer, 2022)
Verliezen Nirg	Flow	Hoeveelheid <u>n</u> iet <u>i</u> n <u>r</u> ekening <u>g</u> ebracht drinkwaterverbruik (mm/d), afgekort Nirg	$[\text{Nirg}] * ([\text{drinkwaterlevering BAU}] + [\text{drinkwaterlevering SUPERLOCAL}])$	-	Deze hoeveelheid verdwijnt uit het model
Drinkwaterlevering BAU	Flow	Hoeveelheid drinkwater die wordt geleverd aan het stedelijk gebied met conventionele inrichting (mm/d)	$[\text{drinkwatervraag BAU}] * (1 - [\text{percentage SUPERLOCAL}])$	-	
Drinkwateronttrekking	Flow	Hoeveelheid grondwater die wordt onttrokken voor benodigde drinkwaterproductie (mm/d)	$(1 + [\text{productieverlies}] + [\text{Nirg}]) * ([\text{drinkwaterlevering BAU}] + [\text{drinkwaterlevering SUPERLOCAL}]) * [\text{percentage lokaal drinkwater}]$		
Extern drinkwater	Flow	Hoeveelheid drinkwater (mm/d) die naar elders wordt getransporteerd (positief) dan wel van elders wordt aangevoerd (negatief)	$[\text{drinkwateronttrekking}] - [\text{productieverlies}] - [\text{verliezen Nirg}] - [\text{drinkwaterlevering BAU}] - [\text{drinkwaterlevering SUPERLOCAL}]$	-	
Drinkwaterproductie	Stock	Fictieve buffer (mm) voor drinkwaterproductie (IN) en levering en verliezen (UIT)	$[\text{drinkwateronttrekking}] - [\text{drinkwaterlevering BAU}] - [\text{drinkwaterlevering SUPERLOCAL}] - [\text{extern drinkwater}] - [\text{productieverlies}] - [\text{Verliezen Nirg}]$	0	
<i>SUPERLOCAL</i>					
Percentage SUPERLOCAL	Constante	Aandeel van stedelijk gebied in model dat is ingericht volgens de principes van het SUPERLOCAL-project (-)	-	0	In basismodel uitgaan van alleen BAU, om daarna de invloed van

Variabele	Type	Beschrijving	Berekening	(Start)waarde in basismodel	Opmerking/bron
					toepassing van SUPERLOCAL te kunnen kwantificeren.
RWH Instroom	Flow	Hoeveelheid hemelwater binnen SUPERLOCAL-onderdeel die beschikbaar is voor behandeling en evt. hergebruik (mm/d). RWH = <i>Rain Water Harvesting</i>	$[neerslag] * [percentage\ verhard] * [percentage\ SUPERLOCAL] * (1 - [verlies\ hemelwater])$	-	
RWH opvang	Stock	Regenwaterbuffer voor opvang van te zuiveren hemelwater dat valt op daken en overig verhard oppervlak (mm)	$[RWH\ instroom] - [RWH\ opvang\ overloop] - [RWH\ zuivering]$	0	
RWH opvangvolume	Constante	Volume van regenwaterbuffer (mm)	250.000/10.485	23,8436	250.000 L in UWOT voor de opvang van neerslag op 10.485 m <sup>2</sup> verhard oppervlak; 250.000/10.485 = 23,8436
RWH zuivering capaciteit	Constante	Capaciteit van hemelwaterzuivering (mm/d)	48.000/10.485	4,57797	Capaciteit van 48.000 L/d in UWOT-model. 48.000/10.485 = 4,57797
RWH zuivering	Flow	Hoeveelheid gezuiverd hemelwater (mm/d)	$MIN([RWH\ instroom] + [RWH\ opvang]; [RWH\ zuivering\ capaciteit] * [percentage\ verhard] * [percentage\ SUPERLOCAL])$	-	
RWH opvang overloop	Flow	Hoeveelheid opgevangen hemelwater die niet kan worden gezuiverd en zodoende overstroomt richting infiltratievoorziening (mm/d)	$MAX([RWH\ opvang] + [RWH\ instroom] - [RWH\ zuivering] - [RWH\ opvang\ volume] * [percentage\ verhard] * [percentage\ SUPERLOCAL]; 0)$	-	
RWH voorraad	Stock	Buffer waar gezuiverd hemelwater wordt opgeslagen voor het wordt hergebruikt (mm)	$[RWH\ zuivering] - [RWH\ levering] - [RWH\ voorraad\ overloop]$	0	

Variabele	Type	Beschrijving	Berekening	(Start)waarde in basismodel	Opmerking/bron
Max RWH percentage	Constante	Aandeel van het huishoudelijk watergebruik dat uit hergebruik mag bestaan (-)	-	0,43	In SUPERLOCAL -project op 100% gesteld (Bouziotas & Van Duuren, 2019), maar verstandiger is om hoogwaardig huishoudelijk drinkwatergebruik (douche, kraanwater) niet te vervangen. Het restant is ongeveer 43%
Huish besparing SUPERLOCAL	Constante	Huishoudelijk drinkwatergebruik in SUPERLOCAL als percentage (-) van drinkwatergebruik in conventionele situatie (BAU)	78/133	0,59	Watergebruik in SUPERLOCAL - project bedraagt ongeveer 78 L/p/d, tegenover 133 L/p/d in dat project wordt aangehouden voor conventioneel gebruik (Bouziotas & Van Duuren, 2019)
RWH levering	Flow	Hoeveelheid drinkwater in SUPERLOCAL die afkomstig is uit gezuiverd hemelwater (mm/d)	MIN( [RWH voorraad] + [RWH zuivering]; [huish besparing SUPERLOCAL] * [drinkwatervraag BAU] * [percentage SUPERLOCAL] * [max RWH percentage] )	-	
Drinkwaterlevering SUPERLOCAL	Flow	Hoeveelheid drinkwater die wordt geleverd aan het stedelijk gebied met SUPERLOCAL - inrichting (mm/d)	( [huish besparing SUPERLOCAL] * [drinkwatervraag BAU] * [percentage SUPERLOCAL] ) – [RWH levering]	-	
RWH voorraad volume	Constante	Capaciteit van buffer voor gezuiverd hemelwater (mm)	50.000/10.485	4,76872	Capaciteit van 50.000 L in UWOT-model. 50.000/10.485 = 4,76872
RWH voorraad overloop	Flow	Hoeveelheid gezuiverd hemelwater die niet kan worden hergebruikt en zodoende overstroomt richting infiltratievoorziening (mm/d)	MAX( [RWH voorraad] + [RWH zuivering] – [RWH levering] – [RWH voorraad volume] * [percentage verhard] * [percentage SUPERLOCAL]; 0)	-	

Variabele	Type	Beschrijving	Berekening	(Start)waarde in basismodel	Opmerking/bron
Infiltratievoorziening geschaald oppervlak	Constante	Relatief oppervlak van infiltratievoorziening in SUPERLOCAL (-).	300/10.485	0,0286	Gebaseerd op dimensies uit SUPERLOCAL -casus in Kerkrade (300 m <sup>2</sup> )
Infiltratiecapaciteit bodem	Constante	Infiltratiecapaciteit vanuit infiltratievoorziening in SUPERLOCAL (mm/d)	-	100	Gebaseerd op schatting van oorspronkelijke waarde in UWOT-model van SUPERLOCAL.
Infiltratie SL	Flow	Infiltratie naar grondwater vanuit infiltratievoorziening in SUPERLOCAL (mm/d)	MIN( [Infiltratievoorziening] + [RWH voorraad overloop] + [RWH opvang overloop]; [infiltratiecapaciteit bodem] * [infiltratievoorziening geschaald oppervlak] * [percentage SUPERLOCAL] * [percentage verhard] )	-	
Overloop infiltratie	Flow	Hoeveelheid (mm/d) water in infiltratiecapaciteit die niet kan infiltreren door beperkt opvangvolume en direct afstroomt naar het oppervlaktewater	MAX( [Infiltratievoorziening] + [RWH voorraad overloop] + [RWH opvang overloop] – [infiltratie SL] – [infiltratievoorziening volume] * [percentage verhard] * [percentage SUPERLOCAL]; 0)	-	
<i>Grondwater, oppervlaktewater, overig</i>					
Effluent	Flow	Gecombineerde effluentstroom van afvalwater uit SUPERLOCAL en hemelwater en afvalwater uit conventioneel (BAU) stedelijk gebied (mm/d)	[drinkwaterlevering BAU] + [drinkwaterlevering SUPERLOCAL] + [RWH levering] + [hemelwater BAU]	-	Uitgangspunt is dat geleverd drinkwater volledig tot afvoer komt als effluent.
RWZI	Stock	Gecombineerde opvang en afvoer van afvalwater uit stedelijk gebied, zowel conventioneel (BAU) als SUPERLOCAL, en van hemelwater uit conventioneel stedelijk gebied (mm)	[drinkwaterlevering BAU] + [drinkwaterlevering SUPERLOCAL] + [hemelwater BAU] + [RWH levering] – [effluent]	0	

Variabele	Type	Beschrijving	Berekening	(Start)waarde in basismodel	Opmerking/bron
Bergingscoëfficiënt	Constante	Bergingscoëfficiënt van het onverharde onderdeel van het model (-)	-	0,1	
Grondwaterstand	variabele	Grondwaterstand in het onverharde deel van het model (mm)	[Grondwater] / [bergingscoëfficiënt]		LET OP: niet verwarren met eendimensionaal volume van grondwatervoorraad en -afvoer (zie o.a. de variabelen [grondwater] en [drainage])
Stijgafstand	Constante	Afstand onder maaiveld/referentieniveau waarop verdampingsreductie 100% is (mm)		-10.000	
Verdampingsreductiefactor	Variabele	Factor waarmee verdamping afneemt met de diepte (-). 0 = 100% reductie (stijgafstand); 1 = geen reductie (maaiveld)	IF THEN ELSE( [grondwaterstand] < [stijgafstand]; 0; MIN( ([grondwaterstand] – [stijgafstand] ) / (-1 * [stijgafstand] ); 1) )	-	
Grondwateraanvulling onverhard	Flow	Netto aanvulling van het grondwater (mm/d); Neerslag minus verdamping	( [neerslag] – [verdampingsreductiefactor] * [referentieverdamping] ) * (1 – [percentage verhard] )	-	
Systeemweerstand	Constante	Totale weerstand tussen neerslag en afvoer van het onverharde onderdeel van het model (d)	-	1500	Deze waarde is na gevoeligheidsanalyse en kalibratie van het model gekozen
WeerstandOW	Constante	'Fictieve' weerstand voor de afstroming van water aan maaiveld naar het oppervlaktewater (d)	-	2	Ingebouwd om te snelle afvoer van 'grondwater' boven maaiveld te ondervangen
Drainageniveau	Constante	Oppervlaktewaterpeil ten opzichte van referentieniveau van model (mm). 'Maaiveld' in model is gelijkgesteld aan 0 (referentieniveau)	-	-3000	



Variabele	Type	Beschrijving	Berekening	(Start)waarde in basismodel	Opmerking/bron
Drainage	Flow	Afvoer van grondwater naar oppervlaktewater, of van water aan maaiveld naar oppervlaktewater (mm/d)	$\text{IF THEN ELSE}([ \text{grondwaterstand} ] < [ \text{drainageniveau} ]; 0;$ $\text{IF THEN ELSE}([ \text{grondwaterstand} ] > 0;$ $[ \text{grondwaterstand} ] * [ \text{bergingscoefficient} ] /$ $[ \text{weerstandOW} ] + ( 0 - [ \text{drainageniveau} ] ) /$ $[ \text{Systeemweerstand} ];$ $( [ \text{grondwaterpeil} ] - [ \text{drainageniveau} ] ) /$ $[ \text{Systeemweerstand} ] ) )$		In het model wordt geen wegzijging vanuit oppervlaktewater naar grondwater berekend (grondwaterstand < drainageniveau)
Grondwater	Stock	Fictief grondwaterreservoir (mm), waarin grondwateraanvulling en infiltratie uit SUPERLOCAL wordt opgevangen (IN) en waaruit drainage en grondwater voor drinkwater wordt onttrokken (UIT)	$[ \text{grondwateraanvulling onverhard} ] +$ $[ \text{infiltratie SL} ] - [ \text{drainage} ] -$ $[ \text{drinkwateronttrekking} ]$	-1500 * [bergingscoefficient]	Initiële grondwaterstand: 1,5 m-mv. LET OP: betreft de <u>voorraad</u> grondwater (eendimensionaal volume), niet de grondwaterstand.
Afvoer oppervlaktewater	'variabele'	Som van alle afvoerstromen naar het oppervlaktewater (mm/d), ten behoeve van kalibratie en analyse van modelresultaten	$[ \text{drainage} ] + [ \text{effluent} ] + [ \text{overloop infiltratie} ]$ $+ [ \text{productieverliezen} ]$		