

Bedrijfstakonderzoek
BTO 2024.017 | April 2024

Interventies in het watersysteem

Achtergrondkennis en methoden om
de doorwerking van maatregelen in
het regionale watersysteem te
analyseren

Bedrijfstakonderzoek

KWR

Bridging Science to Practice

Colofon

Interventies in het watersysteem. Achtergrondkennis en methoden om de doorwerking van maatregelen in het regionale watersysteem te analyseren

BTO 2024.017 | April 2024

Opdrachtnummer

403664

Projectmanager

Dr. Klaasjan Raat

Opdrachtgever

Dit onderzoek is mogelijk gemaakt door het programma Water in de Circulaire Economie (WiCE), onderdeel van het Bedrijfstakonderzoek van de drinkwatersector, het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, en de Provincie Noord-Brabant. Het onderzoek is tot stand gekomen in samenwerking met NWO Perspectief-project AquaConnect – ‘Key technologies for safeguarding regional water provision in fresh water stressed deltas’ (TTW P19-45).

Auteurs

Dr. Sija F. Stofberg, dr. ir. Marjolein H.J. van Huijgevoort, dr. ir. Henk J. Krajenbrink, Esther A. Brakkee MSc.

Kwaliteitsborger

Dr. ir. Ruud Bartholomeus

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en samenwerkingspartners en is openbaar.

Keywords

Watersysteemdenken, systeemdynamisch modelleren, regionale analyse, watertransitie

Jaar van publicatie
2024

Meer informatie
dr Sija Stofberg

T 030-6069569
E sija.stofberg@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

April 2024 ©

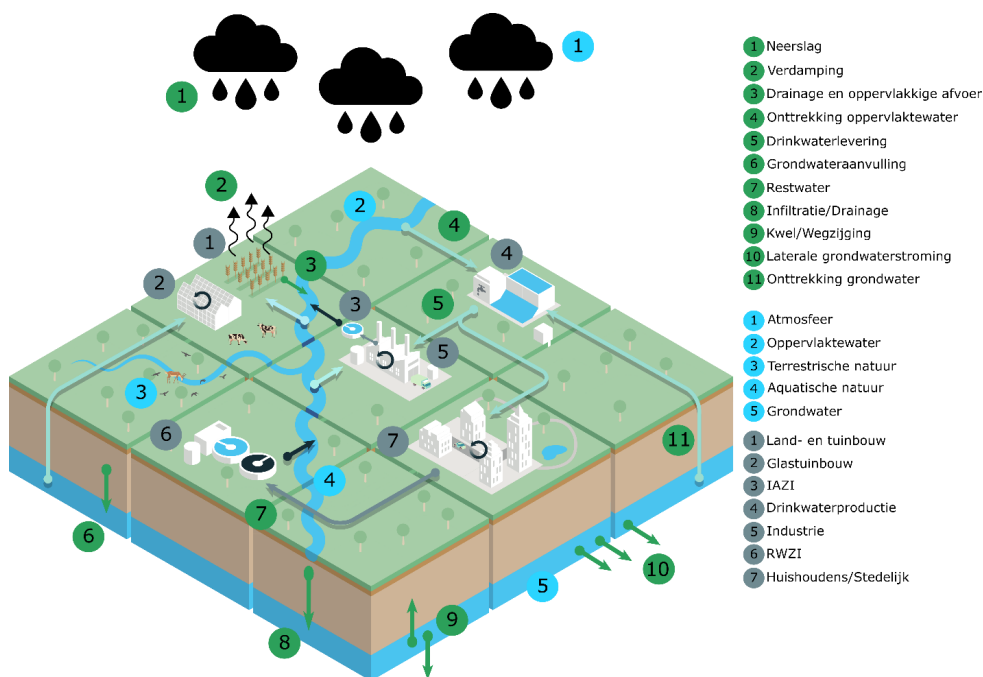
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen,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

Managementsamenvatting

Systeemdynamisch modelleren kan worden ingezet om de mogelijke effecten van maatregelen in regionale watersystemen beter te begrijpen en onderling te vergelijken

Auteurs Dr. Sija F. Stofberg, dr. ir. Marjolein H.J. van Huijgevoort, dr. ir. Henk J. Krajenbrink, Esther A. Brakkee MSc.

De huidige en toekomstige uitdagingen in regionale watersystemen vragen om inzicht in mogelijke maatregelen: welke effecten zijn te verwachten in verschillende typen landschappen, kan er sprake zijn van onverwachte 'bijwerkingen'? In dit onderzoek is verkend hoe systeemdynamisch modelleren kan worden ingezet om de mogelijke effecten van maatregelen in regionale watersystemen beter te begrijpen en onderling te vergelijken. De voorbeeldtoepassingen binnen dit onderzoek laten zien dat dit mogelijk is en hoe de effecten afhangen van bepaalde landschapskenmerken. De methode kan worden gebruikt om relatief eenvoudig én snel kansrijke maatregelen te identificeren voor verschillende typen gebieden. Ook kan de methode inzicht geven in de werking van watersystemen. Systeemdynamisch modelleren is toepasbaar in verschillende contexten, waaronder complexe gevoeligheidsanalyses in professionele context, een interactieve app ter ondersteuning van verkenningen, serious games en educatieve doeleinden. Voor bredere toepassing is verdere ontwikkeling gewenst.



Componenten en processen als onderdeel van een watersysteemmodel

Belang: Effecten van maatregelen op watersystemen verkennen via modellen

De huidige en verwachte uitdagingen in Nederlandse en Vlaamse watersystemen vragen om nieuwe maatregelen, onder andere om de watervoorziening tijdens droge perioden zeker te stellen.

Watersystemen zijn echter complex, met allerlei feedbackmechanismen tussen verschillende deelsystemen. Traditionele manieren om effecten

door te rekenen (numerieke modellen) kosten veel rekentijd en/of negeren de interacties tussen deelsystemen. Met een systeemdynamisch model, waarin fysische processen in de verschillende deelsystemen op een eenvoudige manier worden gesimuleerd, wordt het mogelijk de effecten van maatregelen op verschillende watersystemen relatief eenvoudig en snel te verkennen en te vergelijken.

Aanpak: Verkenning van benodigde kennis en methoden via onder meer literatuuronderzoek

In dit onderzoek is verkend wat er nodig is om systeemdenken en systeemdynamisch modelleren toe te passen op processen in watersystemen. Hiervoor is literatuurkennis verzameld over systeemdenken en onderzocht welke kennis en processen in watersystemen in een model verwerkt zouden moeten worden. Hierbij is gekeken naar relevante processen, systeemkenmerken, toekomstscenario's en mogelijke interventies in watersystemen. Vervolgens zijn enkele watersysteemmodellen en een app (de Watersysteemverkenner) ontwikkeld binnen verschillende cases die beschreven zijn in aparte rapporten.

Resultaten: watersysteemmodellen geven inzicht in effecten maatregelen, gerelateerd aan landschap

In aanvulling op in eerder onderzoek toegepaste Sankeydiagrammen bieden systeemdynamische modellen de mogelijkheid om de factor tijd en (niet-lineaire) processen expliciet mee te nemen, waarbij ook veranderingen in systeemvariabelen (bijvoorbeeld grondwaterstanden) inzichtelijk gemaakt worden. Daarnaast blijken deze modellen geschikt om de effecten van interventies in watersystemen te onderzoeken, en daar ook gevoeligheidsanalyses mee uit te voeren. Hiermee is het bijvoorbeeld mogelijk om zichtbaar te maken hoe landschapskenmerken er voor zorgen dat bepaalde maatregelen verschillende effecten kunnen hebben in verschillende watersystemen. Er is een app ontwikkeld, de 'Watersysteemverkenner', met een toegankelijke interface, die gebruikt kan worden om effecten van maatregelen te verkennen en te vergelijken.

Toepassing: Verder ontwikkelen voor toepassing bij beleidsontwikkeling en gebiedsprocessen

Het blijkt mogelijk te onderzoeken hoe maatregelen (variërend van bijvoorbeeld waterbesparing tot ingrepen in het landschap) kunnen doorwerken in regionale watersystemen, en hoe de effecten afhangen van bepaalde landschapskenmerken. Verdere ontwikkeling van deze kennis maakt het mogelijk verschillende maatregelen voor verschillende typen landschappen te onderzoeken en te komen tot sets van maatregelen die kansrijk zijn

voor bepaalde typen landschappen. Dergelijke kennis kan beleidsontwikkeling en gebiedsprocessen ondersteunen. Voor de uiteindelijke keuze voor maatregelen blijft aanvullend detailonderzoek (met meer traditionele modellen) nodig.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Interventies in het watersysteem. Achtergrondkennis en methoden om de doorwerking van maatregelen in het regionale watersysteem te analyseren* (BTO 2024.017). Andere rapporten uit het WiCE-project *Verbinden watersysteem en waterketen* zijn:

- *Beschikbare kennis van stromen in het watersysteem. Dataverzameling voor conceptuele watersysteemmodellen* (KWR 2022.072). Dit rapport beschrijft welke kennis over waterstromen voorhanden is en hoe deze te verkrijgen is.
- *Juridisch kader aanvulling watersysteem met industrieel restwater* (KWR 2022.102) beschrijft het juridische perspectief op verschillende routes om restwater in te zetten als aanvulling van het watersysteem.
- *Effect van waterbesparing in stedelijk gebied op het regionale watersysteem. Casus SUPERLOCAL* (KWR 2023.062) over onderzoek met systeemdynamisch modelleren naar welke de voorwaarden waaronder lokale drinkwaterbesparing gunstig kan uitpakken voor het regionale watersysteem.
- *Regionale watersysteem analyse: Casestudies Woumen & Mechelen*. Dit rapport brengt in beeld welke effecten lokale ingrepen hebben op het regionale systeem, voor twee Vlaamse casestudies met een systeemdynamisch model.
- *De Watersysteemverkenner* (KWR 2024.013) is een technische handleiding en onderbouwing van het model en de app 'Watersysteemverkenner'.
- *Inzicht in het watersysteem door toepassing van een systeemmodel* (KWR 2024.015). Verkenning van de mogelijke effecten van droogtmaatregelen op de zuidelijke hoge zandgronden.

Inhoud

Colofon	2
<i>Managementsamenvatting</i>	Error! Bookmark not defined.
Inhoud	6
1 Inleiding	8
1.1 'Watertransitie'	8
1.2 Systeemdynamisch modelleren van watersystemen	9
1.3 WiCE Verbinden watersysteem en waterketen	10
1.4 Leeswijzer	11
2 Systeemen denken en systeemdynamisch modelleren	12
2.1 Inleiding	12
2.2 Systeemdynamisch modelleren van het watersysteem	13
2.3 Conceptueel model als basis voor een systeemdynamisch model	13
2.4 Modelopbouw	15
2.5 Gebruik van een systeemdynamisch model van een regionaal watersysteem	15
2.5.1 Gevoeligheidsanalyse	15
2.5.2 Scenario's - randvoorwaarden	16
2.5.3 Interventies	16
2.5.4 Interactie tussen landschapseigenschappen, randvoorwaarden en interventies	16
3 Waterkwantiteit in het regionale watersysteem: modelbouwstenen	17
3.1 Inleiding	17
3.2 Hydrologische componenten	18
3.3 Antropogene componenten	21
3.4 Bouwstenen voor watersysteemmodellen	26
3.4.1 <i>Stocks</i>	26
3.4.2 <i>Flows</i>	27
4 Toekomstscenario's met betrekking tot het watersysteem	29
5 Interventies in het watersysteem	32
6 Toepassing van watersysteemmodellen	36
6.1 Casus 'Woumen', over vergroten van de drinkwaterproductie in Vlaanderen.	36

6.2	Casus 'Mechelen' over afkoppelen en toepassing van stedelijk hemelwater in de landbouw in Vlaanderen	38
6.3	Casus 'Superlocal', over waterbesparingsmaatregelen in huishoudens in een vrij afwaterend gebied	39
6.4	Ontwikkeling van de 'Watersysteemverkenner'	39
6.5	Casus 'Zuid', over waterhergebruik in een Noord-Brabants landschap	42
7	Discussie	43
8	Conclusies	45
9	Referenties	46

1 Inleiding

1.1 'Watertransitie'

In Nederland en Vlaanderen staan we op dit moment voor verschillende nieuwe uitdagingen in het watersysteem. De droogtes in 2018-2020 en 2022, maar ook de overstromingen in de zomer van 2021, hebben de kwetsbaarheid van het huidige watersysteem zichtbaar gemaakt. De toenemende watervraag in combinatie met het vaker voorkomen van droge perioden zorgen voor een grotere druk op de waterbeschikbaarheid. Het Nederlandse watersysteem is vooral ontworpen op het afvoeren van overtollige neerslag. Doordat de randvoorwaarden van het watersysteem (neerslagpatronen, temperaturen) en de eisen ten aanzien van het watersysteem (zoals watervraag) veranderen, voldoet het huidige watersysteem minder goed aan de eisen en ontstaat er periodieke schaarste.

De mens is op veel gebieden afhankelijk van het watersysteem, niet alleen als het gaat om watervoorziening voor bijvoorbeeld drinkwater en landbouw, maar ook voor waterveiligheid en transport over het water. Al vele eeuwen worden watersystemen zó aangepast dat er beter aan dit soort eisen wordt voldaan, bijvoorbeeld door de aanleg van irrigatiesystemen¹, de aanleg van terpen en wierden² of kanalen³. In de loop van de eeuwen zijn er steeds meer ingrepen gedaan in het natuurlijke watersysteem. Deze hingen samen met de vraagstukken en mogelijkheden van dat moment (zie Kader 1-1). Na de oorlog is bijvoorbeeld in een groot deel van Nederland en Vlaanderen intensieve ontwatering aangelegd om water snel af te voeren voor een betere voedselvoorziening. Met de groei van de bevolking, de economie en technologie, groeiden ook de wensen ten aanzien van het watersysteem en de grip die mensen hierop hebben. Nu spelen er nieuwe uitdagingen, onder andere door het veranderende klimaat, toenemende ruimtelijke druk vanuit verschillende sectoren, natuurbescherming en -herstel en achteruitgang van de waterkwaliteit. Door de nieuwe uitdagingen wordt nu opgeroepen tot een watertransitie, om samen op zoek te gaan naar integrale oplossingen voor deze vraagstukken (Unie van Waterschappen & Vewin, 2021). Hiervoor zijn opnieuw ingrijpende aanpassingen in het systeem nodig.

Om de effecten van dit soort aanpassingen goed in beeld te brengen is het belangrijk om te begrijpen hoe het watersysteem werkt en hoe aanpassingen hierin kunnen doorwerken. Het watersysteem bestaat uit verschillende deelsystemen, die hydrologisch (grondwater, oppervlaktewater) of antropogeen (de waterketen, industriewatergebruik) van aard zijn. Deze deelsystemen hebben ieder hun eigen dynamiek en relevante tijdschalen. Voor de watertransitie wordt voornamelijk gekeken naar interventies waarbij verschillende van deze deelsystemen zijn betrokken en waar de regionale schaal relevant is. Hierbij kan gedacht worden aan verschillende vormen van hergebruik van water of (kunstmatige) grondwateraanvulling. Effecten van dit soort interventies kunnen (op soms onverwachte wijze) in verschillende deelsystemen doorwerken: hergebruik van effluent in Hoog Nederland kan zorgen voor minder beekafvoer in droge perioden, maar het is niet bekend in hoeverre eventuele infiltratie van effluent kan bijdragen aan de baseflow in het gebied en dit effect kan compenseren (Krajenbrink et al., 2021a).

¹ <https://archeologieonline.nl/artikelen/irrigatiesystemen-door-de-jaren-heen>

² <https://www.archeoweb.nl/pages/historische-perioden/middeleeuwen/vroege-middeleeuwen.php>

³ <https://archeologieonline.nl/nieuws/romeinse-weg-en-kanaal-gevonden-bij-de-waaldijk>

Voorbeelden van historische ingrepen in watersystemen in Nederland

- Vanaf begin van de jaartelling: de aanleg van waterwegen / kanalen voor de scheepvaart en economische doeleinden, met een grote impuls in de 19^e eeuw met het oog op de ontwikkeling van de handel ^{4,5}
- Vanaf het begin van de jaartelling: aanleg van terpen en wierden, als vluchtheuvels tegen overstromend zeewater ⁶
- Middeleeuwen en daarna: de ontginning van veengebieden, eerst om percelen geschikt te maken voor landbouw, later ook voor turf als energiebron.⁷ Dit begon met de aanleg van sloten voor afwatering.
- Middeleeuwen: het ontstaan van waterschappen, om het waterbeheer op grotere schaal te organiseren ter bevordering van waterveiligheid en landbouw
- Vanaf de 16^e eeuw: de aanleg van droogmakerijen (voornamelijk voor de landbouw)
- 19^e eeuw: het ontstaan van drinkwaterbedrijven als antwoord op onder andere cholera-epidemieën^{8,9}
- 20^e eeuw: de aanleg van de afsluitdijk, bedoeld als waterkering om overstromingen te voorkomen.
- 20^e eeuw: de ruilverkaveling en versterkte ontwatering van landbouwgronden, met het oog op landbouw op grotere schaal en met zwaardere machines
- Tweede helft 20^e eeuw: aanleg van de Deltawerken als antwoord op de watersnood van 1953¹⁰
- Vanaf tweede helft 20^e eeuw: herstel van door de mens beïnvloede watersystemen met het oog op natuur- en landschapsherstel, zoals hermeandering van beken en vernatten van gebieden.

Kader 1-1. Voorbeelden van historische watersysteemtransities in Nederland

1.2 Systeemdynamisch modelleren van watersystemen

Om effecten van aanpassingen aan het watersysteem te onderzoeken worden in de hydrologie vaak modellen gebruikt. Dit zijn meestal ruimtelijk verdeelde, numerieke grond- of oppervlaktewatermodellen, waarin het koppelen van verschillende deelsystemen vaak niet of beperkt gebeurt (dit geldt voor veel regionale oppervlaktewater- en grondwatermodellen), of leidt tot zeer lange rekentijden (zoals bijvoorbeeld het LHM¹¹). Door de complexiteit en lange rekentijden zijn deze modellen doorgaans niet zo geschikt om de doorwerking van allerlei (combinaties van) aanpassingen in het watersysteem snel te verkennen.

Er zijn zeer veel (combinaties van) maatregelen in het watersysteem denkbaar, variërend van kleine gedragsveranderingen tot grote landgebruiksveranderingen. Voor een eerste verkenning van maatregelen kan het daarom handig zijn om eerst een grovere methode toe te passen. Eén van de mogelijkheden hiervoor is de toepassing van *systeemdynamisch modelleren*. Systeemdynamische modellen worden toegepast in het kader van *systeemdenken* (zie Hoofdstuk 2) en zijn geschikt om op een hoger abstractieniveau (dus met minder details) het (korte- en langetermijn) gedrag van verschillende deelsystemen te koppelen en daarmee interactie te onderzoeken. Het gaat hier dan vooral om de interactie tussen de patronen van de verschillende deelsystemen op vrij grove schaal, omdat de ruimtelijke variatie niet wordt meegenomen, maar wel de terugkoppeling tussen verschillende deelsystemen. Waar systeemdenken vooral van nut kan zijn voor een conceptueel begrip van de

⁴ <https://www.waterschaprivierenland.nl/romeinse-snelwegsweg>

⁵ <https://www.rijkswaterstaat.nl/over-ons/onzegeschiedenis/onzegeschiedenis>

⁶ <https://www.archeoweb.nl/pages/historische-perioden/middeleeuwen/vroege-middeleeuwen.php>

⁷ <https://www.canonvannederland.nl/nl/zuid-holland/rijnland/circa-1000-ontginning-van-het-veen>

⁸ <https://www.pwn.nl/de-geschiedenis-van-ons-drinkwater>

⁹ <https://waterbedrijfgroningen.nl/over-ons/wat-we->

[doen/#:~:text=Vanaf%201910%20werd%20gewerkt%20aan,niet%20zonder%20slag%20of%20stoot.](https://waterbedrijfgroningen.nl/over-ons/wat-we-doen/#:~:text=Vanaf%201910%20werd%20gewerkt%20aan,niet%20zonder%20slag%20of%20stoot.)

¹⁰ <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/waterkeringen/deltawerken>

¹¹ <https://www.nhi.nu/>

werking van watersystemen, bijvoorbeeld in communicatie met stakeholders en in gebiedsprocessen, kan systeemdynamisch modelleren aanvullend gebruikt worden voor een scherper (kwantitatief) inzicht in de processen, en hoe deze op elkaar inwerken.

Systeemdynamisch modelleren is in de laatste jaren in de literatuur steeds vaker toegepast voor water resource management (Phan et al., 2021), maar er zijn slechts weinig modellen die ook de hydrologische processen meenemen (Rubio-Martin et al., 2020) en op die manier het hele watersysteem in beeld kunnen brengen.

De laatste jaren worden de noodzaak van systeemdenken en het nut van systeemdynamisch modelleren van het beheer van hulpbronnen, waaronder het watersysteem, steeds meer erkend, onder andere omdat deze aanpak kan helpen voorkomen dat men teveel focust op één deelsysteem of de korte termijn, waardoor voorgestelde oplossingen uiteindelijk blijken te leiden tot negatieve effecten elders en/of op lange termijn (Turner et al., 2016).

Sinds 2018 zijn er binnen KWR diverse onderzoeken naar maatregelen in watersystemen uitgevoerd, waarin het 'watersysteemdenken' gaandeweg is ontwikkeld. Hierin hebben verschillende ontwikkelingen plaatsgevonden:

- Vanuit de focus op (vooral) het antropogene watersysteem (Pronk et al., 2021) naar ook het hydrologische watersysteem (Stofberg & Brakkee, 2022; Stofberg et al., 2022a).
- Vanuit het beschrijven van watersystemen en het voorzichtig beredeneren van effecten van maatregelen (Pronk et al., 2021) en waterbalansberekeningen van bepaalde systeemonderdelen (Stofberg et al., 2021b) naar het rekenen aan effecten en feedbackmechanismen als gevolg van maatregelen in het watersysteem. Eerst in spelvorm (van Alderen et al., 2023), waarna dit onderdeel in het voorliggende onderzoek verder is uitgediept.
- Van het benaderen van maatregelen vanuit het perspectief van de technologie (wat zijn de effecten van hergebruik?) naar meer focus op belangen en behoeften die spelen in watersystemen (Stofberg & Brakkee, 2022; Stofberg et al., 2022a).

1.3 WiCE Verbinden watersysteem en waterketen

Binnen het programma Water in de Circulaire Economie (WiCE) wordt onderzoek gedaan naar slimme oplossingen in het watersysteem. Het WiCE project 'Verbinden van waterketen en watersysteem voor een betere balans in watervraag en -aanbod'¹² richt zich op de ontwikkeling van methoden waarin verschillende (combinaties van) interventies in het watersysteem kunnen worden verkend. Dergelijke methoden kunnen gebruikt worden om een beeld te krijgen van de doorwerking van interventies, en kunnen een hulpmiddel zijn in de verkenning van mogelijk geschikte maatregelen. Wanneer interessante richtingen zijn geïdentificeerd kunnen meer gedetailleerde modellen worden ingezet om de precieze effecten voor specifieke locaties, inclusief allerlei ruimtelijke effecten, door te rekenen.

Dit rapport richt zich op het verzamelen van de bouwstenen die nodig zijn voor de ontwikkeling van deze methoden, inclusief de ontwikkeling van een 'watersysteemmodel', dat zich vooralsnog beperkt tot waterkwantiteit op regionale schaal. We geven een algemene inleiding op de concepten van systeemdynamisch modelleren en bouwstenen voor een basismodel van een regionaal watersysteem. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een overzicht van alle belangrijke stromen en voorraden van een regionale waterbalans, samengevat in een conceptueel model van het regionale watersysteem.

Voor elk onderdeel binnen het conceptuele model wordt behandeld hoe deze stromen en voorraden opgenomen kunnen worden in een systeemdynamisch model, door de belangrijkste processen en afhankelijkheden ten aanzien van andere systeemonderdelen en ruimtelijke factoren/randvoorwaarden te beschrijven en in te gaan op mogelijke toekomstige ontwikkelingen. Ook wordt ingegaan op de behoeften vanuit de mens en de maatschappij ten aanzien van het watersysteem, de zogenaamde 'criteria', zoals behoefte aan

¹² <https://www.kwrwater.nl/projecten/verbinden-van-waterketen-en-watersysteem-voor-een-betere-balans-in-watervraag-en-aanbod/>

voldoende drinkwater en de mogelijkheid zich te ontdoen van restwater. In dit rapport hebben we ons beperkt tot het onderdeel waterkwantiteit. Binnen het WiCE onderzoek wordt verder gewerkt aan waterkwaliteit, en ook zijn juridische aspecten van een aantal maatregelen in het watersysteem onder de loep genomen (Krajenbrink et al., 2022). De methodiek voor watersysteemdenken en -modelleren leent zich ervoor om steeds nieuw beschikbare kennis van verschillende onderdelen van het watersysteem in te bedden. Het is daarmee een integraal denkkader waarin kennis samen kan komen.

De kennis in dit rapport is sterk gerelateerd aan kennis uit eerdere en/of parallelle onderzoeken (Brakkee & Stofberg, 2022; Krajenbrink & Stofberg, 2021; Krajenbrink et al., 2021b; Pronk et al., 2020; Stofberg & Brakkee, 2022; van Aalderen et al., 2023), beschikbare literatuur en uit casusstudies die binnen het huidige onderzoek zijn uitgevoerd.

1.4 Leeswijzer

We beginnen met een toelichting op het concept van systeemdenken en systeemdynamisch modelleren in hoofdstuk 2. Daarna worden de bouwstenen voor een basismodel van het regionale watersysteem op een rij gezet (hoofdstuk 3). Vervolgens wordt weergegeven wat effecten zijn van veranderingen in het watersysteem op de waterbalans, zowel door veranderingen in de toekomst (hoofdstuk 4) als door menselijke interventies in het watersysteem (hoofdstuk 5). In hoofdstuk 6 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste onderdelen van een watersysteemmodel, waarna de verschillende voorbeelden van toepassingen van watersysteemmodellen worden besproken (hoofdstuk 7). Het rapport wordt afgesloten met een discussie (hoofdstuk 8) en conclusies (hoofdstuk 9).

2 Systeemdenken en systeemdynamisch modelleren

2.1 Inleiding

De wereld bestaat uit een veelheid van systemen. Denk bijvoorbeeld aan allerlei natuurlijke systemen, zoals het spijsverteringssysteem, het systeem aarde, ons zonnestelsel (*solar system* in het Engels), maar ook door mensen gecreëerde systemen, zoals het economische systeem, de organisatie van een bedrijf of de onderlinge interactie binnen een gezin. Een systeem kan gedefinieerd worden als een geheel dat meer is dan de onderdelen waaruit het bestaat, als gevolg van interactie en/of onderlinge afhankelijkheid van de onderdelen. Als men naar de wereld kijkt door de bril van het *systeemdenken*, dan worden systemen beschreven aan de hand van (Arnold & Wade, 2015):

- Het algehele doel of de functie van een systeem
- De afzonderlijke onderdelen
- De onderlinge verbanden

Arnold & Wade (2015) definiëren systeemdenken als volgt:

“Systems thinking is a set of synergistic analytic skills used to improve the capability of identifying and understanding systems, predicting their behaviors, and devising modifications to them in order to produce desired effects. These skills work together as a system.”

Binnen het onderzoek op het gebied van systeemdenken kunnen de volgende onderdelen aan de orde komen (Arnold & Wade, 2015):

- Herkennen van verbanden
- Identificeren en begrijpen van *feedback* (terugkoppeling)
- Begrijpen van systeemstructuur
- Onderscheiden van *stocks* (voorraden), *flows* (stromen) en variabelen
- Identificeren en begrijpen van niet-lineaire verbanden
- Begrijpen van dynamisch gedrag
- Reduceren van complexiteit door conceptueel modelleren
- Begrijpen van systemen op verschillende schalen

De systeemdynamica is het onderdeel van het systeemdenken waarin dynamische systemen worden onderzocht en gemodelleerd, vaak met behulp van software die voor dit doel is ontwikkeld. Systeemdynamische modellen kunnen worden gebruikt om systemen beter te begrijpen, om gedrag te voorspellen of om oplossingen voor vraagstukken te onderzoeken. De methode wordt ingezet voor bijvoorbeeld onderzoek naar ecologische (populatie)dynamica) en economische systemen (geldstromen).

Systeemdynamisch modelleren bestaat uit verschillende stappen (Martinez-Moyano & Richardson, 2013):

- Probleemidentificatie en definitie
- Systeemconceptualisatie
- Modelontwikkeling
- Testen en evalueren van het model
- Gebruik, implementatie en disseminatie
- Ontwerp van leerstrategie/infrastructuur

2.2 Systeemdynamisch modelleren van het watersysteem

Binnen de hydrologie wordt veel met modellen gewerkt. In de meeste gevallen zijn dit modellen van grond- of oppervlaktewater waarin gebruik wordt gemaakt van partiële differentiaalvergelijkingen die numeriek worden opgelost om verschillen in ruimte (en vaak ook tijd) binnen een deelsysteem te onderzoeken. Deze modellen hebben als voordeel dat ze fysische processen in ruimte en tijd in detail kunnen nabootsen en als nadeel dat het veel rekentijd kan kosten om het gedrag van relatief grote systemen te simuleren. Soms worden bij dit soort modelstudies verschillende deelsystemen gekoppeld (bijvoorbeeld grond- en oppervlaktewater) maar dit is niet altijd eenvoudig omdat de dynamiek van deze deelsystemen op verschillende tijdschalen plaatsvindt. Ook blijkt de parameterisatie van de modellen vaak niet eenvoudig.

Systeemdynamische modellen zijn geschikt om op een hoger abstractieniveau (dus met minder details) het gedrag van verschillende deelsystemen te koppelen en daarmee interactie te onderzoeken. Systeemdynamische modellen maken gebruik van gewone (*ordinary*) differentiaalvergelijkingen en zijn daarmee niet geschikt om ruimtelijke verschillen binnen een (deel)systeem te onderzoeken. Doordat het gedrag van een deelsysteem wordt beschreven met één of enkele differentiaalvergelijkingen kost het relatief weinig rekentijd om een simulatie door te rekenen en wordt het mogelijk om uitgebreide gevoeligheidsanalyses uit te voeren om het gedrag van het systeem beter te leren begrijpen. Het gaat hier dan vooral om de interactie tussen de patronen van de verschillende deelsystemen op vrij grove schaal, omdat interne details niet worden meegenomen, maar wel de terugkoppeling tussen verschillende deelsystemen. Dit is vooral interessant als er sprake is van niet-lineair gedrag in één of meerdere deelsystemen, waardoor het gedrag voor de menselijke intuïtie minder eenvoudig te voorspellen is. Systeemdynamische modellen kunnen daarom gebruikt worden om systemen op strategisch niveau beter te begrijpen. Door de beperkte rekentijd kunnen snel veel verschillende scenario's doorgerekend worden. Systeemdynamische modellen bieden bovendien de mogelijkheid om een model van het watersysteem uit te breiden naar een meer holistisch model, waarin bijvoorbeeld ook economische of maatschappelijke processen en randvoorwaarden meegenomen kunnen worden die invloed hebben op het watersysteem.

De laatste jaren worden de noodzaak van systeemdenken en het nut van systeemdynamisch modelleren van het beheer van hulpbronnen, waaronder het watersysteem, steeds meer erkend. Onder andere omdat deze aanpak kan helpen voorkomen dat men teveel focust op één deelsysteem of de korte termijn, waardoor voorgestelde oplossingen uiteindelijk blijken te leiden tot negatieve effecten elders en/of op lange termijn (Turner et al., 2016). Systeemdynamisch modelleren is in de laatste jaren in de literatuur steeds vaker toegepast voor water resource management (Phan et al., 2021), maar er zijn slechts weinig modellen die ook de hydrologische processen meenemen (Rubio-Martin et al., 2020) en op die manier het hele watersysteem in beeld kunnen brengen. Modellen die dit wel doen, worden bijvoorbeeld gebruikt voor strategieën rondom droogte in het waterbeheer (Wendt et al., 2021).

2.3 Conceptueel model als basis voor een systeemdynamisch model

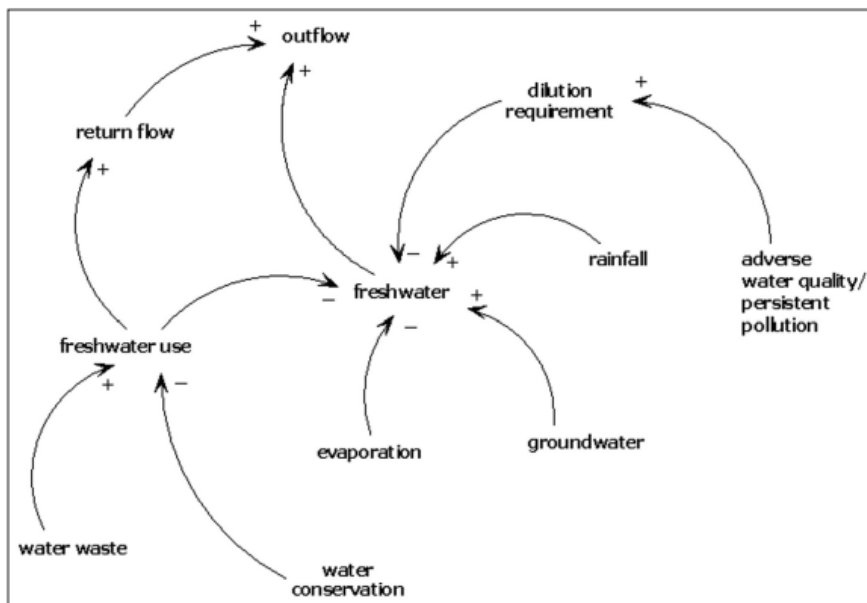
In deze paragraaf wordt de nadruk gelegd op het ontwikkelen van een conceptueel model als basis voor een systeemdynamisch model. Voor een uitgebreider stappenplan van de ontwikkeling van een conceptueel model wordt verwezen naar Krajenbrink et al. (2021a). In deze paragraaf worden aanvullende stappen benoemd die nodig zijn om vervolgens een systeemdynamisch model te maken. Hierbij kan vanaf het begin gebruik gemaakt worden van software die bedoeld is om systeemdynamische modellen in te ontwikkelen en simulaties te draaien, zoals bijvoorbeeld Vensim (Ventana Systems Inc.) of Stella (ISEE Systems). Ook is het mogelijk om met scripts in R, Python of Matlab dergelijke modellen te maken.

Wanneer een systeem onderzocht wordt, is het zaak om de systeemonderdelen en onderlinge verbanden/connecties te identificeren. Hiervoor worden vaak de termen knooppunt (*node*) en connectie (*link*)

gebruikt. In het geval van een regionaal watersysteem kan bijvoorbeeld het grondwater een knooppunt vormen, dat een connectie heeft met het oppervlaktewater (ook een knooppunt).

In de ontwikkeling van een conceptueel model wordt vervolgens een *causal loop* diagram (Figuur 2-1) gemaakt. Een dergelijk diagram geeft met pijlen weer hoe verschillende systeemonderdelen elkaar beïnvloeden, waarbij tevens door aanduiding van '+' of '-' aangegeven wordt of ze elkaar positief of negatief beïnvloeden. Voor het regionale watersysteem kan dit betekenen dat er een positieve relatie is tussen het grondwater en het oppervlaktewater (een hogere grondwaterstand zal doorgaans leiden tot meer oppervlaktewaterafvoer).

De volgende stap is om de systeemonderdelen aan te duiden als *stocks*, *flows* en variabelen. *Stocks* zijn voorraden die op een bepaald moment in de tijd een bepaalde waarde kunnen hebben. Het grondwater is hier een goed voorbeeld van. *Flows* zijn de stromen van en naar *stocks*. De waarde van een *flow* kan alleen bepaald worden over een bepaalde tijdsduur. Zo meten we neerslag bijvoorbeeld in mm per dag. Variabelen zijn de overige modelonderdelen die niet direct een *stock* of een *flow* representeren, maar wel benodigd zijn om het systeem te begrijpen, zoals bijvoorbeeld randvoorwaarden, systeemeigenschappen, constanten, etc. Alle *stocks* en *flows* binnen een systeem kunnen weergegeven worden in een *stock and flow* diagram (Figuur 2-2). Zowel *causal loop* diagrammen als *stock and flow* diagrammen kunnen in software voor systeemdynamisch modelleren worden ingevoerd.



Figuur 2-1. Causal loop diagram (Simonovic & Rajasekaram, 2004).

Door bepaalde (groepen van) parameters op een slimme manier te variëren kan (op een meer gerichte manier) onderzocht worden hoe het systeem verandert wanneer het andere eigenschappen heeft op bijvoorbeeld een andere locatie.

Naast een standaard gevoeligheidsanalyse waarmee het effect van onzekerheden verkend kan worden, is een gevoeligheidsanalyse voor regionale systeemmodellen een middel om verkennend onderzoek te doen naar verschillende typen locaties. Hierbij kan uitgegaan worden van een model van een 'typisch' landschap zoals een polder of een vrij afwaterend stroomgebied. In Nederland zijn er bijvoorbeeld veel polders die vergelijkbaar werken als het gaat om waterbeheer, maar onderling verschillen in bijvoorbeeld oppervlak, landgebruik, mate van ontwatering, kweldruk etc. Door de bijbehorende parameters te variëren wordt inzicht verkregen in de (combinaties van) factoren die bijdragen aan bepaald systeemgedrag.

2.5.2 Scenario's - randvoorwaarden

Naast het veranderen van de interne systeemeigenschappen kunnen ook de randvoorwaarden veranderen. Hierbij kan gedacht worden aan de effecten van het weer/klimaat, maar ook aan variaties in de beschikbaarheid van externe aanvoer.

De randvoorwaarden voor regionale watersysteemmodellen bestaan uit gegevens van het weer/klimaat, de (mogelijkheden tot) aanvoer en afvoer van grond- en oppervlaktewater en eventuele overige aan- of afvoer via buizen/leidingen.

Door deze randvoorwaarden te wijzigen kunnen verschillende scenario's gesimuleerd worden. Voor regionale watersystemen kan het interessant zijn om de gevolgen van mogelijke klimaatveranderingen door te rekenen.

2.5.3 Interventies

Daarnaast kunnen er aanpassingen gedaan worden aan het model die maatregelen in het systeem representeren om te verkennen welk effect deze maatregelen zouden kunnen hebben.

Om een watersysteem beter aan bepaalde wensen of behoeften te laten voldoen, kunnen ingrepen in het watersysteem toegepast worden. Maatregelen of interventies in het watersysteem betreffen doorgaans een (combinatie) van deze ingrepen: zuivering, berging en transport. Tussen interventies kunnen grote verschillen zijn, afhankelijk van de eigenschappen van de systeemcomponent(en) en de schaal waarop ze worden toegepast.

2.5.4 Interactie tussen landschapseigenschappen, randvoorwaarden en interventies

Door simulaties met variaties in landschapseigenschappen, randvoorwaarden en het al dan niet toepassen van interventies slim te combineren, kan onderzocht worden in welke typen systemen bepaalde (combinaties van) interventies interessant zijn en hoe robuust deze zijn in een veranderend klimaat en veranderende omstandigheden.

3 Waterkwantiteit in het regionale watersysteem: modelbouwstenen

3.1 Inleiding

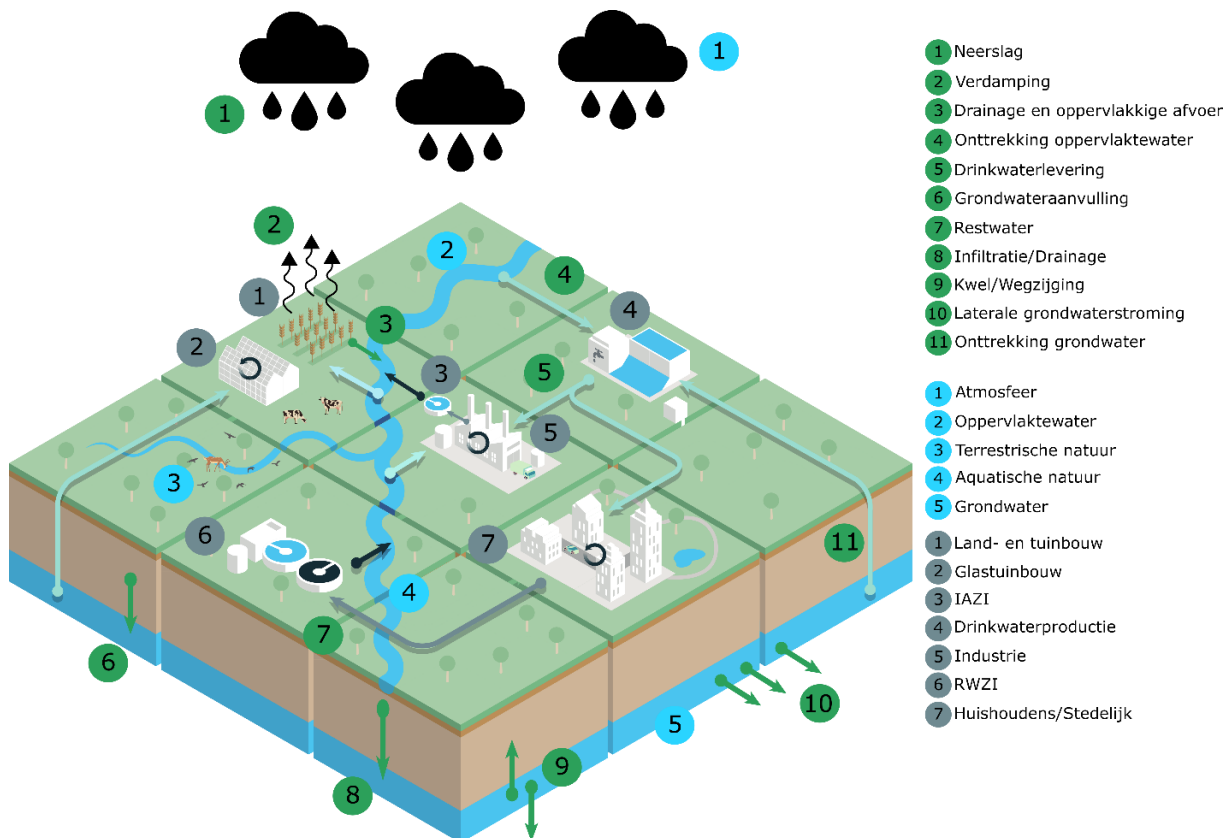
Om het regionale watersysteem te begrijpen is het belangrijk om een overzicht te hebben van de belangrijkste stromen en componenten van de waterbalans op dit schaalniveau. Het gaat hierbij zowel om het *hydrologische* als het *antropogene* watersysteem. Het hydrologische watersysteem bevat waterstromen die door natuurlijke processen worden gestuurd (hoewel de mens ze wel sterk beïnvloed kan hebben) en het antropogene watersysteem bevat waterstromen die door de mens worden gestuurd en zonder de mens niet zouden hebben plaatsgevonden.

Voor Nederland kunnen twee typische landschappen worden onderscheiden wat betreft het type oppervlaktewater: vrij afwaterend oppervlaktewater waarbij afvoer via natuurlijk verval plaatsvindt en beheerd oppervlaktewater (polders, boezems, kanalen) waarbij het oppervlaktewaterpeil actief gestuurd wordt. In Figuur 3-1 is een regionaal watersysteem conceptueel weergegeven met de belangrijkste stromen, hydrologische componenten en antropogene componenten. Het betreft hier componenten en waterstromen die relatief groot zijn, en daarmee een eerste aanzet vormen voor de beschouwing van het kwantitatieve aspect van watersystemen vanuit het systeemdenken.

Uit eerder onderzoek is echter gebleken dat diverse onderdelen (systeemcomponenten en processen) van regionale systeemmodellen regelmatig terugkomen in verschillende typen modellen. Op basis van deze onderzoeken (Krajenbrink et al., 2021a; Pronk et al., 2021; Stofberg et al., 2022a), lopend onderzoek binnen *BTO/WiCE 'Aqua ludens: ontwikkeling instrumentarium watertransitie'*, alsmede werk binnen dit project (zie Hoofdstuk 6), zijn modellen samengesteld voor regionale watersystemen in Nederland en Vlaanderen.

In dit hoofdstuk behandelen we voor de verschillende componenten van het watersysteem verschillende aspecten met betrekking tot de waterkwantiteit, waarna deze onderdelen worden samengevat als 'basis ingrediënten' voor watersysteemmodellen.

- De behoeften (criteria) vanuit de mens (individuen, samenleving, bedrijven, etc.) ten aanzien van deze systeemcomponent
- De inkomende stromen naar dit systeemcomponent en de belangrijkste factoren waar deze vanaf hangen
- De uitgaande stromen naar dit systeemcomponent en de belangrijkste factoren waar deze vanaf hangen
- Voorraadvorming of berging (of de mogelijkheid daartoe) met betrekking tot de betreffende systeemcomponent



Figuur 3-1. Voorbeeld van een conceptueel model van het watersysteem met stromingen (groene stippen), hydrologische componenten (lichtblauwe stippen) en antropogene componenten (grijze stippen)

3.2 Hydrologische componenten

Atmosfeer (1)

Vanuit het watersysteem gezien is de atmosfeer een randvoorwaarde, waarbij de stromen van en naar het watersysteem van belang zijn. Eventuele voorraadvorming (vocht in de atmosfeer) wordt daarom niet beschouwd.

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

Behoeften van mensen ten aanzien van waterstromen van en naar de atmosfeer zijn altijd gerelateerd aan het landgebruik en worden bij de betreffende onderdelen beschreven.

Stromen IN - eigenschappen/huidige situatie

De **verdamping** kan worden gezien als een inkomende stroom voor de atmosfeer. De referentieverdamping is een maat voor de potentiële verdamping van een (hypothetisch) grasland dat goed van vocht is voorzien. De Makkink-referentieverdamping in Nederland is gemiddeld ongeveer 581 mm/jaar (De Bilt, 1991-2020). Verdamping vertoont een sterk seizoenspatroon met de hoogste waarden in juli (98 mm/mnd) en laagste waarden in december (6.5 mm/mnd). Er is een grote variatie mogelijk tussen jaren. De actuele (of werkelijke) verdamping is sterk afhankelijk is van het bodemgebruik, waarbij hoge waarden gelden voor open water en 'groene' oppervlakken die van voldoende water zijn voorzien, en lage waarden voor verharde oppervlakken en vegetatie die onvoldoende van water is voorzien.

Stromen UIT - eigenschappen/huidige situatie

Neerslag kan worden gezien als een uitgaande stroom voor de atmosfeer. De neerslag in Nederland is gemiddeld ongeveer 855 mm/jaar (De Bilt, 1991-2020). De hoeveelheid varieert sterk tussen jaren van 576 mm/jaar tot 1240 mm/jaar (De Bilt, 1991-2020). Er is sprake van een seizoenspatroon, over het algemeen is neerslag het laagst in april (42 mm/mnd) en het hoogst in juli tot december (78-85 mm). Dit kan per locatie verschillen.

Oppervlaktewater (2)

Het oppervlaktewater is een van de belangrijkste componenten van Nederlandse watersystemen. We onderscheiden twee basisvormen van oppervlaktewateren: relatief kunstmatige oppervlaktewateren waarin het peil (min of meer) beheerd wordt en meer natuurlijke oppervlaktewateren met relatief veel natuurlijke afwatering. Het onderscheid wordt hier vooral gemaakt om de belangrijkste processen te onderscheiden, in de praktijk zijn er allerlei tussenvormen mogelijk.

Beheerd oppervlaktewater (polderwateren, boezems, kanalen) (2)

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

Behoeften ten aanzien van het oppervlaktewater zijn gerelateerd aan verschillende dimensies, met name kwantiteit (niet te veel en niet te weinig) en kwaliteit (voldoende schoon) van het water. In veel gevallen is er sprake van een streefpeil: een gewenst waterniveau dat gunstig is voor bijvoorbeeld scheepvaart, dijkbeheer of landgebruik (handhaving grondwaterstand). Er worden soms eisen gesteld aan de minimale afvoer, bijvoorbeeld van wateren die naar zee voeren, om verzilting te voorkomen. Aan de andere kant mag het peil ook niet te hoog worden om wateroverlast te voorkomen. Het niveau van de watergangen wordt actief gestuurd via peilbeheer. Voor handhaving van een goede waterkwaliteit in het watersysteem kan doorspoeling (een kwantiteitsmaatregel) nodig zijn. Kwantiteit is derhalve niet zeer strikt te scheiden van kwaliteit.

Stromen IN - eigenschappen/huidige situatie

Alle oppervlaktewateren kunnen passief gevoed worden door rechtstreekse **neerslag**, afstromende neerslag (**oppervlakkige afvoer**), afvoer van andere oppervlaktewateren en vanuit het grondwater (**drainage**). Het kan echter nodig zijn om daarnaast actief water aan te voeren, bijvoorbeeld voor peilbeheer voor de landbouw of de scheepvaart, en voor kwaliteitsbeheer (doorspoeling). Daarnaast vinden er lozingen van **restwater** op het oppervlaktewater plaats.

Stromen UIT – eigenschappen/huidige situatie

Het meeste water verlaat poldersystemen via bemaling, dat op basis van een streefpeil (en eventueel op basis van verwachte neerslag) plaatsvindt. Afhankelijk van de relatie met het grondwater kan **infiltratie** uit het oppervlaktewater naar het grondwater plaatsvinden. De relatie met het grondwater is afhankelijk van de locatie van het oppervlaktewater. Er wordt voor verschillende toepassingen water **onttrokken** aan het oppervlaktewater, bijvoorbeeld voor irrigatie, drinkwater en industriële toepassingen. Water kan ook rechtstreeks uit het oppervlaktewater **verdampen**.

Voorraadvorming of berging

De hoeveelheid oppervlaktewater wordt doorgaans weergegeven als het waterpeil, dat in theorie kan variëren tussen 0 en het maximumvolume van de waterlopen (daarboven vindt inundatie plaats). In de praktijk varieert het peil afhankelijk van het neerslagoverschot en bemaling en kunnen verschillende streefpeilen per seizoen worden gehanteerd.

Vrij afwaterend oppervlaktewater (2)

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

Bij vrij afwaterende systemen worden ook eisen gesteld aan de kwantiteit en de kwaliteit. In deze systemen is er minder sturing van de peilen mogelijk en vindt geen doorspoeling plaats. Te lage peilen/afvoeren zijn ongewenst omdat ecosystemen hieronder kunnen lijden en kunnen geassocieerd worden met een slechte kwaliteit door een hoog aandeel effluent. Ook kunnen lage peilen leiden tot tekorten voor bijvoorbeeld beregening van landbouwpercelen. Te veel water kan leiden tot wateroverlast, voor zover mogelijk wordt daarom gestuurd op waterafvoer onder natte condities.

Stromen IN – eigenschappen/huidige situatie

Alle oppervlaktewateren kunnen passief gevoed worden door rechtstreekse **neerslag**, afstromende neerslag (**oppervlakkige afvoer**), afvoer van andere oppervlaktewateren en vanuit het grondwater (**drainage**). Daarnaast vinden er lozingen van **restwater** op het oppervlaktewater plaats.

Stromen UIT – eigenschappen/huidige situatie

Het grootste deel van het oppervlaktewater verlaat via **afvoer** het gebied. De afvoer is afhankelijk van het peil en de eigenschappen van de waterlopen (zoals verhang en weerstand). Afhankelijk van de relatie met het grondwater kan **infiltratie** uit het oppervlaktewater naar het grondwater plaatsvinden. De relatie met het grondwater is afhankelijk van de locatie van het oppervlaktewater. Er wordt voor verschillende toepassingen water **onttrokken** aan het oppervlaktewater, bijvoorbeeld voor irrigatie, drinkwater en industriële toepassingen. Water kan ook rechtstreeks uit het oppervlaktewater **verdampen**.

Voorraadvorming of berging

Ook voor vrij afwaterende systemen geldt dat de variatie in de hoeveelheid oppervlaktewater sterk afhankelijk is van het (recente) neerslagoverschot. Over het algemeen is de hoeveelheid het hoogst in winter en laagst in zomer. De temporele variatie is afhankelijk van het weer, locatie, geologie, grootte van het stroomgebied, drooglegging, verharding in het stroomgebied, etc.

Terrestrische natuur (3)

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

De vereisten aan het watersysteem zijn afhankelijk van het type natuur, en kunnen diverse vormen aannemen zoals temporele variatie in grondwaterstanden, kwelfluxen en hoeveelheid benodigd water.

Grondwateronafhankelijke terrestrische natuur is alleen afhankelijk van neerslag, terwijl 'natte' terrestrische natuur afhankelijk is van neerslag, grondwaterstanden, kwelfluxen en/of oppervlaktewaterpeilen. Het is belangrijk dat er voldoende water beschikbaar is voor de vegetatie, maar te natte omstandigheden kunnen ook tot schade aan de vegetatie leiden (behalve bij moerasachtige vegetatie). Grondwaterafhankelijke terrestrische natuur stelt dan ook specifieke eisen aan de standplaats.

Stromen IN - eigenschappen/huidige situatie

De natuur ontvangt water via de **neerslag**, via grondwater als **kwel** optreedt en via **infiltratie** vanuit het oppervlaktewater. De hoeveelheden van deze afzonderlijke stromen zijn sterk afhankelijk van de locatie van het gebied en de geohydrologische eigenschappen.

Stromen UIT - eigenschappen/huidige situatie

De uitgaande stroom rechtstreeks uit de vegetatie bestaat uit **verdamping** en is afhankelijk van het type natuur. Daarnaast kan het gebied water verliezen via **wegzijging** naar de ondergrond en **drainage** naar het oppervlaktewater.

Voorraadvorming of berging

Water is beschikbaar in de onverzadigde zone (opneembaar in de wortelzone) en wordt gekwantificeerd in de vorm van (beschikbaar) bodemvocht. De (voor planten) beschikbare voorraad is doorgaans relatief beperkt en kan over de tijd relatief snel variëren.

Aquatische natuur (4)

Aquatische natuur bevindt zich in het oppervlaktewater, als zodanig worden de waterstromen en voorraden reeds behandeld in dat onderdeel.

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

De aquatische natuur kan afhankelijk zijn van een bepaalde minimale afvoer of bepaald niveau van het oppervlaktewater. Vanwege de afhankelijkheid van oppervlaktewater zijn de stromen IN en UIT gelijk aan de stromen genoemd bij het oppervlaktewater (2) (beheerd en vrij afwaterend, afhankelijk van de locatie van de natuur).

Grondwater (5)

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

Er zijn verschillende sectoren afhankelijk van het grondwater als waterbron, waaronder natuur, landbouw, drinkwatervoorziening en industrie. Daarnaast spelen grondwaterstanden een rol bij het in stand houden van maaiveldhoogte; dalende grondwaterstanden kunnen leiden tot verzakkingen van de grond, huizen etc. Wortelzones kunnen van water worden voorzien vanuit het grondwater. Te hoge grondwaterstanden kunnen anderszinds leiden tot overlast of een gebrek aan zuurstof in wortelzones.

Stromen IN - eigenschappen/huidige situatie

Water komt in het grondwater terecht via de onverzadigde zone (**grondwateraanvulling**). Deze hoeveelheid is afhankelijk van neerslag en verdamping. Er kunnen ook verschuivingen binnen het grondwatersysteem plaatsvinden, waarbij **kwel** een instroom in het ondiepe grondwater is vanuit het diepere grondwater. Er vindt ook **laterale grondwaterstroming** plaats. De instroom vanuit deze regionale stroming is sterk afhankelijk van de locatie van een gebied. De temporele variatie van deze regionale stroming vindt plaats op grote schaal (seizoen, jaar). Er is ook sprake van interactie tussen het oppervlaktewater en grondwater. **Infiltratie** vanuit het oppervlaktewater kan plaatsvinden afhankelijk van de locatie. De temporele variatie van de interactie met oppervlaktewater en de onverzadigde zone vindt plaats op kleinere tijdschaal. Er kan actief water geïnfiltreerd worden in het grondwater, bijvoorbeeld via 'managed aquifer recharge' (MAR).

Stromen UIT - eigenschappen/huidige situatie

De uitstroom uit grondwater is sterk gerelateerd aan de inkomende stroom. Er vindt **laterale grondwaterstroming** plaats. Vanuit het ondiepe grondwater kan **wegzijging** plaatsvinden naar het diepere grondwater, wat gezien kan worden als een uitstroom voor het ondiepe grondwater. Bij de interactie met het oppervlaktewater kan **drainage** plaatsvinden, afhankelijk van de locatie. Daarnaast zijn er verschillende sectoren die grondwater **onttrekken** (landbouw, drinkwatervoorziening, industrie). Via capillaire nalevering kunnen wortelzones/onverzadigde zones in geval van droogte worden voorzien van water.

Voorraadvorming of berging

De ondergrond is potentieel een zeer groot reservoir voor de berging van water. In de Nederlandse situatie zijn er grote grondwatervoorraden. De variatie over de tijd wordt gereflecteerd in de variatie in grondwaterstand en stijghoogte over de tijd.

3.3 Antropogene componenten

Land- en tuinbouw (grondgebonden) (1)

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

In de land- en tuinbouwsector worden gewassen verbouwd en wordt vee gehouden door agrarische ondernemers. In dit rapport ligt de nadruk op de teelt van gewassen. Voor de stakeholders is het van belang dat de teelt een goede oogst oplevert. De watervraag is sterk seizoensgebonden; hoogste in zomer; vrijwel nihil in winter. De totale watervraag van een gewas wordt doorgaans gekwantificeerd door de potentiële evapotranspiratie (PET), die wordt bepaald door de referentieverdamping vermenigvuldigd met een gewasfactor die per gewas en over de tijd varieert. Daarnaast kan er een aanvullende watervraag zijn voor bepaalde gewassen en omstandigheden, zoals beneveling van fruitbomen bij nachtvorst. De watervraag is diffuus en geldt voor de landoppervlakken waarop grondgebonden land- en tuinbouw plaatsvindt.

Hoewel met berging in de bodem droge perioden overbrugd worden, moet de bodem niet te nat worden omdat dit natschade kan veroorzaken voor het gewas (door tekort aan zuurstof, of een te koude bodem). Optimale waarden verschillen per gewas. Voor droogtestress wordt deze veelal uitgedrukt in een range van zuigspanning van de bodem (waarbij droogtestress begint tot aan het permanente verwelkingspunt (Feddes et al., 1978)) en voor zuurstofstress in minimale gasgevulde porositeit (Bartholomeus et al., 2008). Voor bepaalde perioden in het jaar is het tevens van belang dat de bodem niet te nat is, in verband met de berijdbaarheid van de grond met landbouwmachines.

Stromen IN – eigenschappen/huidige situatie

Neerslag vormt de belangrijkste watervoorziening voor de landbouw. Daarnaast kan in gebieden met ondiepe grondwaterstanden ook grondwater worden aangevoerd naar de wortelzone, middels capillaire opstijging. Indien er tekorten optreden kan worden aangevuld door middel van irrigatie met **grondwater- of oppervlaktewateronttrekkingen**. Deze vinden met name plaats tijdens droge en/of warme omstandigheden, wanneer het gewas veel water nodig heeft en er weinig voorhanden is. Op deze momenten kunnen hoge piekvragen voorkomen. Verschillende manieren van irrigatie worden toegepast: beregening, druppelirrigatie, subirrigatie, etc. Verliezen zijn afhankelijk van de methode, toepassing en lokale omstandigheden. **Drinkwater** dat geleverd wordt aan de landbouw wordt meestal niet ingezet voor gewassen maar vaker voor vee.

Stromen UIT – eigenschappen/huidige situatie

Water dat wordt opgenomen door planten verdwijnt grotendeels naar de atmosfeer via de actuele **transpiratie**. Daarnaast verdampt er water direct uit de bodem en van interceptiewater. Het totaal van transpiratie, bodemverdamping en interceptieverdamping is de actuele **verdamping**. Overtollig water percoleert naar het grondwater, waar het via **drainage** tot afvoer kan komen of verder het diepere grondwater in stroomt (**wegzijging**).

Drainagesystemen zorgen voor een versnelde afvoer van grondwater naar het lokale oppervlaktewater en zijn bedoeld om te hoge grondwaterstanden te voorkomen. Tijdens piekbuien kan **oppervlakkige afvoer** over het maaiveld voorkomen. Bij (overtollige) bovengrondse beregening verdampt een deel direct, stroomt af naar oppervlaktewater, of het deel dat in de wortelzone komt en niet wordt opgenomen door het gewas percoleert naar het grondwater.

Vorraadvorming of berging

De wortelzone bevat water dat door planten kan worden opgenomen. De mogelijke voorraad in deze zone is relatief beperkt en de beschikbaarheid van vocht kan over de tijd sterk variëren.

Glastuinbouw (2)

De glastuinbouw is een vorm van landbouw, waarbij er sprake is van verharding, glazen kasdekken en vaak ook van niet-grondgebonden teelt. Hierdoor wijken de waterstromen sterk af van andere vormen van landbouw.

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

In de glastuinbouw worden gewassen geteeld in kassen. Dit kan in de volle grond zijn of op substraat. Voor de teelt is voldoende gietwater nodig voor de gewassen. De gietwatervraag is afhankelijk van het geteelde gewas, en kan variëren over het jaar. De gietwatervraag kan een ordegrrootte aannemen van 800-900 mm/j, ofwel 8000-9000 m³/ha/j voor groenteteelt, terwijl potplanten zoals orchideeën een lagere watervraag hebben (ordegrrootte 200-300 mm/j, ofwel 2000-3000 m³/ha/j) (Appelman et al., 2013). Door interne recirculatie van het gietwater neemt de kwaliteit van het water af. Bij onvoldoende waterkwaliteit wordt het recirculatiewater geloosd.

Stromen IN - eigenschappen/huidige situatie

In de glastuinbouw wordt doorgaans **neerslag** opgevangen en opgeslagen in bassins of silo's om te gebruiken als gietwater. Afhankelijk van de beschikbare neerslag, de omvang van de reservoirs en de watervraag van de betreffende teelt kan er aanvullend gietwater nodig zijn (via **drinkwater, onttrekking grondwater** of **onttrekking oppervlaktewater**). De (aanvullende) gietwatervraag is vaak seizoensgebonden: hoogst in zomer, laagst in winter. De vraag hangt sterk af van type teelt en eventuele belichting (waardoor de watervraag in de winter groter kan zijn). Glastuinbouw is iets minder direct afhankelijk van weersomstandigheden dan grondgebonden land-/tuinbouw door de buffers (gietwaterreservoirs), belichting en recirculatie van het water.

Stromen UIT - eigenschappen/huidige situatie

Een groot deel van het gebruikte water verdwijnt naar de atmosfeer via **verdamping** of komt terecht in het product. Wanneer bij recirculatie de stofconcentraties (met name van natrium) in het gietwater te hoog worden, wordt het als **restwater** geloosd. Dit verloopt al dan niet via een eigen zuivering of RWZI en komt uiteindelijk op

het oppervlaktewater terecht. Indien aanvullend gietwater gezuiverd moet worden (zoals bijvoorbeeld het geval is bij brak grondwater) zal er sprake zijn van een aanvullende reststroom bestaande uit concentraat, wat ook geloosd moet worden (bijvoorbeeld in de diepere ondergrond). In natte perioden kan overstort van hemelwater plaatsvinden wanneer de hemelwaterreservoirs vol zijn.

Voorraadvorming of berging

In de glastuinbouw worden gietwaterreservoirs gebruikt om het opgevangen hemelwater en aanvullend gietwater te bergen. Deze hebben een omvang in de ordegrootte van enkele honderden tot duizenden m³ per hectare (Stofberg et al., 2021b).

IAZI (3)

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

Via een industriële afvalwaterzuivering (IAZI) wordt het restwater vanuit industrie gezuiverd. Deze systeemcomponent is met name belangrijk als het gaat om waterkwaliteit en heeft vrijwel geen gevolgen met betrekking tot waterkwantiteit. De aangevoerde hoeveelheid water is afhankelijk van het type industrie, het kan hierbij gaan over één fabriek of een combinatie van verschillende bedrijven. Ook de variatie door de tijd hangt af van het type industrie, dit kan seizoensgebonden zijn.

Stromen IN - eigenschappen/huidige situatie

De aanvoer voor een IAZI bestaat uit **restwater** van industrie. De aangevoerde hoeveelheid water (grootte en variatie in de tijd) wordt bepaald door het type industrie. De IAZI zal een bepaalde capaciteit hebben, bij overschrijding zal het zuiveringsproces niet (goed) meer doorlopen kunnen worden.

Stromen UIT - eigenschappen/huidige situatie

Na zuivering wordt het **restwater** geloosd op oppervlaktewater. De uitgaande stroom restwater is gelijk aan de aangevoerde hoeveelheid water, zowel in volume als in variatie door de tijd.

Voorraadvorming of berging

Hoewel er zich een zekere hoeveelheid water in een IAZI kan bevinden, gaat het vooral om een doorlopend proces en is er niet direct sprake van (aanmerkelijke) voorraadvorming of berging.

Drinkwaterproductie (4)

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

In Nederland wordt drinkwater geproduceerd uit grond- en oppervlaktewater (variëaties daarop zijn duininfiltratie en oevergrondwater). De ingaande hoeveelheid water moet voldoende zijn om aan de drinkwatervraag te voldoen. Daarbij is niet alleen de waterkwantiteit bepalend, maar ook de waterkwaliteit. Als de waterkwaliteit verslechtert, kunnen innamestops voorkomen. Drinkwaterbedrijven moeten dan tijdelijk op een andere bron overstappen of op hun reservevoorraad. Hoewel drinkwaterbedrijven aan vergunningseisen moeten voldoen, wordt de leveringszekerheid van drinkwater van groter belang geacht. In droge situaties kan het daardoor voorkomen dat meer grondwater onttrokken wordt dan de vergunningseis.

De benodigde hoeveelheid water voor drinkwaterproductie is groter dan de drinkwatervraag wegens productie- en transportverliezen. De watervraag is licht seizoensgebonden: iets hoger in de zomer dan in de winter (Vewin, 2022), waarbij er een verband vermoed wordt tussen temperatuur/mate van droogte en de drinkwatervraag (groter verschil in 2018 dan in eerdere jaren).

De omvang van de drinkwatervraag is afhankelijk van de afnemers van drinkwater in een bepaald gebied (o.a. inwoners, component zakelijk/industrie), waarbij er met betrekking tot huishoudens sprake is van een leveringsverplichting.

Stromen IN - eigenschappen/huidige situatie

Voor de productie van drinkwater vinden **onttrekkingen uit grondwater en oppervlaktewater** plaats. De bron voor drinkwater is afhankelijk van de winlocatie, zo wordt in hoog Nederland veel grondwater gebruikt voor

drinkwaterproductie en in laag Nederland veel oppervlaktewater en duinfiltratie (een vorm van MAR, zoals genoemd bij het onderdeel grondwater).

Stromen UIT - eigenschappen/huidige situatie

Er zijn verschillende uitgaande stromen, zoals te **leveren drinkwater** (grootst) aan huishoudens, bedrijven en industrie en productieverliezen die ontstaan bij de drinkwaterproductie. Bij het transport en de distributie van drinkwater vinden overigens ook lekverliezen en andere verliezen (het 'niet in rekening gebracht gebruik' (nirg) waar bijvoorbeeld ook bluswater onder valt) plaats (Vewin, 2022).

Voorraadvorming of berging

Drinkwaterbedrijven hebben reinwaterreservoirs waarmee schommelingen in watervraag gedurende de dag worden opgevangen. Ten opzichte van de totale watervraag zijn deze relatief klein.

Industrie (5)

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

Verschillende industrieën hebben een watervraag voor hun processen of als koelwater. De omvang van de watervraag is afhankelijk van het type industrie. Voor veel industrieën is de watervraag relatief constant door het jaar heen (geen seizoenspatroon), behalve voor industrieën die seizoensproducten verwerken (bijvoorbeeld suikerfabrieken). Er zijn verschillende typen toepassing van water binnen de industrie. Water kan gebruikt worden voor menselijke consumptie (voedselproductie), als proceswater of als koelwater. Het type gebruik heeft invloed op de gewenste bron die gebruikt wordt (bijvoorbeeld vanwege de kwaliteit of om juridische redenen, hier niet verder beschouwd).

Stromen IN - eigenschappen/huidige situatie

Afhankelijk van het type toepassing in de industrie worden verschillende bronnen gebruikt. Er kan gebruik gemaakt worden van **drinkwater** of de industrie kan zelf rechtstreeks water **onttrekken uit grond- of oppervlaktewater**. Daarnaast kan ook zeewater gebruikt worden.

Stromen UIT - eigenschappen/huidige situatie

Bij de meeste toepassingen blijft **restwater** over dat geloosd wordt op het oppervlaktewater al dan niet via een IAZI. Over het algemeen is de restwaterstroom vrij constant door het jaar heen, behalve bij seizoensgebonden industrieën. Koelwater en verschillende typen proceswater zoals spoelwater zijn doorgaans van gelijke orde grootte als de ingaande stroom, hoewel er sprake is van verliezen naar de atmosfeer (**verdamping**). Bij andere processen, bijvoorbeeld voedselproductie, kan de restwaterstroom zowel groter (bijv. suikerindustrie) of kleiner (bijv. drankenindustrie) zijn dan de watervraag.

Voorraadvorming of berging

Naar verwachting is de hoeveelheid water die als voorraad gehouden kan worden binnen de industrie relatief beperkt ten opzichte van de in- en uitgaande stromen.

RWZI (huishoudelijk) (6)

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

In een rioolwaterzuivering (RWZI) wordt huishoudelijk restwater gezuiverd en vervolgens geloosd op het oppervlaktewater. In de RWZI wordt vooral de kwaliteit van de waterstroom gewijzigd, het kwantiteitsverschil tussen influent en effluent wordt als verwaarloosbaar gezien.

Stromen IN - eigenschappen/huidige situatie

Een RWZI verwerkt huishoudelijk **restwater**. Het influent bestaat uit verschillende stromen: Droogweerafvoer (DWA), Hemelwaterafvoer (HWA) en rioolvreemd water.

- DWA: vrij constant, vrijwel gelijk aan drinkwatervraag van huishoudens/stedelijk gebied;
- HWA: gestuurd door **neerslag**; zeer variabel;
- Rioolvreemd water (drainage, inloop van oppervlakte- of grondwater, grondwatersaneringen): afhankelijk van locatie en grondwaterstand.

De ingaande stromen worden beperkt door de capaciteit van de riolering en de rioolgemalen. Indien deze capaciteit wordt overschreden, zullen overstorten plaatsvinden, waarbij ongezuiverd restwater op het oppervlaktewater wordt geloosd.

Stromen UIT - eigenschappen/huidige situatie

Het gezuiverde **restwater** wordt geloosd op het oppervlaktewater. De hoeveelheid effluent is ongeveer gelijk aan de hoeveelheid influent. Er kan temporele variatie optreden gerelateerd aan de variatie van de inkomende stromen, maar ook afhankelijk van het zuiveringsproces. In het zuiveringsproces gaat een klein deel van het aangevoerde volume verloren naar de atmosfeer (**verdamping**) en tevens als reststroom (afhankelijk van de eventueel gebruikte (na)zuiveringstechniek).

Voorraadvorming of berging

De hoeveelheid water binnen RWZI's is relatief beperkt ten opzichte van de stroom en is niet bedoeld als buffer/voorraad. Wel zijn voorbeelden bekend, waarbij een RWZI gecombineerd wordt met waterretentie, zoals de Waterharmonica bij Kristalbad (Waterforum, 2017).

Stedelijk gebied – huishoudens en bedrijven (7)

Hiermee worden steden en dorpen en bijbehorende huishoudens en bedrijven (niet zijnde industrie) bedoeld.

Behoeften met betrekking tot het watersysteem

Voor deze component is het belangrijkste criterium dat aan de watervraag voor drinkwater wordt voldaan. De leveringszekerheid van schoon drinkwater is essentieel vanuit het oogpunt van volksgezondheid. De watervraag is licht seizoensgebonden (Vewin, 2022). Dit is gerelateerd aan weersomstandigheden, omdat bij warm weer meer water wordt gebruikt om tuinen te sproeien en zwembaden te vullen. De piekvraag voor drinkwater vindt plaats in de ochtend en avond. Er is sprake van geclusterde vraag in bebouwd gebied.

Groene ruimtes in de stad hebben water nodig voor de groei. Als er te weinig neerslag valt, dan moet geïrrigeerd worden.

Aan de andere kant moet het watersysteem zo ingericht worden dat restwater kan worden afgevoerd en er geen wateroverlast plaatsvindt tijdens piekbuien. Er moet voldoende water afgevoerd kunnen worden of geborgen in de stedelijk omgeving.

Stromen IN - eigenschappen/huidige situatie

De belangrijkste stromen naar stedelijk gebied/huishoudens zijn **drinkwaterlevering** en **neerslag**.

Stromen UIT - eigenschappen/huidige situatie

Binnen het stedelijk gebied en huishoudens wordt **restwater** geproduceerd. Het restwater bestaat uit verschillende componenten: DWA, HWA, rioolvreemd water (zie ook paragraaf RWZI). Bij niet gescheiden rioolstelsels zijn de restwaterstromen constant bij droog weer, en hoger en meer variabel bij nat weer (vooral in de zomer). Afvoer van neerslag vindt snel plaats over verharde oppervlakten. Bij gescheiden rioolstelsels is de restwaterstroom kleiner, omdat neerslag infiltreert in de bodem en het diepere grondwater kan bereiken (**wegzijging**). Neerslag kan ook afgevoerd worden via het oppervlaktewater in de stad (**drainage**). De groene ruimtes in de stad zorgen voor **verdamping** van water.

Voorraadvorming of berging

In huishoudens en bedrijven vindt geen (aanmerkelijke) voorraadvorming plaats. In de wortelzone in onverhard stedelijk gebied wordt water opgeslagen dat beschikbaar is voor aanwezig groen.

3.4 Bouwstenen voor watersysteemmodellen

De in 3.2 en 3.3 beschreven kennis van waterkwantiteit in watersystemen kan gevat worden in de vorm van generieke bouwstenen voor watersysteemmodellen. Afhankelijk van het doel van het model, kan de schematisatie afwijken, bijvoorbeeld door een verdere detaillering aan te brengen.

3.4.1 Stocks

De basiscomponenten van het watersysteem, de *stocks* (zie Hoofdstuk 2), zijn de plekken waar water zich kan bevinden en/of een functie kan hebben en vaak ook een transformatie ondergaat (verandering van kwaliteit, door bijvoorbeeld zuivering, verontreiniging of menging). De schematisatie (het onderscheid tussen de verschillende stocks) kan op veel manieren worden gemaakt. Hier is gekozen om enkele vormen van landgebruik te kiezen, die in de Nederlandse situatie qua hydrologie sterk onderscheidend zijn. Deze vereenvoudiging betekent ook dat bepaalde onderdelen of typen landgebruik niet expliciet worden gemodelleerd, maar ondergebracht worden bij verwante typen landgebruik (met een vergelijkbare hydrologische dynamiek) of voor het betreffende doel verwaarloosbaar worden geacht.

- **Oppervlaktewater.** Dit kunnen alle vormen van oppervlaktewater betreffen, zoals rivieren, beken, meren, kanalen en sloten. In regionale systemen betreft het vaak de kleinere wateren, terwijl grotere wateren vaak als systeemgrens dienen. Afhankelijk van het gebied of modeldoel kan onderscheid worden gemaakt tussen meerdere oppervlaktewaterdomeinen, zoals bijvoorbeeld een polder- en een boezemstelsel.
- **Vormen van landgebruik:**
 - **Landbouw.** Vanuit een watersysteemperspectief betreft de landbouw het landoppervlak en de onderliggende wortelzone waarop landbouw plaatsvindt. Glastuinbouw zou (indien belangrijk in een gebied) een aparte klasse vormen (meer hierover in Hoofdstuk 3). Dit type landgebruik onderscheidt zich van de anderen vanwege de bedekking met gewassen en het relatief sterke beheer van het grondwater.
 - **Natuur.** Vanuit een watersysteemperspectief betreft de natuur het landoppervlak en de onderliggende wortelzone waarop natuurlijke ecosystemen zich bevinden. Dit type landgebruik onderscheidt zich van de andere door het natuurlijke verloop van de grondwaterspiegel. Afhankelijk van het landschap kan het goed zijn om onderscheid te maken tussen grondwateronafhankelijke natuur (vaak hoger gelegen, diepere grondwaterstanden) en grondwaterafhankelijke natuur (vaak lager gelegen, afhankelijk van oppervlaktewater en/of kwelstromen, ondiepe grondwaterstand).
 - **Bebouwd gebied.** Het bebouwde gebied is een verzamelnaam voor gebieden met veel verharding, zodat een significant deel van het regenwater niet (of alleen met bepaalde ingrepen) infiltreert.
 - Binnen iedere vorm van landgebruik zijn verschillende componenten te onderscheiden:
 - **Oppervlak**, vanaf waar eventuele verdamping, afstroming (naar riool of oppervlaktewater) of infiltratie kan plaatsvinden.
 - **Wortelzone**, waaruit eventuele vegetatie water kan opnemen ten behoeve van verdamping, en waaruit eventuele percolatie naar het grondwater plaatsvindt.
 - **Freatisch grondwater**, dat van peil kan veranderen en van waaruit uitwisseling plaatsvindt met de wortelzone, het oppervlaktewater en het diepere grondwater.
- **Dieper grondwater**, waarmee uitwisseling kan plaatsvinden met het freatische grondwater en eventueel lateraal met andere gebieden.
- Onderdelen van de **waterketen en andere vormen van menselijk watergebruik:**
 - **Drinkwaterproductie.** Dit betreft de drinkwaterproductie door drinkwaterbedrijven, waarbij onttrokken water (doorgaans grond- of oppervlaktewater) wordt gezuiverd tot drinkwater en vervolgens naar klanten wordt gedistribueerd.

- **Huishoudens en bedrijven.** Huishoudens en bedrijven (geen industrie) ontvangen drinkwater en produceren restwater dat via het riool wordt afgevoerd.
- **Industrie.** Industrie is de verzamelnaam voor grootzakelijke gebruikers van water en/of producenten van restwater. Dit kan gaan om drinkwater, maar ook andere bronnen van water.
- **Afvalwaterzuiveringsinstallaties (AWZI's).** AWZI's betreffen rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) en industriële afvalwaterzuiveringsinstallaties (IAZI's) die restwater ontvangen en na zuivering doorgaans lozen op het oppervlaktewater (hoewel hergebruiksopties ook steeds meer in beeld komen).

3.4.2 Flows

In het basismodel zijn de belangrijkste waterstromen in het regionale watersysteem opgenomen. Naast deze, relatief grote, stromen zijn er diverse kleinere stromen die van belang kunnen zijn, afhankelijk van het doel, de schematisatie en de schaal van het model.

Hydrologische stromen

Waterstromen in het hydrologische watersysteem vinden plaats tussen de verschillende componenten en worden slechts deels of indirect beïnvloed door menselijk handelen. De vergelijkingen die kunnen worden gebruikt voor deze stromen hangen af van de schematisatie van het gekozen conceptueel model en de gekozen schaal. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan neerslag-afvoervergelijkingen (bijvoorbeeld met een niet-lineair reservoir), kwelstroming (op basis van een stijghoogteverschil en een globale weerstand) of bijvoorbeeld interactie tussen grond- en oppervlaktewater.

In het basismodel zijn de hydrologische stromen (randvoorwaarden met een * gemarkeerd):

- ***Neerslag** naar de belangrijkste landgebruikscomponenten (landbouw, natuur, oppervlaktewater en stedelijk gebied) gebaseerd op het respectievelijke oppervlak.
- **Verdamping** vanuit de landgebruikscomponent naar de atmosfeer (waarbij de potentiële evapotranspiratie een randvoorwaarde is).
- **Infiltratie** vanuit het oppervlak naar de wortelzone.
- **Grondwateraanvulling** vanuit de wortelzone naar het grondwater.
- **Afvoer van grondwater naar het oppervlaktewater** (of andersom).
- **Uitwisseling tussen freatisch en diep grondwater.**
- **Laterale aan- of afvoer van diep grondwater**, uitwisseling met het grondwater buiten de systeemgrenzen, waarbij de stijghoogte van het externe systeem een randvoorwaarde is.
- ***Aan- en afvoer van oppervlaktewater** door natuurlijke processen (vrij afwaterend).

Antropogene stromen

Antropogene stromen zijn waterstromen die (vrijwel) volledig door mensen worden bepaald. De stroom wordt gelimiteerd door één van de volgende componenten: de watervraag, de waterbeschikbaarheid bij de bron, de transportcapaciteit en eventuele afspraken. Er hoeft niet altijd sprake te zijn van alle vier de componenten. Bij de stroom tussen huishoudens en RWZI is er geen sprake van een 'vraag', maar wordt de stroom bepaald door het aanbod (geproduceerd huishoudelijk restwater) en de transportcapaciteit (de capaciteit van de riolering). Hoewel er wel sprake is van een vorm van afspraken (in de zin dat inwoners een zuiveringsheffing betalen) zijn deze niet limiterend. Antropogene stromen kunnen worden beschreven door deze algemene vergelijking:

$$Q = \min(\text{vraag, beschikbaarheid, transportcapaciteit, afspraken, ...})$$

In het basismodel zijn de antropogene stromen:

- **Onttrekking van grondwater** voor drinkwater, industrie of landbouw
- **Onttrekking van oppervlaktewater** voor drinkwater, industrie of landbouw
- **Levering van drinkwater** aan sectoren
- **Afvoer van restwater naar RWZI** vanuit stedelijk gebied en industrie

- **Afvoer van restwater naar oppervlaktewater** vanuit RWZI en industrie
- **Eventuele antropogene aan- of afvoer van water van buiten de systeemgrenzen**
- **Aan- en afvoer van oppervlaktewater** door menselijk handelen

4 Toekomstscenario's met betrekking tot het watersysteem

In de toekomst zal het watersysteem er anders uitzien door veranderingen in onder andere klimaat, economie, bevolking en landgebruik. Er zijn verschillende toekomstscenario's ontwikkeld voor Nederland. Zo heeft het KNMI scenario's voor veranderingen in het klimaat ontwikkeld (KNMI, 2015). Daarnaast zijn er scenario's die ook de socio-economische veranderingen meenemen, de Deltascenario's (Wolters et al., 2018a; Wolters et al., 2018b). In Tabel 1 is een overzicht gegeven met de stromen uit het regionale watersysteem en de beschikbare kennis uit de toekomstscenario's. Voor sommige stromen is een bandbreedte voor de te verwachten veranderingen beschikbaar, voor andere stromen is alleen aangegeven waar meer informatie of data gevonden kan worden over de veranderingen. Er zijn ook enkele stromen waarvoor geen data of schattingen beschikbaar zijn.

Ten tijde van publicatie zijn er nieuwe KNMI scenario's beschikbaar gekomen (KNMI, 2023), binnen dit onderzoek was er geen ruimte om deze nog mee te nemen. Ook wordt verwacht dat in de loop van 2024 nieuwe Deltascenario's beschikbaar komen, die nieuwe scenario's bevatten op het gebied van water. Bij alle genoemde scenario's is uitgegaan van een opwarmend klimaat, zonder aanvullende knikpunten. Deze scenario's kunnen al relatief grote uitdagingen opleveren voor de watersector (zie bijvoorbeeld Stofberg et al. (2023)). Wanneer eventuele knikpunten van toepassing zijn, kunnen veranderingen nog groter zijn, en soms ook een andere richting op gaan, zoals bijvoorbeeld een koeler klimaat (van Thienen et al, *in preparation*).

Tabel 1 Overzicht met beschikbare kennis uit toekomstscenario's voor de stromen uit het regionale watersysteem.

Stroom	Deelstromen	Indruk van beschikbaarheid en zekerheid data	Beschikbare kennis toekomst	Bandbreedte toekomst
Oppervlakte water	Hoofdwater-systeem	+	Deltascenario's (Wolters et al., 2018b, tabel S1) Uitvoer LHM en LSM Deltascenario's (Helpdesk Water, 2022)	Rijn: -20 tot +5% Maas: -45 tot +5% (verandering gemiddeld jaarlijkse laagste afvoer)
	Kleinere waterlopen	- tot +/- (afhankelijk van locatie en waterbeheerder)	Uitvoer LHM en LSM Deltascenario's (Helpdesk Water, 2022)	
	Boezems, polders, aanvoerkanalen	- tot +/- (afhankelijk van locatie en watersysteem)	Uitvoer LHM en LSM Deltascenario's (Helpdesk Water, 2022) Deltascenario's: watervraag doorspoeling (Wolters et al., 2018a, hoofdstuk 10)	-25 tot +100% (t.o.v. 15% van watervraag droge periode)
Neerslag	Neerslag naar het oppervlak	+	KNMI scenario's (KNMI, 2015)	+2.5 tot +5.5% (t.o.v. 851 mm/j) Winter: +3 tot +11% (t.o.v. 211 mm) Zomer: -13 tot +1.4% (t.o.v. 224 mm)
	Directe/snelle afstroming via oppervlak,	-	Uitvoer LHM Deltascenario's: Drainage	

	drainage (en evt freatisch grondwater)		(Helpdesk Water, 2022)	
	Glastuinbouw	-	?	
	Via verharde oppervlakken (stedelijk gebied)	-	Uitvoer LHM Deltascenario's (Helpdesk Water, 2022)	
Verdamping	Referentie-verdamping	+	KNMI scenario's (KNMI, 2015)	+3 tot +7% (t.o.v. 559 mm/j) +4 tot +11% voor zomer (t.o.v. 266 mm)
	Potentiële verdamping	-/+	Gebaseerd op referentieverdamping KNMI scenario's	
	Actuele / werkelijke verdamping (landbouw en natuur)	-	Uitvoer LHM deltascenario's (Helpdesk Water, 2022)	
Grondwater	Grondwater-aanvulling	-	Kan bepaald worden uit andere modelresultaten LHM	
	Wegzijing, kwel	-	Uitvoer LHM deltascenario's jaargemiddelde (Helpdesk Water, 2022)	
	(Laterale) grondwater stroming	-	?	
Grondwater onttrekkingen	Drinkwater	+	Deltascenario's (Wolters et al., 2018a, hoofdstuk 5)	-10 tot +35% (t.o.v. totale drinkwatervraag van 1100 miljoen m ³ /j)
	Land- en tuinbouw	-	Uitvoer LHM Deltascenario's: grondwateronttrekking berekening en irrigatie uit grondwater (jaarlijks) (Helpdesk Water, 2022)	
	Industrie, energie	+	Deltascenario's (Wolters et al., 2018a, hoofdstuk 7)	-40 tot +15% (per innamepunt, koel- en proceswater)
	Overig: zeer diep	?	?	
	Overig: kleine onttrekkingen	-	?	
Oppervlakte water-onttrekkingen	Drinkwater	+	Deltascenario's (Wolters et al., 2018a, hoofdstuk 5)	-10 tot +35% (t.o.v. totale drinkwatervraag van 1100 miljoen m ³ /j)

	Land- en tuinbouw	-	Uitvoer LHM Deltascenario's (irrigatie uit oppervlaktewater, jaarlijks) (Helpdesk Water, 2022)	
	Industrie, energie	+	Deltascenario's (Wolters et al., 2018a, hoofdstuk 7)	-40 tot +15% (per innamepunt, koel- en proceswater)
	Overig	-	?	
Drinkwaterlevering	Huishoudens en kleinzakelijk	+	Deltascenario's (Wolters et al., 2018a, hoofdstuk 5) Prognoses Vewin (Baggelaar & Geudens, 2017)	-10 tot +35% Huishoudelijk: 766 miljoen m3 tot 865 miljoen m3 in 2030 (t.o.v. 805 miljoen m3 in 2016).
	Industrie (grootzakelijk)	+	Deltascenario's (Wolters et al., 2018a, hoofdstuk 5) Prognoses Vewin (Baggelaar & Geudens, 2017)	-5 tot +15% 124 miljoen m3 tot 176 miljoen m3 in 2030 (t.o.v. 141 miljoen m3 in 2014)
	Landbouw	+	Prognoses Vewin (Baggelaar & Geudens, 2017)	-20% tot +20% in 2030 t.o.v. 41,9 miljoen m3 in 2014
Restwater	Huishoudens en bedrijven	-	?	
	Industrie, op riool	+	?	
	Industrie, op oppervlaktewater	+	Uitvoer LHM Deltascenario's, lozingen drink- en industriewater (Helpdesk Water, 2022)	
	RWZI	+	Uitvoer LHM Deltascenario's, lozing RWZI (Helpdesk Water, 2022)	

5 Interventies in het watersysteem

Naast de veranderingen in het watersysteem die kunnen optreden door autonome ontwikkelingen, bijvoorbeeld klimaatverandering, zijn ook interventies in het systeem mogelijk. In Nederland zijn al veel ingrepen in het watersysteem gedaan, bijvoorbeeld voor een optimale waterafvoer voor de landbouw of in de peilgestuurde gebieden in laag Nederland voor de juiste waterstand. Interventies zijn veelal gericht op een dusdanige werking/inrichting van het watersysteem dat aan de verschillende behoeften zoveel mogelijk wordt voldaan. Deze behoeften kunnen ook veranderen over tijd, zo was in het verleden waterafvoer zeer belangrijk, maar wordt de behoefte om water vast te houden nu steeds groter.

Er zijn verschillende typen maatregelen mogelijk, op hoofdlijnen in te delen naar meer vasthouden, minder onttrekken, meer aanvullen. Elke maatregel heeft een ander effect op de waterstromen in het watersysteem, en combinaties van maatregelen kunnen een maatregel effectiever maken. In Tabel 2 worden voor enkele mogelijke maatregelen de effecten op de waterstromen ingeschat. De tabel is overgenomen uit Stofberg & Brakkee (2022) en beperkt aangevuld. De maatregelen in deze tabel zijn gericht op de verbetering van waterbeschikbaarheid en grondwater (aanvulling en stijghoogten) en is niet volledig. Er zijn daarnaast nog zeer veel maatregelen denkbaar voor andere doelen, bijvoorbeeld het voorkomen van wateroverlast, waarvan er in het verleden al veel uitgevoerd zijn in Nederland.

Tabel 2 Mogelijke maatregelen en de ordegrrootte van het mogelijke effect op de waterstromen in het watersysteem. In deze tabel worden maatregelen uit modelstudies samengevat, waarbij (voor zover mogelijk) aanpassingen aan waterstromen zijn gekoppeld aan aanpassingen in grondwaterstanden, berging en afvoerstromen. De tabel is overgenomen uit Stofberg & Brakkee (2022) en beperkt aangevuld. Voor een aantal maatregelen zijn de effecten sterk locatiespecifiek, in deze gevallen moet in acht genomen worden dat de getallen zijn gebaseerd op de situatie in Noord-Brabant.

Variant maatregel	Relevante stromen	Effect op waterstromen in watersysteem (locatiespecifieke effecten gericht op Noord-Brabant)	Referentie
Meer vasthouden			
Peilverhoging/verhoging drainagebasis/verwijderen detailontwatering	Oppervlaktewater, drainage, infiltratie, grondwaterstand, kwel, wegzijging	De grondwaterstanden gaan omhoog (ordegrootte 10 cm). Er zijn effecten op de kwel. Afvoer zal afnemen door verwijderen detailontwatering (ordegrootte 50%). Afvoer verschuift over tijd naar meer afvoer in de zomer (meer basisafvoer, ordegrootte 5%)	Van den Eertwegh et al. (2021), Stuurman et al. (2020)
Peilverhoging 20-30cm in bufferzones rond natte natuur en in natuur zelf (500m)	Oppervlaktewater, drainage, infiltratie, grondwaterstand, kwel, wegzijging	Grondwaterstanden in het gebied gaan omhoog (ordegrootte 4-7 cm), diepe stijghoogten binnen en buiten natuur gaan ook omhoog (ordegrootte 3-7 cm). Er is sprake van een afname van diepe kwel in natuur (ordegrootte -30%)*. De afvoer neemt af.	Van den Eertwegh et al. (2021), Stuurman et al. (2020)
Verwijderen/isoleren alle ontwatering natte natuurgebieden	Oppervlaktewater, drainage, infiltratie, grondwaterstand, kwel, wegzijging	Grondwaterstanden gaan omhoog (ordegrootte 12-20 cm). De diepe kwel in natuurgebieden neemt af (ordegrootte -80%). De afvoer neemt af, waarbij afname in de zomer (ordegrootte -40%) groter is dan in de winter (-22%).	Stuurman et al. (2020)
Minder onttrekken			
Besparing drinkwater huishoudens door gedragsverandering	Drinkwaterlevering, onttrekking grondwater, onttrekking oppervlaktewater, restwater	Besparingen door gedragsverandering hebben een tijdelijk effect van maximaal 2-30% (ordegrootte). Het effect duurt vaak relatief kort (enkele weken tot maanden). Sommige interventies kunnen een sterker effect hebben,	(Brouwer et al., 2022; Koop et al., 2019)

		van 50%, en (deels) effect houden over een periode van enkele jaren.	
Besparing drinkwater door inzet regenwater	Neerslag, drinkwaterlevering, onttrekking grondwater, onttrekking oppervlaktewater, restwater, mogelijk ook grondwateraanvulling (bij gescheiden rioolstelsels)	Voor laagbouw zou ongeveer 13-17% van de drinkwatervraag voldaan kunnen worden uit regenwater van eigen dak. In België lijkt regenwateropvang te kunnen leiden tot een vermindering van de drinkwatervraag met maximaal 50% (NB: relatief meer dakoppervlak per persoon dan in NL).	(CBS, 2022; Stofberg et al., 2019; Vlaanderen.be, 2023)
Besparing drinkwater huishoudens door technieken en inzet regenwater en hergebruik	Neerslag, drinkwaterlevering, onttrekking grondwater, onttrekking oppervlaktewater, restwater	De totale besparing is in de orde van grootte van 32-58% door verschillende waterbesparende technieken. In combinatie met inzet van regenwater en/of grijswaterhergebruik kan dit oplopen tot 76-98% besparing. (Op basis van een modelsimulatie voor SUPERLOCAL, waarbij een woonwijk met zowel laag- als hoogbouw zoveel mogelijk zelfvoorzienend is gemaakt)	Bouziotas et al. (2019)
Alternatieve bronnen (anders dan grondwater) voor drinkwater	Neerslag, drinkwaterlevering, onttrekking grondwater, onttrekking oppervlaktewater, restwater	Als eerste stap kunnen alternatieve bronnen gebruikt worden om de groei van de drinkwatervraag (door demografische veranderingen en/of meer verbruik) op te vangen en zo te voorkomen dat nieuwe grondwateronttrekkingen nodig zijn. Verdergaande stappen kunnen bestaan uit vervanging van grondwaterwinningen. De impact op andere waterstromen is afhankelijk van de gekozen alternatieve bron, bijvoorbeeld rivierwater, zeewater, brak grondwater, RWZI effluent, restwater uit de industrie, neerslag etc.	Stofberg et al. (2019)
RWZI-effluent naar landbouw	Onttrekking grondwater, onttrekking oppervlaktewater, restwater	Voor een droog jaar is ingeschat dat met ongeveer 20% van het jaarlijkse effluent aan 50% van de grondwatervraag van de landbouw kan worden voldaan. Dit vindt in het groeiseizoen (apr-aug) plaats, met ongeveer 40% van het effluent in april tot ongeveer 70% in juli. Inzet van effluent heeft gevolgen voor oppervlaktewaterafvoeren (beken), die in de zomer vaak al laag zijn. Deze inschatting is gemaakt voor het gebied van Aa en Maas, op basis van vraag en aanbod en een maximale transportafstand van 10 km. Aanname is dat er tot voldoende kwaliteit wordt gezuiverd. Er kunnen lokale verschillen zijn tussen de verhouding effluent en landbouwwraag. Ook kan de kwetsbaarheid van eventuele beeksystemen sterk verschillen.	Krajenbrink et al. (2021a)
RWZI restwater naar industrie	Onttrekking grondwater, onttrekking oppervlaktewater, restwater	In een droog jaar kan de industriële grondwatervraag met ongeveer 75% worden verminderd en de drinkwatervraag tot vrijwel 0 gereduceerd worden, door de inzet van ongeveer 13% van het beschikbare effluent. Deze stroom is relatief constant over het jaar, maar de relatieve effecten op het oppervlaktewater kunnen in de zomer groter zijn (door reeds lage afvoeren). Deze inschatting is gemaakt voor het gebied van Aa en Maas, op basis van veronderstelde vraag en aanbod en een maximale transportafstand van 10 km. Aanname is dat er tot voldoende kwaliteit wordt gezuiverd. Voor extrapolatie is het belangrijk te beseffen dat de aanwezigheid van industrie t.o.v. RWZIs sterk kan verschillen.	Krajenbrink et al. (2021a)

Besparingen in / door industrie	Onttrekking grondwater, onttrekking oppervlaktewater, restwater	Er zijn vaak besparingen mogelijk, maar het is erg onzeker hoeveel mede omdat er grote variatie bestaat in industrieën. Kosten zijn vaak een drempel (niet de beschikbare techniek). Theoretische bovengrens is dat er geen water meer geloosd wordt bij (zeer) veel inzet van technische maatregelen. Dit heeft ook effect op de watervoerendheid van waterlopen.	Pers. comm. met Kees Roest (KWR) en (H2O, 2022; Waterforum, 2022)
Besparingen in de landbouw door irrigatietechnieken	Onttrekking grondwater, onttrekking oppervlaktewater, wegzijging, drainage, grondwateraanvulling, verdamping	Bij verandering van traditionele beregening naar andere technieken (bijvoorbeeld druppelirrigatie) wordt de besparing geschat in de orde grootte van 0-40%. Werkelijke besparing is afhankelijk van veel verschillende factoren.	de Louw et al. (2020)
Besparingen in de landbouw door landbouwkundige maatregelen	Onttrekking grondwater, onttrekking oppervlaktewater, wegzijging, drainage, grondwateraanvulling, verdamping	Landbouwkundige maatregelen, zoals droogtebestendige gewassen of agroforestry, kunnen leiden tot besparing. Eventuele besparingen hangen af van gewaskeuze en acceptabel geachte opbrengstverminderingen. Een theoretisch maximum van besparingen is dat er voor deze percelen geen beregening plaatsvindt, maar het is onbekend bij welke gewassen dit kan en wat dit betekent voor de opbrengst. Verandering van gewas kan uiteraard tot grote verschillen in verdamping en waterverbruik leiden, maar hierbij moet worden opgemerkt dat de geschiktheid van percelen voor bepaalde gewassen sterk kan verschillen. Ook moet opgemerkt worden dat er mogelijk sprake is van vergrote risico's (verlies van oogst).	CBS Statline (2019); Witte et al. (2019)
Reductie grondwateronttrekkingen	Onttrekking grondwater, grondwaterstand, drainage, wegzijging, kwel, wegzijging, laterale grondwaterstroming	Door een afname in onttrekkingen zullen de grondwaterstanden stijgen. De verandering in grondwaterstand is rechtstreeks afhankelijk van de afname. Veranderingen binnen het grondwatersysteem (kwel/wegzijging, laterale grondwaterstroming) zijn afhankelijk van de locatie van de onttrekkingen. Als verder geen aanpassingen aan het systeem plaatsvinden, zal dit ook effect hebben op de drainage naar het oppervlaktewater.	Van den Eertwegh et al. (2021)
Verwijderen alle grondwateronttrekkingen bufferzones natte natuur	Onttrekking grondwater, drainage, wegzijging, kwel, wegzijging, laterale grondwaterstroming	Door een afname in onttrekkingen zullen de grondwaterstanden stijgen. De verandering in grondwaterstand is rechtstreeks afhankelijk van de afname. Veranderingen binnen het grondwatersysteem (kwel/wegzijging, laterale grondwaterstroming) zijn afhankelijk van de locatie van de onttrekkingen. Als verder geen aanpassingen aan het systeem plaatsvinden, zal dit ook effect hebben op de drainage naar het oppervlaktewater.	Van den Eertwegh et al. (2021)
Meer aanvullen			
Infiltreren van neerslag op verharde oppervlakken	Restwater, grondwateraanvulling, drainage	Ongeveer een kwart van het RWZI effluent bestaat uit regenwaterafvoer (RWA). Dit zou apart afgevoerd kunnen worden en in het grondwater worden geïnfiltrerd. Dit zou betekenen dat er meer grondwateraanvulling plaatsvindt, en minder afvoer vanuit de RWZI naar het oppervlaktewater. Indirect kan het extra grondwater wel tot afvoer komen, afhankelijk van de lokale ontwateringssituatie.	Krajenbrink et al. (2021a), Van den Eertwegh et al. (2021)

		Deze inschatting is gebaseerd op gegevens van enkele RWZI's voor het gebied van Aa en Maas. Hierbij is geen rekening gehouden met eventuele verwijdering van de 'first flush' (eerste deel van het afstromend water dat verontreinigd kan zijn). Grove aanname is dat deze first flush maximaal de helft is. Deze maatregel kan op verschillende manieren vorm krijgen, bijvoorbeeld door ontsteden van oppervlakken en gescheiden rioolstelsels in combinatie met infiltratievoorzieningen of infiltratie na zuivering bij de RWZI. In het laatste geval is het theoretisch maximum de hoeveelheid beschikbaar effluent. Afhankelijk van de lokale ontwateringssituatie kan het geïnfiltreerde water ten goede komen aan het (diepere) grondwater of snel tot afvoer komen.	
Aanpassing wateraanvoer in de landbouw gericht op stijging grondwaterstand of aanvulling grondwater, zoals subirrigatie in de landbouw, bevoeiingsweides	Oppervlaktewater, restwater, drainage, wegzijging, grondwateraanvulling, verdamping	Bij subirrigatie kan oppervlaktewater of restwater ondergronds worden aangevoerd in landbouwpercelen, in plaats van beregening. Dit leidt tot watervoorziening voor het gewas, hogere verdamping en (tijdelijk) extra grondwateraanvulling (afhankelijk van ontwateringsmaatregelen). De watervraag van subirrigatie ligt in de orde grootte van 300-600 mm per groeiseizoen. Afhankelijk van de hydrologische situatie kan een relatief groot deel ten goede komen aan het grondwater (orde grootte 20% / 100 mm) en/of lokaal tot afvoer komen. Stijging van de grondwaterstand in lente/zomer kan oplopen tot meerdere dm, maar blijft een lokaal effect. Theoretisch maximum wordt sterk gelimiteerd door beperkte beschikbaarheid aanvoerwater.	(CBS, 2022; de Wit et al., 2022; Stofberg et al., 2021a)
Actieve infiltratie oppervlakte- of restwater 100 mm/j in hoge gebieden	Oppervlaktewater, restwater, drainage, infiltratie, wegzijging, kwel, grondwateraanvulling	Door actieve infiltratie stijgen de grondwaterstanden. Voor een deel zal dit water ook tot afvoer komen als er geen aanpassingen aan het watersysteem gedaan worden, waardoor de afvoer toeneemt. Via wegzijging zal ook een deel van het water in het diepe grondwater terecht komen.	Van den Eertwegh et al. (2021)
Omvorming (dicht) naaldbos naar loofbos of heide	Verdamping, grondwateraanvulling, wegzijging, drainage	Door het omvormen van dicht naaldbos naar andere vegetatietypen zoals loofbos of heide zal de verdamping afnemen. Hierdoor stijgen de grondwaterstanden. Deels komt tot water ten goede aan het diepe grondwater, deels zal het tot afvoer komen. De effecten hangen af van de locatie waar de omvorming plaatsvindt.	Van den Eertwegh et al. (2021); Voortman et al., (2019)

**Het zeer sterk water vasthouden specifiek in natuurgebieden kan er juist toe leiden dat diepe kwel wordt "weggedrukt", waardoor het gebied wel natter wordt maar alleen met gebiedseigen water.*

6 Toepassing van watersysteemmodellen

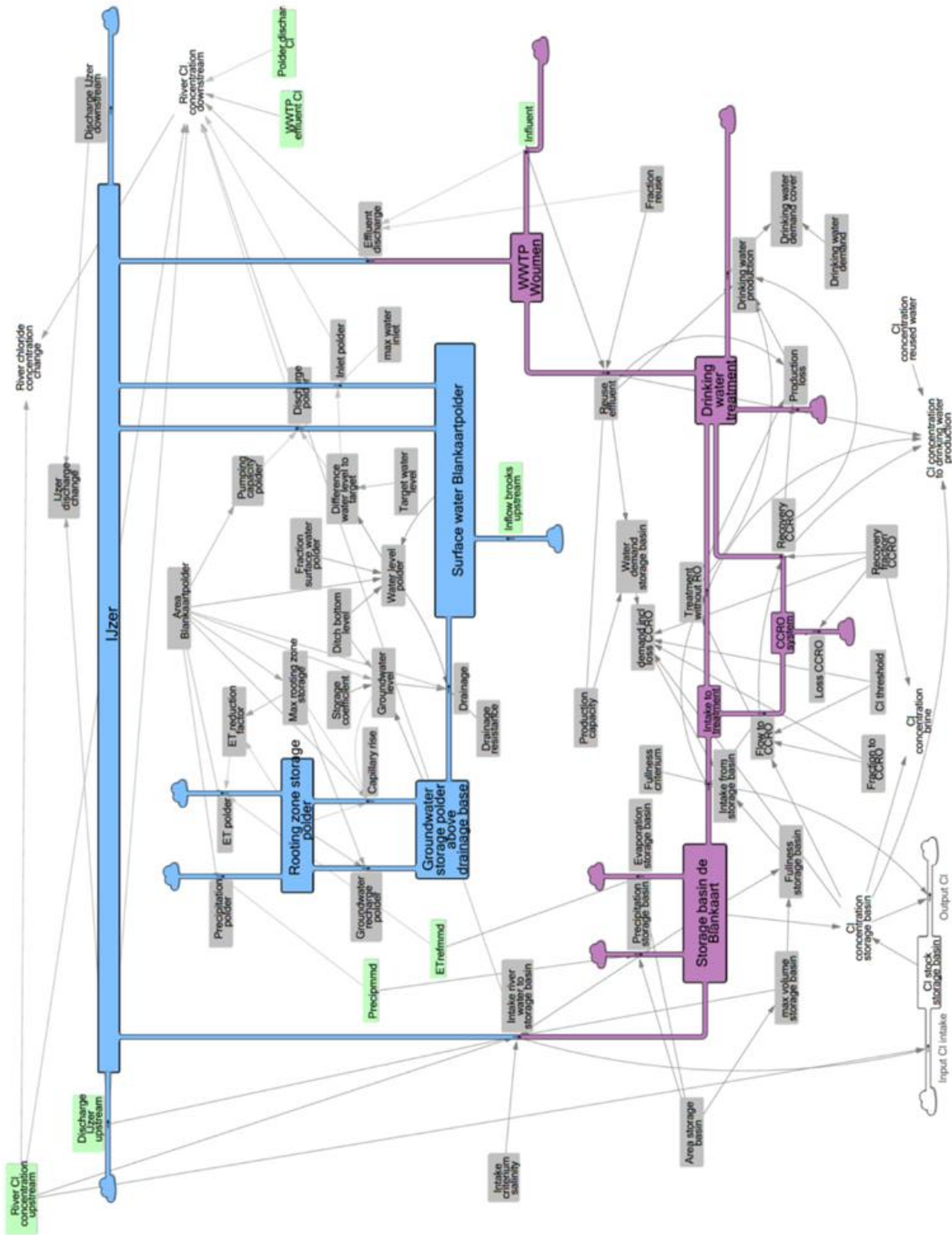
Binnen het voorliggende onderzoek zijn er enkele cases uitgewerkt, waarin is geëxperimenteerd met het modelleren van (effecten van maatregelen op) watersystemen. In de eerste uitgewerkte cases is gebruik gemaakt van simulatiesoftware die bedoeld is voor systeemdynamisch modelleren (Vensim, Ventana Systems). In de daaropvolgende casus is de Watersysteemverkenner toegepast, een applicatie die speciaal voor dit doel ontwikkeld is binnen dit project.

Hieronder worden de verschillende onderdelen kort toegelicht, waarbij de belangrijkste bevindingen worden samengevat. Voor verdere informatie over de verschillende cases en de ontwikkeling van de Watersysteemverkenner wordt verwezen naar de verschillende publicaties die hierover zijn verschenen:

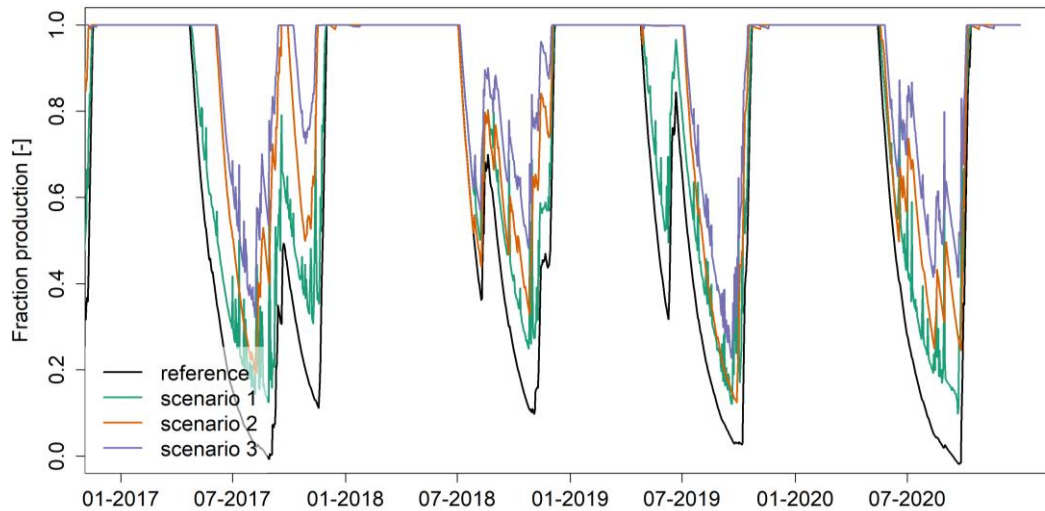
- The water cycle modelling and assessment solutions toolkit - Final release (Lykou et al., 2023)
- Effect van waterbesparing in stedelijk gebied op het regionale watersysteem. Casus SUPERLOCAL (Krajenbrink & Stofberg (2023))
- De Watersysteemverkenner (Stofberg & van Huijgevoort, 2024a)
- Inzicht in het watersysteem door toepassing van een systeemmodel (Stofberg & van Huijgevoort, 2024b)

6.1 Casus 'Woumen', over vergroten van de drinkwaterproductie in Vlaanderen.

Deze casus is uitgewerkt in samenwerking met het EU project 'B WaterSmart'. Hier worden de eerste resultaten beschreven. Het betreft een drinkwaterproductielocatie met een spaarbekken waar rivierwater wordt gebruikt voor drinkwaterproductie. Periodieke lage afvoeren leiden tot een verslechterde waterkwaliteit, waardoor er minder water van voldoende kwaliteit beschikbaar is voor drinkwaterproductie. Als mogelijke oplossingen wordt gekeken naar de inzet van omgekeerde osmose (RO) als aanvullende zuivering en naar hergebruik van RWZI effluent van een nabijgelegen RWZI. Voor deze casus is een systeemmodel gemaakt van de onderdelen van het watersysteem die hier van belang zijn (met focus op de rivier, drinkwaterproductie en RWZI) (Figuur 6-1). Dit model is ontwikkeld in samenspraak met lokale partners. Er zijn drie verschillende scenario's vergeleken (beide oplossingsrichtingen afzonderlijk en een combinatie van beide) met de referentiesituatie, waarbij gekeken is naar o.a. de vulgraad van het spaarbekken, de drinkwaterproductie en de verdeling tussen de verschillende bronnen, maar ook hoe dit samenhangt met de afvoer en waterkwaliteit van de rivier. De resultaten lieten zien dat hoewel een combinatie van de verschillende maatregelen het meest effectief zou zijn om de drinkwaterproductie te verhogen, deze alsnog onvoldoende zouden zijn om aan de maximale vraag te voldoen. Meer over deze casus is te lezen in: Van Huijgevoort et al. (2024, *in voorbereiding*) en Lykou et al. (2023).



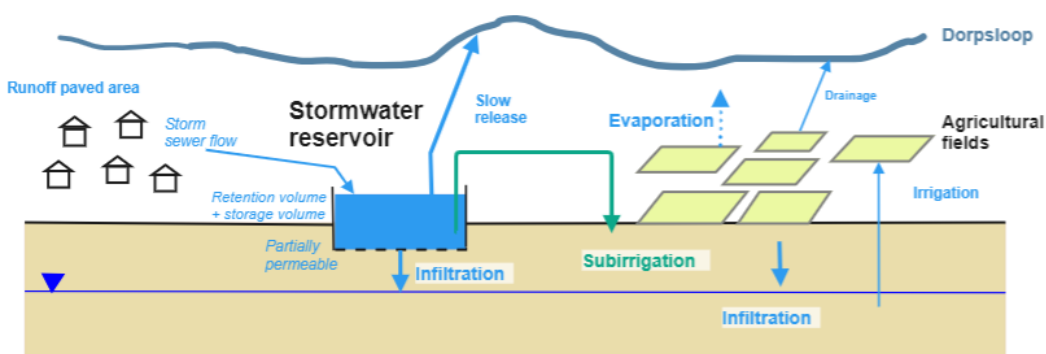
Figuur 6-1. Vensim model van casus de Blankaart. (Lykou et al., 2023).



Figuur 6-2. Effect van het referentiescenario en drie scenario's op de drinkwaterproductie (fractie van de maximale drinkwaterproductie). In alle scenario's is de drinkwaterproductie in de zomer lager dan in de winter. (Lykou et al., 2023)

6.2 Casus 'Mechelen' over afkoppelen en toepassing van stedelijk hemelwater in de landbouw in Vlaanderen

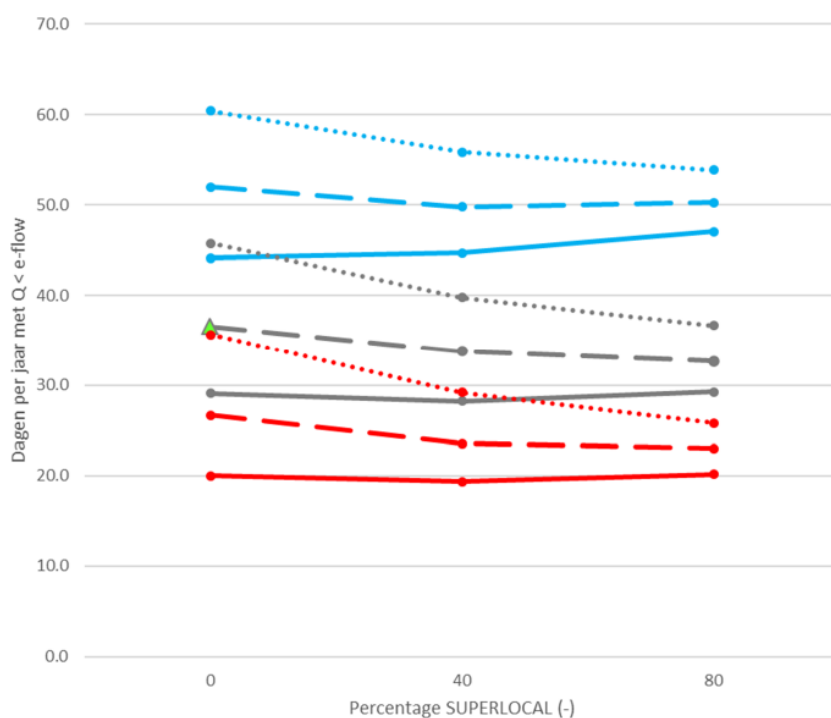
Deze casus is uitgewerkt in samenwerking met het EU project 'B Watersmart'. Het betreft een wijk in de stad Mechelen, waar het systeem voor hemelwaterafvoer onvoldoende geschikt is om piekbuien af te voeren. Tevens is er een watervraag in een nabijgelegen landbouwgebied. In het onderzoek is gekeken naar de toepassing van een bufferreservoir voor hemelwater en toepassing van hemelwater in de landbouw via subirrigatie. In samenspraak met lokale partners is een conceptueel model ontwikkeld, wat vervolgens met behulp van data als Vensim - rekenmodel is toegepast. Vervolgens zijn twee scenario's (toepassing gescheiden hemelwateropvang/berging, zonder en met de combinatie met subirrigatie in de landbouw) vergeleken met de referentiesituatie. De resultaten lieten zien dat de totale hoeveelheid hemelwaterafvoer naar het oppervlaktewater sterk gereduceerd kon worden, vooral wanneer er ook gebruik wordt gemaakt van subirrigatie, waarbij ook verdamping en grondwaterstanden kunnen toenemen. Dit laatste is grotendeels positief, maar ook een belangrijk aandachtspunt, omdat dit het risico op wateroverlast kan doen toenemen. Meer over deze casus is te lezen in Van Huijgevoort et al., 2024 (in voorbereiding) en Lykou et al. (2023).



Figuur 6-3. Illustratie van de oplossingsrichtingen voor de casus Mechelen (Lykou et al., 2023).

6.3 Casus 'Superlocal', over waterbesparingsmaatregelen in huishoudens in een vrij afwaterend gebied

In deze casus is gebruik gemaakt van eerder onderzoek (SUPERLOCAL) waarbij waterbesparende initiatieven zijn toegepast in een woonwijk in Kerkrade. Hierbij zijn effecten op de waterketen onderzocht. In deze casus is onderzocht hoe waterbesparende maatregelen in woonwijken bij grootschalige toepassing kunnen doorwerken in het watersysteem, eerst zeer globaal met behulp van Sankeydiagrammen (stroomdiagrammen waarin de dikte van de pijlen representatief is voor de grootte van een stroom), en vervolgens met behulp van een Vensim systeemmodel. In dit onderzoek werd duidelijk dat hoewel Sankeydiagrammen inzichtelijk zijn, ze onvoldoende inzicht bieden in eventuele wisselwerkingen in het watersysteem. Met het systeemmodel konden effecten in het watersysteem in beeld worden gebracht, en werd ook duidelijk op welke manier de effecten afhankelijk zijn van onder andere de landschapskenmerken. Afhankelijk van de onderzochte systeemkenmerken kan invoer van Superlocal-achtige maatregelen leiden een vermindering of juist een toename van het voorkomen van (te) lage afvoeren (Figuur 6-4). Meer over deze casus is te lezen in Krajenbrink & Stofberg (2023).



Figuur 6-4. Gemiddeld aantal dagen per jaar dat de oppervlaktewaterafvoer lager is dan e-flow (Q10 basismodel) bij invoer van SUPERLOCAL maatregelen in 0%, 40% of 80% van het stedelijk gebied. Legenda: De groene driehoek is het basismodel. De verschillende kleuren geven de systeemweerstand (de weerstand die van toepassing is tussen neerslagoverschot en afvoer) aan: blauw = 1000 d, grijs = 1500 d, rood = 2000 d. Het lijntype geeft aan welk deel van het lokaal gebruikte drinkwater ook lokaal wordt gewonnen (0% (ononderbroken lijn) is winning buiten het gebied, 100% (gestreepte lijn) betekent dat al het drinkwater lokaal wordt gewonnen en er geen export plaatsvindt, en 200% (stippellijn) betekent dat er het dubbele wordt gewonnen van wat er lokaal nodig is, het overschot wordt geëxporteerd)

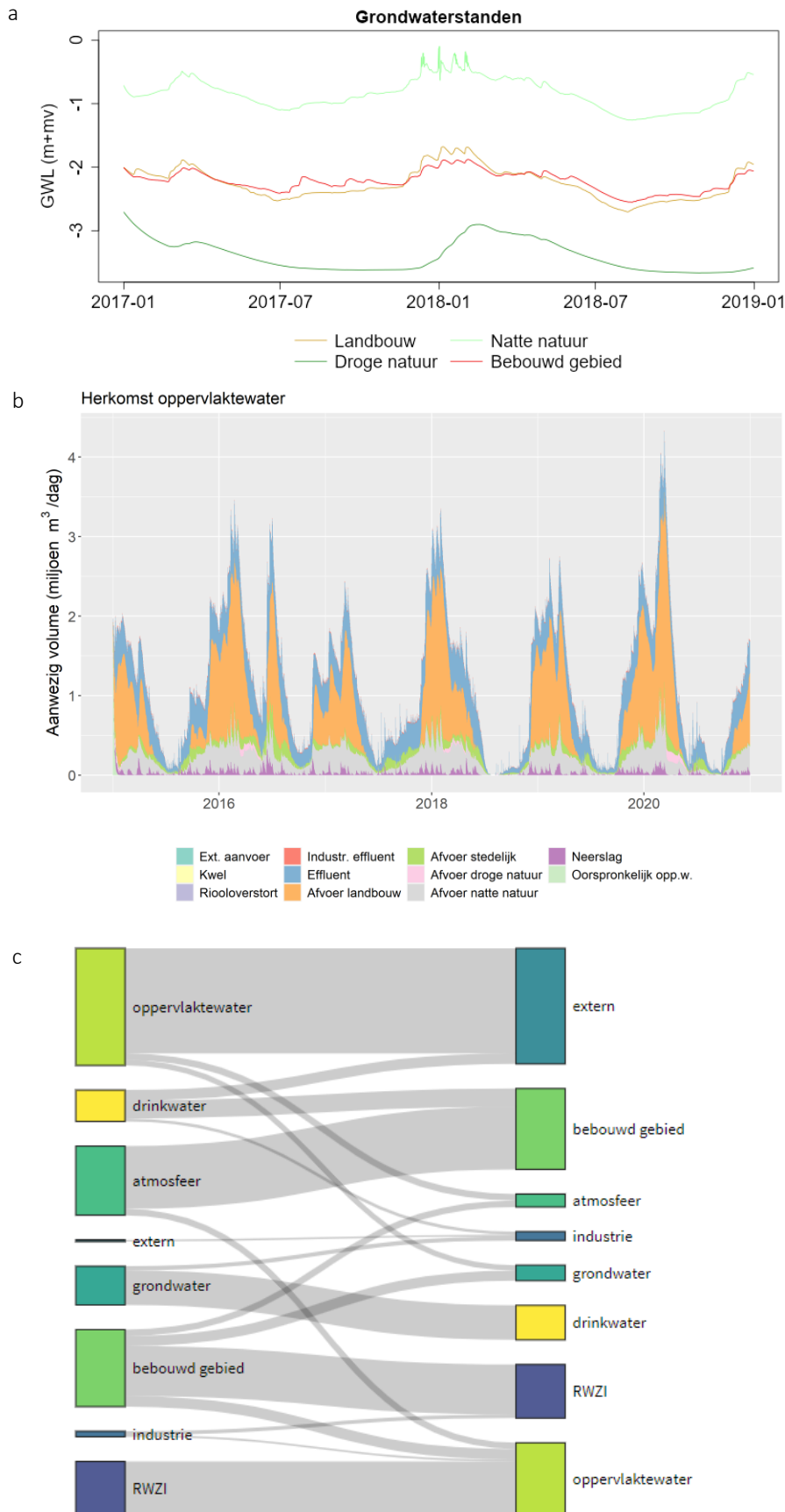
6.4 Ontwikkeling van de 'Watersysteemverkenner'

In bovenstaande cases is gebruik gemaakt van de software Vensim om de modellen van de watersystemen te maken. Tijdens de uitvoering bleek dat er relatief veel detail nodig is om goed recht te doen aan enkele processen in het watersysteem, met name de bodemgerelateerde processen. Hoewel het detailniveau nog altijd relatief laag is, bleek Vensim niet goed geschikt om te werken met deze mate van details. Bij gebrek aan alternatieven, en geïnspireerd door het systeemmodel uit Aqua Ludens (van Aalderen et al., 2023), hebben wij vervolgens een model met een interface (applicatie) ontwikkeld die speciaal bedoeld is om waterstromen in regionale watersystemen te simuleren. Hierin is het model uit Aqua Ludens doorontwikkeld. Het simulatiemodel

is ontwikkeld in R¹³ en de interface werkt op basis van Shiny¹⁴. In het simulatiemodel zijn basisvergelijkingen van stromen in het watersysteem opgenomen. Met behulp van standaardsets of zelfgekozen invoer (meteorologie, landschapkenmerken, landgebruik, eventuele interventies in het watersysteem) worden antropogene en hydrologische waterstromen in een regionaal watersysteem berekend. De uitvoer is beschikbaar in de vorm van tijdreeksen, samengevatte getallen en Sankey diagrammen (Figuur 6-5). Daarnaast kunnen verschillende scenario's vergeleken worden, waarbij zichtbaar wordt hoe verschillende stromen en systeemcomponenten kunnen veranderen als gevolg van de gewijzigde invoer. Verdere toelichting omtrent de Watersysteemverkenner is beschikbaar in Stofberg & van Huijgevoort (2024a).

13 <https://www.r-project.org/>

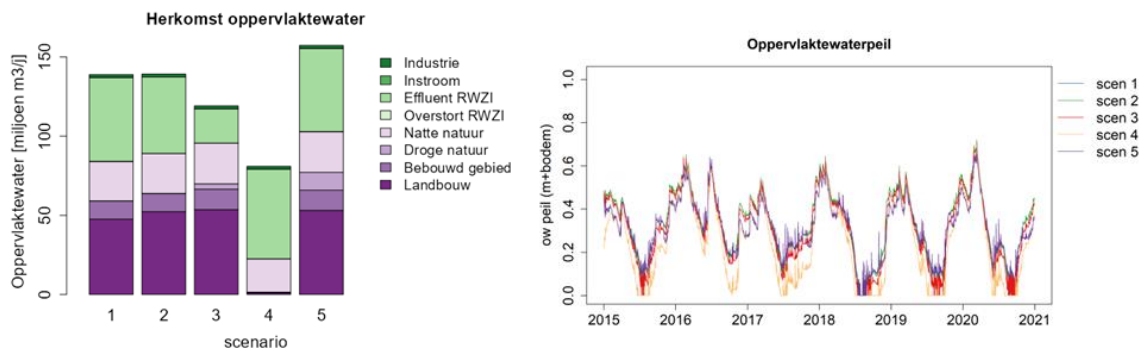
14 <https://shiny.posit.co/>



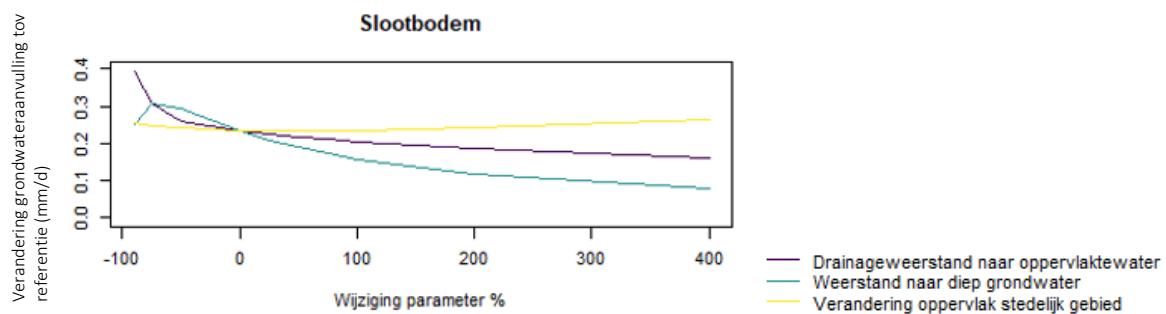
Figuur 6-5. Voorbeelden van uitvoer van de Watersysteemverkenner, a) Grondwaterstanden voor de verschillende landgebruiktypen, b) Overzicht van de herkomst van het oppervlaktewater, c) Overzicht van waterstromen in een gebied, waarbij de dikte van de lijnen de ordegraote van de stromen aangeeft.

6.5 Casus 'Zuid', over waterhergebruik in een Noord-Brabants landschap

Deze casus sluit aan bij eerder onderzoek naar hergebruik van effluent in een gebied binnen waterschap Aa en Maas (Krajenbrink et al., 2021a). Op de zuidelijke hoge zandgronden zijn er vraagstukken rondom een te lage waterbeschikbaarheid, te lage grondwaterstanden en periodiek te lage beekafvoeren. In deze casus zijn de effecten van verschillende maatregelen vergeleken, en is ook gekeken hoe deze effecten samenhangen met de landschapkenmerken. De volgende maatregelen zijn onderzocht: hergebruik van RWZI-effluent in de landbouw, infiltratie van RWZI-effluent in grondwateronafhankelijke natuur, verhogen van slootbodems en infiltratie van oppervlaktewater in grondwateronafhankelijke natuur tijdens de wintermaanden. De resultaten (Figuur 6-6) laten onder andere zien dat alle onderzochte maatregelen mogelijk (licht of sterk) positief kunnen bijdragen aan de diepere grondwateraanvulling, maar dat alleen infiltratie van oppervlaktewater in de winter daarnaast ook kan bijdragen aan het verminderen van het aantal dagen met te lage afvoeren. De resultaten lieten zien dat de effecten van maatregelen kunnen verschillen als gevolg van omgevingskenmerken (Figuur 6-7) en in welke combinatie het effect van maatregelen kan worden versterkt. De resultaten benadrukken dat systeembegrip belangrijk is bij de keuze voor maatregelen.



Figuur 6-6. Effecten van de vijf onderzochte scenario's (referentie en de vier maatregelen) op enkele watersysteemvariabelen.



Figuur 6-7. Effect van maatregelen (ten opzichte van referentie) op diepere grondwateraanvulling, bij verschillende omgevingskenmerken. Deze grafiek betreft het netto effect van de maatregel 'slootbodem verhogen' bij verschillende omgevingskenmerken. In de referentiesituatie kan deze maatregel tot een toename van grondwateraanvulling van ongeveer 0.25 mm/d leiden. Echter, in gebieden met andere omgevingskenmerken (andere drainageweerstand tussen grondwater en oppervlaktewater, andere weerstand naar het diepe grondwater en verandering van landgebruik) kan het effect van deze maatregel flink anders uitpakken, variërend van een veel groter positief effect tot een bijna nihil effect.

7 Discussie

In dit rapport is toegelicht hoe systeemdenken van mogelijk nut kan zijn in het onderzoek naar interventies in watersystemen, is beschreven welke kennis gebruikt kan worden om dit verder vorm te geven, is een eerste aanzet gegeven van de vorm van een watersysteemmodel en zijn verschillende toepassingen in cases besproken.

Watersystemen vertonen gedrag dat (grotendeels) gesimuleerd kan worden met systeemdynamische modellen. Deze modellen bieden de mogelijkheid om snelle verkenningen te maken van veranderingen (zoals klimaatverandering) en ingrepen in een systeem (veranderingen in menselijke activiteiten, maatregelen in het watersysteem).

In aanvulling op eerder toegepaste Sankeydiagrammen (onderzoek op basis van systeemdenken, bijvoorbeeld (Pronk et al., 2021; Stofberg & Brakkee, 2022; Stofberg et al., 2022a)) bieden systeemdynamische modellen de mogelijkheid om de factor tijd en (niet-lineaire) processen expliciet mee te nemen, waarbij ook veranderingen in systeemvariabelen (bijvoorbeeld grondwaterstanden) inzichtelijk gemaakt worden. Daarnaast blijken deze modellen geschikt om de effecten van interventies in watersystemen te onderzoeken, en daar ook gevoeligheidsanalyses mee uit te voeren. Een zwak punt bij deze modellen is dat verdere validatie gewenst is. Het zou verder onderzocht moeten worden in hoeverre validatie mogelijk is, vanwege de hoge mate van vereenvoudiging. Aangezien de modellen gebruik maken van algemeen geaccepteerde (standaard) vergelijkingen, worden de modellen desondanks wel geschikt geacht om interacties van processen te bestuderen, orde grootte van effecten in te schatten en eventuele bijwerkingen van maatregelen in watersystemen te onderzoeken.

Vensim bleek een nuttig hulpmiddel om eenvoudige modellen op te zetten van delen van watersystemen, maar niet praktisch bij de opzet van een model van een volledig watersysteem, vanwege de complexiteit van het watersysteem. Om deze reden was het nodig om voor iedere situatie een nieuw model te ontwikkelen. De speciaal voor dit doel ontworpen Watersysteemverkenner bleek wel geschikt om op een flexibele manier verschillende soorten watersystemen te modelleren, maar is daardoor wel complexer van aard. De Vensim modellen hebben als voordeel dat ze visueel zijn, en daardoor ook inzichtelijk te maken zijn voor (relatieve) leken. De werking van het model in de Watersysteemverkenner is visueel minder inzichtelijk (wat het risico op misinterpretatie vergroot) maar kan daarentegen wel eenvoudiger toegepast worden, ook door (relatieve) leken.

Uit de resultaten van de verschillende toepassingen leren we dat veranderingen en ingrepen in watersystemen kunnen doorwerken via feedbackrelaties. Het effect van maatregelen kan daarnaast afhangen van lokale eigenschappen, zoals landschapskenmerken. Dit onderstreept het belang van onderzoek naar interventies in watersystemen waarbij de interacties tussen deelsystemen worden meegenomen. De methoden die binnen dit project zijn ontwikkeld kunnen hierbij toegepast en verder ontwikkeld worden.

Wel blijft het een aandachtspunt dat de resultaten goed geduid moeten worden: hoewel de modellen en uitkomsten relatief inzichtelijk bleken voor een eerste groep gebruikers (deelnemers uit de watersector met de Watersysteemverkenner tijdens een werksessie in oktober 2023), bleek het voor hen niet altijd duidelijk welke processen wel en niet mee waren genomen in het model. Om deze reden adviseren wij de hier ontwikkelde modellen voornamelijk in te zetten voor gebruik door professionals, die zich bewust zijn van wat er 'onder de motorkap' zich afspeelt. De modellen zouden bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden bij verkennend onderzoek naar mogelijk geschikte interventies in bepaalde typen landschappen (waarna de kansrijke interventies vervolgens in meer detail uitgewerkt kunnen worden met behulp van ruimtelijk gedistribueerde modellen).

In de context van de huidige en verwachte vraagstukken in watersystemen liggen er veel uitdagingen, zowel op technisch-hydrologisch als op bestuurlijk, juridisch, maatschappelijk en economisch vlak, waarbij er ook nog vaak allerlei verschillende stakeholders betrokken zijn. Deze uitdagingen zijn inhoudelijk complex en onderling sterk

verweven, wat het des te lastiger maakt om geschikte oplossingen te bedenken en uit te voeren. Een belangrijk facet daarin is communicatie van de complexe kennis. Sankeydiagrammen bleken hierin reeds van nut. Watersysteendenken en de binnen dit onderzoek toegepaste methoden kunnen mogelijk van verder nut zijn bij het vereenvoudigen en toegankelijk maken van complexe hydrologische kennis en de effecten van maatregelen in watersystemen. Om dit beter mogelijk te maken is verdere ontwikkeling van de visualisatie van de uitvoer van watersysteemmodellen en afstemming met gebruikers gewenst.

8 Conclusies

Om oplossingen te vinden voor de huidige uitdagingen in het waterbeheer is vaak een regionale analyse van het watersysteem nodig. In dit rapport hebben we een overzicht gegeven van de componenten, hydrologische en antropogene stromen en afhankelijkheden die van belang zijn in een regionaal watersysteem en manieren waarop deze kunnen veranderen. Op basis van deze kennis zijn watersysteemmodellen ontwikkeld en toegepast voor verschillende cases.

Systeendenken en systeemdynamisch modelleren blijken geschikt te zijn om verkennend onderzoek te doen naar (de doorwerking van) interventies in het watersysteem, waarbij de ontwikkelde app 'Watersysteemverkenner' vrij breed toepasbaar is. De methoden geven inzicht in feedbackrelaties in het watersysteem, mogelijke effecten en (positieve of negatieve) bijwerkingen van interventies in het watersysteem. Voor meer algemene toepassing van de methoden en tools is verdere ontwikkeling en validatie gewenst. Dit kan parallel lopen aan geleidelijke toepassing van de methode.

9 Referenties

- Appelman, W., Creusen, R., Koeman, N., Paalman, M., Raterman, B., Voogt, W., 2013. Watervraag Glastuinbouw Haaglanden Deelrapport A, TNO, Utrecht.
- Arnold, R.D., Wade, J.P., 2015. A definition of systems thinking: A systems approach. *Procedia computer science*, 44: 669-678.
- Baggelaar, P.K., Geudens, P.J.J.G., 2017. Prognoses en scenario's drinkwatergebruik in Nederland, Vewin en Icastat.
<https://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Cijfers/Rapport%20Prognoses%20en%20scenarios%20drwgebruik%20NL.pdf>
- Bouziotas, D., van Duuren, D., van Alphen, H.-J., Frijns, J., Nikolopoulos, D., Makropoulos, C., 2019. Towards circular water neighborhoods: Simulation-based decision support for integrated decentralized urban water systems. *Water*, 11(6): 1227.
- Brakkee, E.A., Stofberg, S.F., 2022. Waterstromen in het Drentse watersysteem. Achtergrondrapportage: Ontwikkeling van een conceptueel model KWR 2022.047, KWR, Nieuwegein.
<https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/68647074>
- Brouwer, S., Salmon, S., Van Duuren, D., 2022. Kraanwaterbesparing in de praktijk. H2O,
[http://api.kwrwater.nl/uploads/2022/03/Brouwer-Salmon-van-Duuren-Kraanwaterbesparing-in-de-praktijk-H2O-Online-\(2022\)30-maart.pdf](http://api.kwrwater.nl/uploads/2022/03/Brouwer-Salmon-van-Duuren-Kraanwaterbesparing-in-de-praktijk-H2O-Online-(2022)30-maart.pdf).
- CBS, 2022. Bodemgebruik; uitgebreide gebruiksvorm per gemeente. CBS.
<https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/70262ned/table>
- CBS Statline, 2019. Watergebruik bedrijven en particuliere huishoudens; nationale rekeningen. Centraal Bureau voor de Statistiek. <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/82883NED/table?ts=1555497401962>
- de Louw, P., Kaandorp, V., Massop, H., Veldhuizen, A., 2020. Deltafact Berekening, STOWA Deltafacts. STOWA.
<https://edepot.wur.nl/535694>
- de Wit, J.A., Ritsema, C.J., van Dam, J.C., van den Eertwegh, G.A.P.H., Bartholomeus, R.P., 2022. Development of subsurface drainage systems: Discharge – retention – recharge. *Agricultural Water Management*, 269: 107677. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107677>
- Feddes, R., Kowalik, P., Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. H2O, 2022. Nog veel bedrijven moeten aan de slag met efficiënt watergebruik. H2O.
<https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-techniek/nog-veel-bedrijven-moeten-aan-de-slag-met-efficient-watergebruik>
- Helpdesk Water, 2022. Uitvoer Basisprognoses 2018 - Zoetwater.
<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/applicaties-per/watermanagement/watermanagement/nationaal-water-model/basisprognoses/basisprognoses-2018-zoetwater/uitvoer-bp-2018-zw/>
- KNMI, 2015. KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt.
- KNMI, 2023. KNMI'23-klimaatscenario's. <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/knmi-23-klimaatscenario-s>
- Koop, S., Van Dorssen, A., Brouwer, S., 2019. Enhancing domestic water conservation behaviour: A review of empirical studies on influencing tactics. *Journal of environmental management*, 247: 867-876.
- Krajenbrink, H., Stofberg, S., Bartholomeus, R., 2021a. RWZI als waterfabriek voor een robuuste watervoorziening, STOWA, Amersfoort. <https://www.stowa.nl/publicaties/rwzi-als-waterfabriek-voor-een-robuuste-watervoorziening>
- Krajenbrink, H.J., Handgraaf, S., Koeman-Stein, N.E., Cirkel, D.G., Stofberg, S.F., 2022. Juridisch kader aanvulling watersysteem met industrieel restwater (OPENBAAR). KWR 2022.102, KWR, Nieuwegein.
<https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/69265309>
- Krajenbrink, H.J., Stofberg, S.F., 2021. Het antropogene watersysteem van Noord-Brabant in beeld. KWR 2021.063, KWR, Nieuwegein. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/62836221>

- Krajenbrink, H.J., Stofberg, S.F., 2023. Effect van waterbesparing in stedelijk gebied op het regionale watersysteem. Casus SUPERLOCAL. KWR 2023.062, KWR, Nieuwegein.
- Krajenbrink, H.J., Stofberg, S.F., Bartholomeus, R.P., 2021b. RWZI als waterfabriek voor een robuuste watervoorziening. STOWA 2021-31, STOWA - KWR, Amersfoort.
<https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/62853272>
- Lykou, A. et al., 2023. Deliverable 3.5, B-WaterSmart.
- Martinez-Moyano, I.J., Richardson, G.P., 2013. Best practices in system dynamics modeling. System Dynamics Review, 29(2): 102-123. DOI:<https://doi.org/10.1002/sdr.1495>
- Phan, T.D., Bertone, E., Stewart, R.A., 2021. Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management. Cleaner Environmental Systems, 2: 100031.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100031>
- Pronk, G., Stofberg, S., Van Dooren, T., Dingemans, M., Frijns, J., Koeman-Stein, N., Smeets, P., Bartholomeus, R., 2021. Increasing water system robustness in The Netherlands: potential of cross-sectoral water reuse. Water Resources Management, 35(11): 3721-3735.
- Pronk, G.J., van Dooren, T.C.G.W., Stofberg, S.F., Bartholomeus, R.P., 2020. Waterhergebruik en de zoetwatervoorziening (Managementsamenvatting en dataoverzicht op dia's) BTO 2020.011, KWR, Nieuwegein. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/60884959>
- Rubio-Martin, A., Pulido-Velazquez, M., Macian-Sorribes, H., Garcia-Prats, A., 2020. System Dynamics Modeling for Supporting Drought-Oriented Management of the Jucar River System, Spain. Water, 12(5): 1407.
<https://www.mdpi.com/2073-4441/12/5/1407>
- Simonovic, S.P., Rajasekaram, V., 2004. Integrated analyses of Canada's water resources: a system dynamics approach. Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques, 29(4): 223-250.
- Stofberg, S.F., Bartholomeus, R.P., Van den Eertwegh, G.A.P.H., Raat, K.J., 2021a. Hergebruik van gezuiverd restwater in de landbouw. Subirrigatie met RWZI effluent Haaksbergen 2015-2019, KWR, Nieuwegein.
- Stofberg, S.F., Bertelkamp, C., van Huijgevoort, M.H.J., Bauerlein, P.S., 2019. VO Alternatieve bronnen voor drinkwater Achtergronddocument inventarisatie alternatieve bronnen. BTO 2019.017, KWR, Nieuwegein. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/59515504>
- Stofberg, S.F., Brakkee, E.A., 2022. Effecten watermaatregelen in beeld KWR 2022.074, KWR, Nieuwegein.
<https://www.brabant.nl/-/media/29623fbd46104b5284683b2d9bd2ab9b.pdf>
- Stofberg, S.F., Brakkee, E.A., Broers, H.J.M., 2022a. Naar een langetermijnvisie op de drinkwatervoorziening voor Drenthe. Fase 1., KWR, Nieuwegein.
- Stofberg, S.F., Ros, S., Raat, K., Klooster, J., Ruerpert, N., Agerbeek, B., Delsman, J., Bootsma, H., Op den Kelder, T., Van der Veen, B., 2021b. COASTAR Waterbank Westland. Droge voeten, voldoende gietwater, KWR, Nieuwegein.
- Stofberg, S.F., van Engelenburg, J., Broers, E., 2023. Klimateffecten op drinkwaterwinningen. BTO 2023.065, KWR, Nieuwegein. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/71008657>
<https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/71007435>
- Stofberg, S.F., van Huijgevoort, M., 2024a. De Watersysteemverkenner, KWR, Nieuwegein.
- Stofberg, S.F., van Huijgevoort, M., 2024b. Inzicht in het watersysteem door toepassing van een systeemmodel, KWR, Nieuwegein.
- Stofberg, S.F., van Huijgevoort, M.H.J., Brakkee, E.A., Bartholomeus, R.O., 2022b. Beschikbare kennis van stromen in het watersysteem. Dataverzameling voor conceptuele watersysteemmodellen. KWR 2022.072, KWR, Nieuwegein. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/68839218>
- Turner, B.L., Menendez III, H.M., Gates, R., Tedeschi, L.O., Atzori, A.S., 2016. System dynamics modeling for agricultural and natural resource management issues: Review of some past cases and forecasting future roles. Resources, 5(4): 40.
- Unie van Waterschappen, Vewin, 2021. Water verbindt.
<https://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Nieuws-2021/Samenwerkingsagenda%20Unie%20Vewin%20%27Water%20verbindt%27.pdf>
- van Aalderen, N., Stofberg, S.F., van den Broeke, J., 2023. Serious game watersysteem Groningen - Aqua Ludens. BTO 2023.079, KWR, Nieuwegein. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/71251304>
- van Huijgevoort, M., Brakkee, E., Stofberg, S., in voorbereiding. Regional water system analysis: Case studies Woumen & Mechelen, KWR.
- Vewin, 2022. Vewin Drinkwaterstatistieken 2022, Vewin, Den Haag.
<https://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Cijfers/Vewin-Drinkwaterstatistieken-2022-NL-WEB.pdf>

- Vlaanderen.be, 2023. Regenwater hergebruiken. Digitaal Vlaanderen. <https://www.vlaanderen.be/regenwater-hergebruiken>
- Waterforum, 2017. Kristalbad zet Overijssel internationaal op de kaart. Waterforum, <https://www.waterforum.net/kristalbad-zet-overijssel-internationaal-op-de-kaart/>.
- Waterforum, 2022. Goedkoop drinkwater fnuikend voor businesscase waterbesparingsprojecten SABIC, Waterforum. ACQUIMEDIA. <https://www.waterforum.net/goedkope-drinkwaterprijs-fnuikend-voor-businesscase-waterbesparingsprojecten-sabic/>
- Wendt, D.E., Bloomfield, J.P., Van Loon, A.F., Garcia, M., Heudorfer, B., Larsen, J., Hannah, D.M., 2021. Evaluating integrated water management strategies to inform hydrological drought mitigation. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21(10): 3113-3139. DOI:10.5194/nhess-21-3113-2021
- Witte, J.-P.M., Zaadnoordijk, W.J., Buyse, J.J., 2019. Forensic Hydrology Reveals Why Groundwater Tables in The Province of Noord Brabant (The Netherlands) Dropped More Than Expected. Water, 11(3): 478. <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/3/478>
- Wolters, H.A., Hunink, J., Delsman, J., De Lange, G., Van den Born, G.J., Reinhard, S., 2018a. Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017, Achtergrondinformatie over gebruiksfuncties en sectoren, Deltares, Utrecht. https://media.deltares.nl/deltascenarios/Deltascenarios_actualisering2017_achtergrondrapport.pdf
- Wolters, H.A., Van den Born, G.J., Dammers, E., Reinhard, S., 2018b. Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017, Deltares, Utrecht. https://media.deltares.nl/deltascenarios/Deltascenarios_actualisering2017_hoofdrapport.pdf