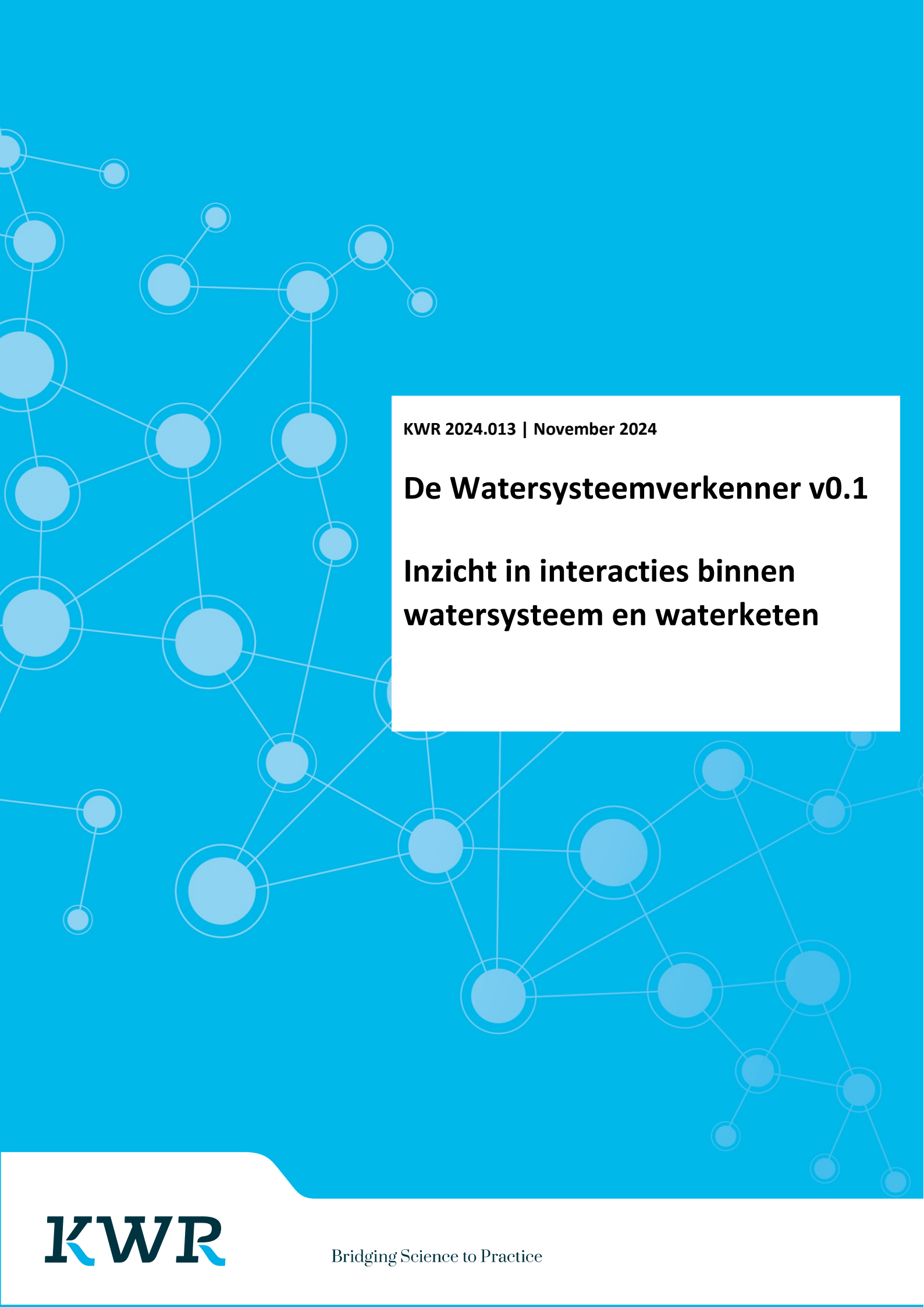


A network diagram with light blue circles of varying sizes connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles are distributed across the page, with some larger circles acting as hubs and many smaller ones as peripheral nodes.

KWR 2024.013 | November 2024

De Watersysteemverkenner v0.1

**Inzicht in interacties binnen
watersysteem en waterketen**

Colofon

De Watersysteemverkenner v0.1 - Inzicht in interacties binnen watersysteem en waterketen

KWR 2024.013 | November 2024

Opdrachtnummer

403664

Projectmanager

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

Kwaliteitsborger

Prof. dr. ir. Ruud Bartholomeus

Verzonden naar

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

Keywords

systeemdynamisch modelleren, maatregelen watertransitie

Jaar van publicatie
2024

Meer informatie
Sija Stofberg
T 030 606 9569
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

wice by KWR

KWR

November 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.

Samenvatting

Binnen het onderzoeksprogramma Water in de Circulaire Economie (WiCE) is de Watersysteemverkenner ontwikkeld. De Watersysteemverkenner is een simulatietool gemaakt om het gedrag van 'typische' regionale watersystemen, zoals kleine stroomgebieden en polders, en de mogelijke (doorwerking van) effecten van maatregelen daarin in algemene zin te leren kennen.

De ontwikkeling van de Watersysteemverkenner heeft plaatsgevonden binnen een bredere verkenning naar methoden om te werken aan interventies in watersystemen (Stofberg et al. 2024). Het model is ontwikkeld vanuit principes van het systeemdenken en op basis van de technieken van systeemdynamisch modelleren. Het is een grof model van interacties tussen deelsystemen binnen een regionaal watersysteem. De Watersysteemverkenner is vooral bedoeld om met beperkte rekentijd een grof beeld te verkrijgen van de dynamiek die op kan treden in 'typische' watersystemen als gevolg van interactie van verschillende deelsystemen in het hydrologische en antropogene watersysteem.

De Watersysteemverkenner bestaat uit twee basisonderdelen:

- een watersysteemmodel, dat waterstromen in het watersysteem simuleert
- een interface, die gebruikers in staat stelt om het model te bedienen en uitvoer te vergelijken

In deze rapportage zijn de technische aspecten van de tool vastgelegd, waaronder de modelschematisatie, werking van het model, invoerparameters en initiële condities en uitvoer (variabelen, grafieken, Sankey-diagrammen). Ook is een lijst opgesteld met gewenste ontwikkelingen en uitbreidingen, om de tool te verbeteren en breder toepasbaar te maken. Aangezien de Watersysteemverkenner nog in ontwikkeling is, is deze nog niet openbaar beschikbaar.

De opzet van de tool maakt het mogelijk geleidelijk aan verbeteringen door te voeren. Aanpassingen zullen ook steeds worden doorgevoerd in dit document (aangegeven met versienummers).

Inhoud

1	Inleiding	5
2	Schematisatie en discretisatie	8
2.1	Schematisatie	8
2.2	Discretisatie	9
2.3	Variabelen, parameters en eenheden	12
3	Interventies	16
4	Werking systeemdynamisch model	17
4.1	Oppervlakken en niveaus	17
4.2	Hydrologische stromen en voorraden	17
4.3	Antropogene waterstromen	21
5	Invoer, parameterisatie en initiële condities	26
5.1	Inleiding	26
5.2	Uitgangspunten, definities en parameters	26
5.3	Initiële condities	34
6	Interface en uitvoer	36
6.1	Inleiding	36
6.2	Invoer	36
6.3	Overzicht huidig model	36
6.4	Sankeydiagram	37
6.5	Vergelijking	38
7	Gewenste wijzigingen, uitbreidingen en toepassingen	42
7.1	Inleiding	42
7.2	Het watersysteemmodel	42
7.3	Invoer, parameterisatie, kalibratie en validatie	43
7.4	De interface	44
7.5	Mogelijke toepassingen	44
8	Referenties	45

1 Inleiding

Nederlandse watersystemen staan voor grote uitdagingen, om enerzijds alle functies van voldoende water te voorzien en anderzijds ook een teveel aan water te voorkomen. Waar voorheen het systeem vrij lineair benaderd kon worden (namelijk vooral gefocust op afvoer), vragen de huidige uitdagingen om inzicht in de verschillende typen interacties tussen watersysteem en waterketen (een systeembenadering) om slimme keuzes te maken voor maatregelen (Stofberg et al. 2024). Veel van de tools en modellen die toegepast worden zijn vooral bedoeld om één of enkele deelsystemen (bijvoorbeeld grondwater of oppervlaktewater) te simuleren, of zijn complex met zeer lange rekentijden, en zijn daardoor niet goed geschikt om allerlei verschillende maatregelen te vergelijken.

Binnen het onderzoeksprogramma Water in de Circulaire Economie (WiCE) is daarom de Watersysteemverkenner ontwikkeld. De Watersysteemverkenner is een simulatietool gemaakt om het gedrag van ‘typische’ regionale watersystemen, zoals kleine stroomgebieden en polders, en de mogelijke (doorwerking van) effecten van maatregelen daarin in algemene zin te leren kennen.

De ontwikkeling van deze tool heeft plaatsgevonden binnen een bredere verkenning naar methoden om te werken aan interventies in watersystemen (Stofberg et al. 2024). Het model is ontwikkeld vanuit principes van het *systeemdenken* (Arnold en Wade 2015), en op basis van de technieken van systeemdynamisch modelleren. Het is een grof model van interacties tussen deelsystemen binnen een regionaal watersysteem. De Watersysteemverkenner is vooral bedoeld om met beperkte rekentijd een grof beeld te verkrijgen van de dynamiek die op kan treden in ‘typische’ watersystemen als gevolg van interactie van verschillende deelsystemen in het hydrologische en antropogene watersysteem.

De tool bestaat uit twee basisonderdelen:

- een watersysteemmodel, dat waterstromen in het watersysteem simuleert
- een interface, die gebruikers in staat stelt om het model te bedienen en uitvoer te vergelijken

Het model betreft een set aan scripts die geschreven zijn in R (R Core Team 2024) en de interface is ontwikkeld met behulp van Shiny (Posit 2024). In de interface worden alle resultaten uit het model bij elkaar gebracht en op verschillende tabbladen getoond. Ook kunnen makkelijk resultaten voor verschillende scenario's met elkaar vergeleken worden, zowel in grafieken als tabellen. Figuur 1-1, Figuur 1-2 en Figuur 1-3 geven een aantal voorbeelden van de resultaten van de Watersysteemverkenner in de ontwikkelde interface.

Het model betreft een sterk vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid, met vrijwel geen ruimtelijke variatie. Het model simuleert de interacties tussen het hydrologische en antropogene systeem. Voor het hydrologische systeem wordt een studiegebied opgedeeld in vier verschillende landgebruikstypen: landbouw, stedelijk gebied, natte natuur en droge natuur. Per landgebruikstype wordt één grondwaterstand bepaald. Voor het antropogene systeem worden de industrie, RWZI's, drinkwatervoorziening en watergebruik door huishoudens meegenomen. Elke sector (landbouw, drinkwatervoorziening, industrie) kan water onttrekken uit grond- of oppervlaktewater en water lozen op oppervlaktewater (RWZI, industrie) indien van toepassing in het gebied. De modelvergelijkingen kunnen flexibel worden toegepast voor verschillende typen landgebruik: polders en vrij afwaterende gebieden, mét en zonder mogelijkheden tot wateraanvoer.

Zoals bij elk model is het belangrijk om te weten voor welk gebruik het geschikt is, lettende op de gebruikte aannames en modelkeuzes. De Watersysteemverkenner is geschikt voor:

- Verkenning van processen en interacties tussen processen die mogelijk in regionale watersystemen kunnen voorkomen
- Verkenning van mogelijke (doorwerking van) effecten van maatregelen in regionale watersystemen

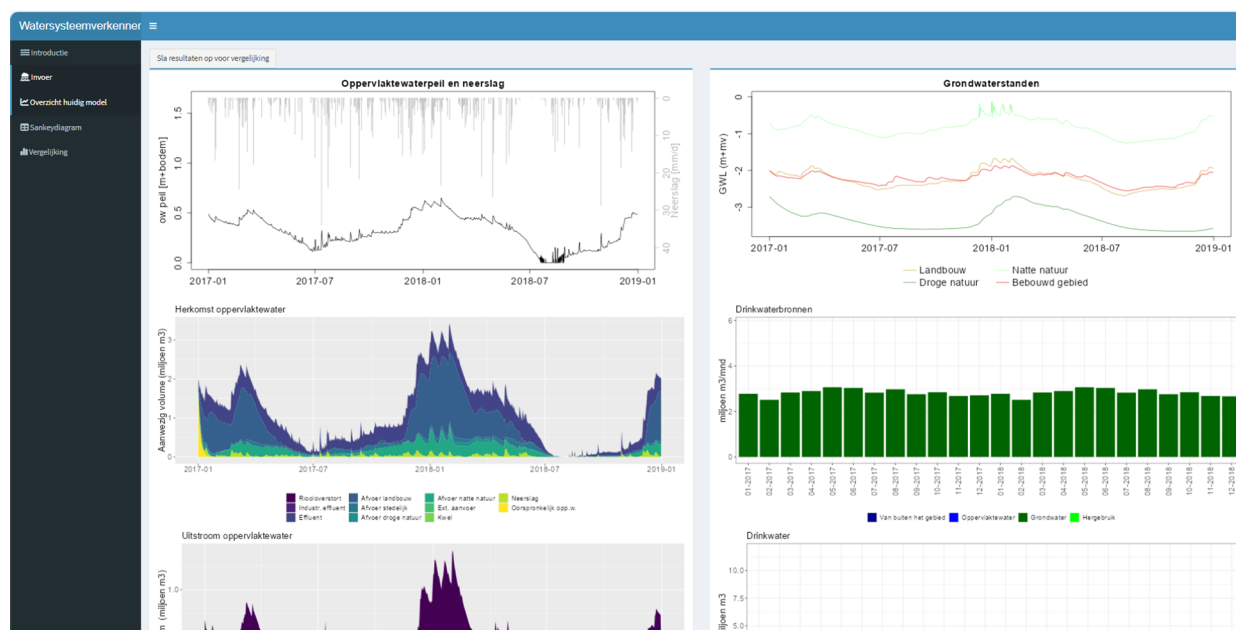
De Watersysteemverkenner is niet geschikt voor:

- Ruimtelijk expliciete voorspellingen met betrekking tot specifieke locaties of gebieden. Hiervoor zijn ruimtelijk gedistribueerde modellen nodig. Veel ruimtelijk expliciete modellen bevatten geen dynamische interactie tussen watersysteem en waterketen, of kennen zeer lange rekentijden, waardoor deze niet geschikt zijn om een groot aantal (combinaties van) maatregelen te verkennen.

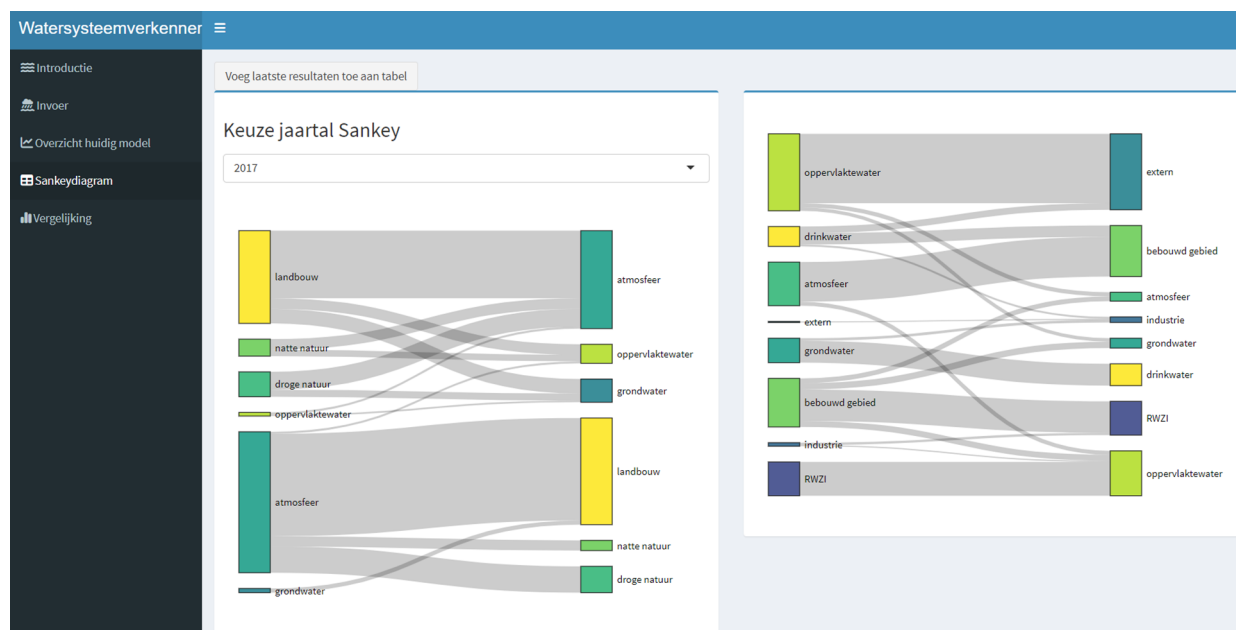
Op het moment van schrijven is de tool nog in een staat van ontwikkeling en vooralsnog alleen toegepast voor een casus op de hoge zandgronden (Stofberg en van Huijgevoort 2024). De tool is daarom nog niet openbaar beschikbaar.

In deze rapportage zijn de technische aspecten van de tool vastgelegd, waaronder de modelschematisatie, werking van het model, invoerparameters en initiële condities en uitvoer (variabelen, grafieken, Sankey-diagrammen). Ook is een lijst opgesteld met gewenste ontwikkelingen en uitbreidingen, om de tool te verbeteren en breder toepasbaar te maken.

De opzet van de tool maakt het mogelijk geleidelijk aan verbeteringen door te voeren. Aanpassingen zullen ook steeds worden doorgevoerd in dit document (aangegeven met versienummers).



Figuur 1-1 Voorbeeld van één van de tabbladen uit de interface van de Watersysteemverkenner. In het tabblad 'Overzicht huidige model' wordt informatie voor verschillende variabelen getoond, zoals tijdreeksen van het oppervlaktewaterpeil en neerslag, tijdreeksen van grondwaterstanden, herkomst en uitstroom van oppervlaktewater over de tijd en verschillende bronnen voor drinkwater over de tijd.



Figuur 1-2 Voorbeeld van één van de tabbladen uit de interface van de Watersysteemverkenner. Het tabblad 'Sankeydiagram' geeft de waterstromen in het model weer.

Omvang waterstroom (miljoen m3/jaar)	Scenario 1	Scenario 2
Neerslag op landbouw	329.1	329.1
Neerslag op oppervlaktewater (direct)	6.2	6.2
Neerslag op natte natuur	32.8	32.8
Neerslag op droge natuur	84.4	84.4
Verdamping landbouw	217.1	217.2
Uitstroom landbouw naar oppervlaktewater	34	30.3
Wegzijging landbouw naar dieper grondwater	46.6	50.3
Verdamping uit oppervlaktewater	6.4	6.4
Onttrekking landbouw uit oppervlaktewater	0	0
Wegzijging oppervlaktewater naar dieper grondwater	5.4	5.5
Onttrekking landbouw uit grondwater	13.4	13.4
Verdamping uit natte natuur	33.9	33.9
Uitstroom natte natuur naar oppervlaktewater	20.7	19.7
Wegzijging natte natuur naar dieper grondwater	-31.2	-30.9

Figuur 1-3 Tabel waarin waterstromen tussen scenario's vergeleken kunnen worden in het tabblad 'Sankeydiagram' in de Watersysteemverkenner. Oranje kleuren geven een afname aan, paarse kleuren een toename.

2 Schematisatie en discretisatie

2.1 Schematisatie

De schematisatie van het model is weergegeven in Figuur 2-1 en Figuur 2-2. Er worden verschillende componenten van het watersysteem meegenomen in het model:

- **Oppervlaktewater (ow).** Dit kan alle vormen van oppervlaktewater betreffen, zoals rivieren of beken, kanalen en sloten. In regionale systemen betreft het vaak de kleinere wateren, terwijl grotere wateren vaak als systeemgrens dienen. Vooralsnog kan er in het model één oppervlaktewaterdomein worden gedefinieerd.
- **Diep grondwater (gw).** Er wordt onderscheid gemaakt tussen de freatische grondwaterstand in de verschillende landgebruikstypen en een diepere grondwaterstand. De diepere grondwaterstand bepaalt de wegzijging of kwel en wordt voor elk landgebruikstype op dezelfde manier geparameteriseerd.
- **Stedelijk gebied.** Het stedelijk gebied is een verzamelnaam voor huishoudens en bedrijven (die drinkwater ontvangen en restwater lozen op het riool) en verharde oppervlakken waarop regenwater terecht komt, dat vervolgens via een gecombineerd of gescheiden rioolstelsel wordt afgevoerd.
- **Landbouw (lb).** Vanuit een watersysteemperspectief betreft de landbouw het landoppervlak en de onderliggende wortelzone waarop landbouw plaatsvindt.
- **Natuur (nat).** Vanuit een watersysteemperspectief betreft de natuur het landoppervlak en de onderliggende wortelzone waarop natuurlijke ecosystemen zich bevinden. Het gaat hier om grondwaterafhankelijke natuur.
- **Natuur (droog).** Vanuit een watersysteemperspectief betreft de natuur het landoppervlak en de onderliggende wortelzone waarop natuurlijke ecosystemen zich bevinden. Het gaat hier om grondwateronafhankelijke natuur.
- **Industrie (ind).** Industrie is de verzamelnaam voor grootzakelijke gebruikers van water en/of producenten van restwater.
- **Afvalwaterzuiveringsinstallaties (AWZIs)** betreffen rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZIs) en industriële afvalwaterzuiveringsinstallaties (IAZIs) die restwater ontvangen en na zuivering lozen op het oppervlaktewater.
- **Drinkwaterproductie (dw).** Dit betreft de drinkwaterproductie door drinkwaterbedrijven, waarbij onttrokken water (doorgaans grond- of oppervlaktewater) wordt gezuiverd tot drinkwater en vervolgens naar klanten wordt gedistribueerd.
- **Huishoudens.** Het drinkwaterverbruik en de aanvoer naar een RWZI vanuit huishoudens wordt apart meegenomen in het model.
- **Extern.** Dit betreft wateraanvoer en -afvoer van en naar een gebied buiten het gemodelleerde gebied. Zo kan bijvoorbeeld geloosd worden op grote wateren of drinkwater worden geproduceerd voor gebruikers buiten het gebied.

Er worden enkele aannames gedaan voor de basismodellen voor verschillende typen watersystemen:

Specifiek voor poldersysteem:

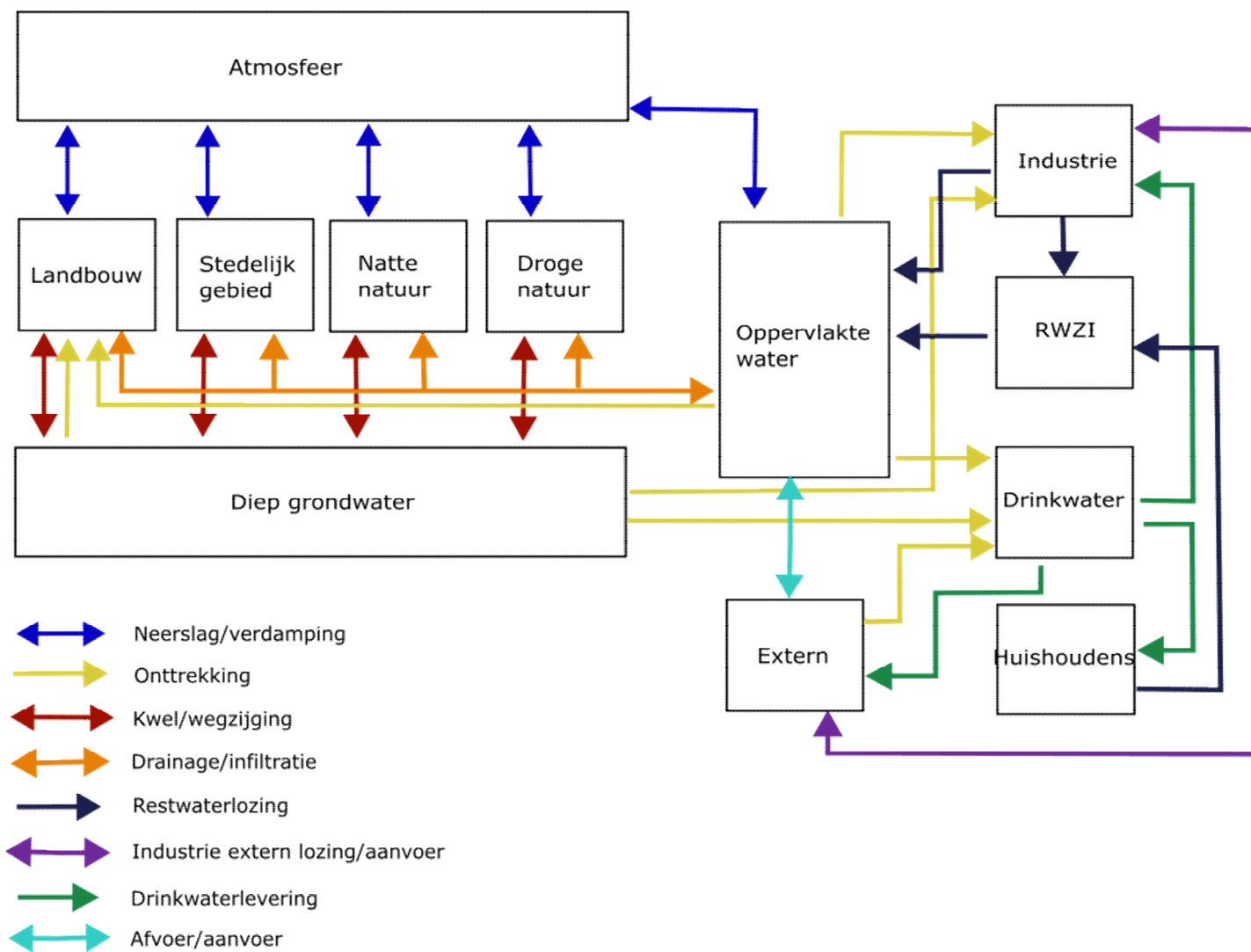
- In laag Nederland is de drinkwaterwinning doorgaans uit oppervlaktewater uit de grotere oppervlaktewateren of anderszins van buiten het regionale systeem, waarbij sprake kan zijn van een combinatie met duinfiltratie binnen het systeem.
- In typische poldersystemen hoeft het aandeel 'natuur' niet apart gemodelleerd te worden, omdat het veelal bestaat uit oppervlaktewater en weide-achtige natuur.

Specifiek voor vrij afwaterend systeem:

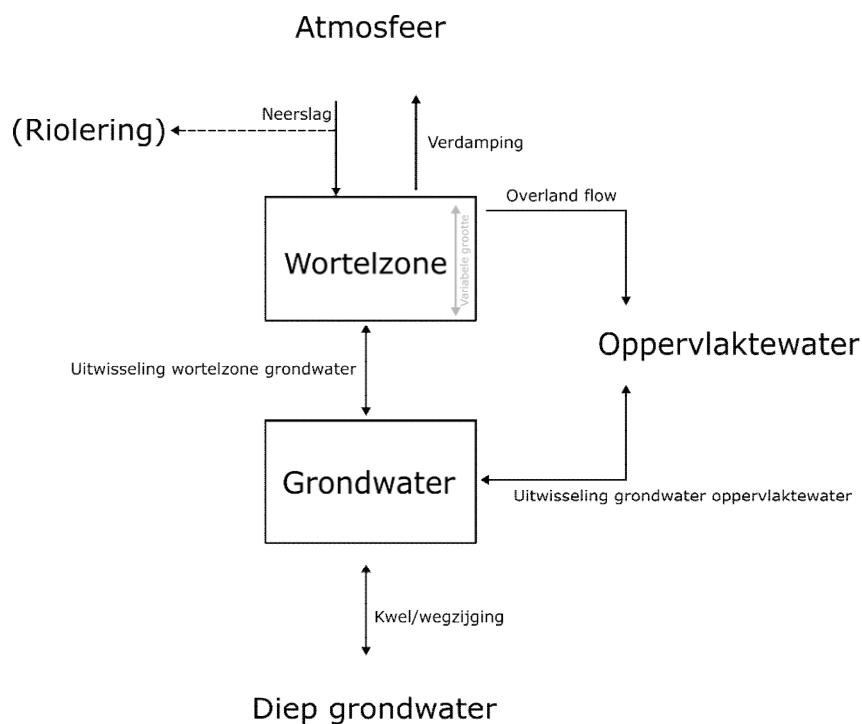
- In hoog Nederland wordt drinkwater veelal gewonnen uit grondwater.

2.2 Discretisatie

De tijdsdiscretisatie is in te stellen. Vooralsnog is gekozen voor een vaste tijdsstap van 0.5 dag, omdat hiermee veel typische patronen in de testsituaties tot hun recht konden komen (zowel seizoenspatronen als neerslagpatronen) en numerieke stabiliteitsproblemen voorkomen werden.



Figuur 2-1. Schematische weergave van de Watersysteemverkenner.



Figuur 2-2. Schematisatie van de verschillende vormen van landgebruik. Voor het stedelijke gebied geldt dat een deel van de neerslag op verharding valt en via riolering wordt afgevoerd.

2.3 Variabelen, parameters en eenheden

De parameters en gegevens die als invoer in het model gebruikt worden, zijn beschreven in Tabel 2-1. Hierbij verwijst de grootheid L naar lengte en T naar tijd.

Tabel 2-1. Invoergegevens en parameters in de Watersysteemverkenner.

Parameter	Eenheid	Grootheid	Omschrijving
<i>Algemene eigenschappen</i>			
<i>P</i>	mm/d	L/T	Neerslag van KNMI
<i>ET_{ref}</i>	mm/d	L/T	Referentieverdamping van KNMI
<i>Timestep</i>	d	T	Tijdstap model
<i>Total area</i>	m ²	L ²	Totale oppervlakte studiegebied
<i>Urban_per</i>	%	%	Percentage stedelijk gebied van totale oppervlakte
<i>Agriculture_per</i>	%	%	Percentage landbouw van totale oppervlakte
<i>Surface_water_per</i>	%	%	Percentage oppervlaktewater van totale oppervlakte
<i>Nature_dry_per</i>	%	%	Percentage droge natuur van totale natuuroppervlakte
<i>Level_{sea}</i>	M	L	Zeeniveau; wordt gebruikt als referentieniveau
<i>Level_{sw_base}</i>	M	L	Bodemhoogte oppervlaktewater
<i>Level_{surf_agri}</i>	M	L	Maaiveldhoogte landbouw
<i>Level_{surf_urban}</i>	M	L	Maaiveldhoogte stedelijk gebied
<i>Level_{surf_nature_wet}</i>	M	L	Maaiveldhoogte natte natuur
<i>Level_{surf_nature_dry}</i>	M	L	Maaiveldhoogte droge natuur
<i>Sw_level_ini</i>	M	L	Beginwaarde oppervlaktepeil t.o.v. referentieniveau
<i>Head_gwdeep</i>	M	L	Gemiddelde stijghoogte wvp1
<i>Niveaubovenwaterbodem_agri</i>	M	L	Maaiveldniveau landbouw t.o.v. bodem oppervlaktewater (diepte van ontwatering)
<i>niveaubovenwaterbodem_urban</i>	m	L	Maaiveldniveau stedelijk gebied t.o.v. bodem oppervlaktewater (diepte van ontwatering)
<i>niveaubovenwaterbodem_nature_wet</i>	m	L	Maaiveldniveau natte natuur t.o.v. bodem oppervlaktewater (diepte van ontwatering)
<i>niveaubovenwaterbodem_nature_dry</i>	m	L	Maaiveldniveau droge natuur t.o.v. bodem oppervlaktewater (diepte van ontwatering)
<i>Talud</i>	-		Talud oevers oppervlaktewater
<i>Manning_n</i>	s/m ^{1/3}	T/L ^{1/3}	Manning-coëfficiënt
<i>Verhang</i>	m/km	L/L	Relatieve hoogteverschil van de waterloop

Industrie			
<i>Demand_ind_mj</i>	m ³ /m ² /j	L ³ /L ² /T	Totale jaarlijkse watervraag industrie
<i>Fraction_ext</i>	-	-	Fractie watervraag externe bron
<i>Fraction_sw</i>	-	-	Fractie watervraag oppervlaktewater
<i>Fraction_dw</i>	-	-	Fractie watervraag drinkwater
<i>Fraction_gw</i>	-	-	Fractie watervraag grondwater
<i>Fraction_restwater</i>	-	-	Fractie gebruikt water dat restwater wordt
<i>Fraction_wwtp</i>	-	-	Fractie restwater dat naar AWZI gaat
AWZI			
<i>Sewage_cap_m</i>	m/d	L/T	Rioolcapaciteit stedelijk gebied
<i>Limit_overflow_m</i>	m/d	L/T	Grens riooloverstort
<i>Factor_prec_sewage</i>	-	-	Deel van stedelijk gebied waarvan neerslag afgevoerd wordt naar riool
<i>Reusepotentialfactor</i>	-	-	Deel van influent dat potentieel hergebruikt kan worden
Stedelijk gebied			
<i>St</i>	-	-	Bodemtype: zand, veen of klei
<i>Drainageres</i>	d	T	Drainageweerstand
<i>Ct</i>	-	-	Gewastype
<i>Dis_gr</i>	-	-	Deel van stadsoppervlak dat groen is
<i>Depth_sewage</i>	m	L	Diepte waarop riolering is aangelegd
<i>Drainageres_sewage</i>	d	T	Drainageweerstand riolering
Landbouw			
<i>St</i>	-	-	Bodemtype: zand, veen of klei
<i>Drainageres</i>	d	T	Drainageweerstand
<i>Fraction_area_irr</i>	-	-	Deel van het oppervlak waar irrigatie plaats kan vinden
<i>Irr_ineff</i>	-	-	Verliezen irrigatie
<i>Fraction_irr_sw</i>	-	-	Fractie van irrigatie uit oppervlaktewater
<i>Irr_gw_source</i>	-	-	Onttrekking uit freatisch of diep grondwater
<i>Ct</i>	-	-	Gewastype
Natte natuur			
<i>St</i>	-	-	Bodemtype: zand, veen of klei
<i>Ct</i>	-	-	Gewastype
<i>Drainageres</i>	d	T	Drainageweerstand
Droge natuur			
<i>St</i>	-	-	Bodemtype: zand, veen of klei
<i>Ct</i>	-	-	Gewastype
<i>Drainageres</i>	d	T	Drainageweerstand

Diep grondwater			
<i>D</i>	m	L	Dikte van eerste watervoerende pakket
<i>S</i>	m ⁻¹	L ⁻¹	Elastische berging per m pakketdikte
Drinkwatervoorziening			
<i>Loss</i>	%	%	Verlies bij productie en distributie
<i>Use_pp</i>	m ³ /d	L ³ /T	Verbruik per persoon
<i>Fraction_dw_sw</i>	-	-	Deel van drinkwatervraag uit oppervlaktewater
<i>Factor_locally_produced</i>	-	-	Deel van drinkwatervraag dat lokaal geproduceerd wordt
<i>Daily_pars1</i>	-	-	Parameters voor berekenen van dagelijkse factor watervraag t.o.v. jaarlijkse vraag
<i>Daily_pars2</i>	-	-	
<i>Daily_pars3</i>	-	-	
<i>Population</i>	-	-	Aantal inwoners
<i>dw_businesses_rel_to_pop</i>	-	-	Waterverbruik zakelijke niet-industriële klanten t.o.v. waterverbruik huishoudens

Er zijn verschillende parameters in het model die specifieke waarden krijgen per type watersysteem (Tabel 2-2).

Tabel 2-2 Parameters met specifieke waarden per type watersysteem.

Parameter	Eenheid	Omschrijving
<i>Etfactor</i>	-	Factor open-water verdamping
<i>Level_out</i>	m	Grens bemaling of afvoer in meters boven niveau waterbodemb; boven dit niveau zal afvoer plaatsvinden
<i>Cap_out</i>	miljoen m ³ /d	Capaciteit polderbemaling
<i>Cap_supply</i>	miljoen m ³ /d	Capaciteit externe aanvoer oppervlaktewater
<i>Level_supply</i>	m	Peil waarbij aanvoer start
<i>Resistance</i>	d	Weerstand tussen bodem oppervlaktewater en dieper grondwater
<i>Resistance_sea</i>	d	Weerstand tussen diep grondwater en zee

De waarden van de parameters in Tabel 2-3 worden bepaald per type landgebruik, waarbij voor landbouw een keuze gemaakt kan worden rondom het gewas (vooralsnog gras of mais). De eigenschappen gelden voor het gehele type landgebruik.

Tabel 2-3 Parameters bepaald per type landgebruik.

Parameter	Eenheid	Omschrijving
<i>Cropfactor</i>	-	Gewasfactor verdamping binnen het groeiseizoen
<i>Fraction_cf_not_growingseason</i>	-	Fractie van de gewasfactor buiten het groeiseizoen (wordt toegepast voor landbouw in geval van oogst/verwijderen gewas)
<i>Depth_rootzone</i>	m	Dikte wortelzone
<i>Red_et_low_h</i>	cm	Grens drukhoogte voor droogtestress (evapotranspiratiereductie door te droog)
<i>Red_et_high_h</i>	cm	Grens drukhoogte voor natstress (evapotranspiratiereductie door te nat)
<i>Irr_threshold</i>	-	Evapotranspiratiereductiewaarde waarbij irrigatie gewenst wordt

De bodemfysische parameters (Tabel 2-4) zijn afhankelijk van het bodemtype, dat gedefinieerd wordt per landgebruikstype.

Tabel 2-4 Bodemfysische parameters voor de Mualem van Genuchten vergelijking.

Parameter	Eenheid	Omschrijving
θ_{rR}	cm^3/cm^3	θ_r , resterend watergehalte
θ_{rS}	cm^3/cm^3	θ_s , watergehalte bij verzadiging
α	1/cm	Vormparameter α
m	-	Vormparameter n
l	-	Vormparameter l
K_s	cm/d	Verzadigde doorlatendheid

3 Interventies

Er zijn verschillende interventies in het watersysteem mogelijk in het model. Vooralsnog zijn deze gericht op droogtmaatregelen, verdeeld in drie categorieën: minder watergebruik, meer water vasthouden en aanvullen, en waterhergebruik.

Minder watergebruik

Onder deze categorie vallen de volgende interventies:

- Onttrekingsverbod uit het oppervlaktewater voor de landbouw: er mag geen water meer onttrokken worden door de landbouw uit het oppervlaktewater.
- Onttrekingsverbod uit het grondwater voor de landbouw: er mag geen water meer onttrokken worden door de landbouw uit het grondwater.
- Campagne voor het verminderen van drinkwatergebruik tijdens droogte: de piekvraag naar drinkwater tijdens een droge periode neemt af.

Meer water vasthouden en aanvullen

De volgende interventies vallen in deze categorie:

- Afkoppelen van stedelijk gebied van het riool voor de opvang van regenwater: regenwater wordt niet opgevangen via het riool, maar infiltreert in het stedelijk gebied.
- Verhoging van de oppervlaktewaterpeilen: via een stuw worden de peilen hoger gezet.
- Verhoging van de slootbodem.
- Hermeandering om de oppervlaktewaterafvoer te vertragen: deze maatregel is alleen toepasbaar in vrij afwaterende gebieden.
- Infiltratie van oppervlaktewater in hoger gelegen natuur tijdens de wintermaanden: deel van het oppervlaktewater wordt geïnfiltreerd in de winter. De hoeveelheid wordt bepaald via een invoerparameter.

Waterhergebruik

Hierbij wordt uitgegaan van hergebruik van AWZI effluent. De droogweerafvoer kan worden ingezet als vervanging van grondwateronttrekkingen in verschillende sectoren: landbouw, industrie, drinkwater. Daarnaast kan effluent geïnfiltreerd worden in grondwateronafhankelijke natuurgebieden. Bij de verdeling van het effluent over de verschillende maatregelen mag de inzet nooit boven de 100% komen.

Voor het doorvoeren van de interventies zijn een aantal nieuwe parameters nodig, zie Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Parameters voor het toepassen van de interventies.

Parameter	Eenheid	Omschrijving	Interventie
<i>Maxinf_ow</i>	m/d	Infiltratiesnelheid van oppervlaktewater in droge natuur	Infiltratie van oppervlaktewater in hoger gelegen natuur tijdens de wintermaanden
<i>Maxinf_partofow</i>	-	Fractie van het oppervlaktewater dat geïnfiltreerd kan worden in droge natuur	Infiltratie van oppervlaktewater in hoger gelegen natuur tijdens de wintermaanden

4 Werking systeemdynamisch model

In dit hoofdstuk worden de modelvergelijkingen beschreven en zo nodig toegelicht. Een groot deel van de vergelijkingen wordt altijd toegepast, andere vergelijkingen kunnen verschillen afhankelijk van het gekozen landschap (polderlandschap of vrij afwaterend). De beschrijvingen zijn in dit hoofdstuk beknopt en technisch van aard; in hoofdstuk 5 wordt voor de verschillende onderdelen in meer detail beschreven hoe deze zijn, of kunnen worden, geparametriseerd.

4.1 Oppervlakken en niveaus

Oppervlak landgebruik

Voor ieder type landgebruik wordt het oppervlak bepaald door het percentage van het betreffende landgebruik te vermenigvuldigen met het totale oppervlak.

Oppervlak natuur en overig terrein

Voor het oppervlak van natuur en overig terrein geldt dat het geen invoerparameter is, maar dat het wordt berekend als rest ten opzichte van de overige oppervlakken (landbouw, bebouwd gebied en oppervlaktewater). De verdeling tussen grondwaterafhankelijke en grondwateronafhankelijke natuur wordt bepaald door de invoerparameter *Nature_dry_per*.

Niveau landoppervlak en ontwatering

Voor ieder type landgebruik wordt een gemiddeld niveau van het landoppervlak gedefinieerd. Dit niveau is vooral van belang voor de bepaling van de uitwisseling met het diepere grondwater (waarbij verondersteld wordt dat de stijghoogte gelijk is over het hele gebied). Wat betreft de uitwisseling tussen grondwater en oppervlaktewater wordt verondersteld dat bij ieder type landgebruik de bodem van het oppervlaktewater zich op een bepaalde (in te voeren) diepte bevindt ten opzichte van het maaiveld. Het oppervlaktewater is desondanks slechts één domein.

Wanneer de interventie 'Verhoging slootbodems' wordt toegepast, wordt de bodem van het oppervlaktewater verhoogd, en komt dus iets dichterbij het maaiveld van ieder type landoppervlak te liggen.

4.2 Hydrologische stromen en voorraden

Voor verschillende hydrologische modelcomponenten geldt dat deze zich gedragen als 'bakjes': ze kunnen een bepaalde hoeveelheid water bevatten, en op basis daarvan bepaalde eigenschappen hebben, zoals een drukhoogte, stijghoogte of peil. Voor alle hydrologische stocks geldt dat deze homogeen van toepassing zijn over het volledige oppervlak van het betreffende landgebruik/type stock. De stromen tussen deze stocks/voorraden worden bepaald door opgeschaalde en/of versimpelde hydrologische vergelijkingen. Hierbij wordt bijvoorbeeld aangenomen dat processen ééndimensionaal plaatsvinden en lateraal homogeen zijn, of er worden vergelijkingen gebruikt die bijvoorbeeld in het verleden veel werden toegepast om ruimtelijke processen te beschrijven en opgenomen zijn in handboeken zoals het Grondwaterzakboekje (Bot 2016). Voor alle stromen geldt dat deze gediscredeerd worden over de tijdsstap van het model (dit houdt in dat alle stromen worden vermenigvuldigd met de betreffende tijdsstap). Omdat de tijdsstap van het model voor enkele niet-lineaire deelprocessen relatief groot is (uitwisseling wortelzone-grondwater en uitwisseling grondwater-oppervlaktewater), kunnen de tijdstappen aangepast (verkleind) worden om de stabiliteit van het model te waarborgen. Om een relatief hoge rekensnelheid te behouden (maar wel de non-lineariteit te behouden) worden (beperkte) numerieke fouten in dit model geaccepteerd.

Wortelzone

De wortelzone is het deel van de onverzadigde zone van waaruit water ten behoeve van evapotranspiratie gehaald kan worden. In dit model wordt de ondergrond (voor ieder type landgebruik respectievelijk) eendimensionaal benaderd. Zodra er stroming is naar andere domeinen (bijvoorbeeld het oppervlaktewater) worden de hoeveelheden vermenigvuldigd met het oppervlak (volumes water).

De wortelzone heeft een opgelegde maximale dikte op basis van de worteldiepte, maar wordt kleiner wanneer grondwaterstanden hoger zijn dan de worteldiepte (in dat geval is de dikte van de worteldiepte gelijk aan het onverzadigde deel).

$$dwz = \max(\text{depth_rootzone}, \text{level_surf}_{lt} - gw) \quad (1)$$

De veranderingen in de wortelzone worden in losse stappen uitgevoerd, waarbij gestart wordt met de snelste (neerslag en oppervlakkige afvoer) en geëindigd wordt met het doorgaans langzaamste proces (uitwisseling met het grondwater). Binnen een tijdsstap wordt de inhoud van het 'bakje' (in dit geval het bodemvocht, Theta θ) enkele malen geüpdatet, waarbij zo nodig ook opnieuw gerelateerde eigenschappen (zoals de drukhoogte) worden berekend. Om recht te doen aan de sterke non-lineariteit van de processen in de wortelzone, wordt gebruik gemaakt van de Mualem van Genuchten vergelijking om aanwezig bodemvocht te relateren aan drukhoogte (Van Genuchten 1980). Voor onverzadigde omstandigheden geldt:

$$h_{\text{rootzone}} = \left(\frac{\theta_s - \theta_r^{\frac{1}{m}}}{\theta - \theta_r} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \alpha^{-1} \quad (2)$$

Waarin de vormparameter $m = 1 - 1/n$

Als eerste tussenstap (a) wordt alle (effectieve) neerslag (en in geval van landbouw ook eventuele irrigatie, zie hiervoor 4.3) voor het betreffende landgebruik opgeteld bij het bodemvocht in de wortelzone. In de landgebruikstypen natuur en landbouw wordt de totale hoeveelheid neerslag als infiltratie naar de wortelzone meegenomen. De neerslag in stedelijk gebied wordt opgesplitst in twee stromen: naar het riool en infiltratie in de bodem. De beschrijving van de neerslagstroom naar het riool staat onder 'antropogene stromen' (4.3). Wanneer er neerslag en/of irrigatie (dit kan ook bestaan uit een vorm van hergebruik of aanvullende infiltratie) wordt toegevoegd, wordt dit toegevoegd aan het bodemvocht in de wortelzone.

$$\theta(t_a) = \theta(t-1) + \frac{P_{eff} + Irr}{dwz} \quad (3)$$

Indien de resulterende hoeveelheid bodemvocht saturatie overschrijdt, wordt aangenomen dat dit zal afstromen naar het oppervlaktewater:

$$Q_{\text{overland } lt} = \max(0, \theta(t_a) - \theta_s) * dwz \quad (4)$$

In de uitvoer voor de oppervlaktewatermodule wordt dit getal vermenigvuldigd met het oppervlak van het betreffende landgebruik.

Het bodemvocht wordt vervolgens geüpdatet:

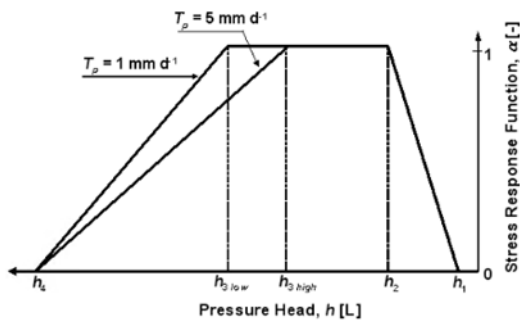
$$\theta(t_b) = \min(\theta(t_a), \theta_s) \quad (5)$$

Verdamping

Evapotranspiratie wordt gelimiteerd door de watervraag van het gewas of de vegetatie en de beschikbaarheid van water in de wortelzone.

$$ET_{pot} = ET_{ref} * c_f \quad (6)$$

De gewasfactor is afhankelijk van het type landgebruik en voor landbouw ook van het gekozen gewas (Tabel 2-3). De actuele verdamping is afhankelijk van de potentiële verdamping en de beschikbaarheid van water in de wortelzone. Voor landbouw, droge natuur en het stedelijk gebied geldt een verdampingsreductie bij zowel te natte als te droge omstandigheden. Bij het landgebruikstype natte natuur treedt alleen reductie van de verdamping op in te droge omstandigheden. Voor de grenzen van te natte en te droge omstandigheden wordt gebruik gemaakt van een iets versimpelde versie van het Feddes-model, dat gebruik maakt van drukhoogte in de wortelzone (Feddes et al. 1978) om transpiratiereductie te berekenen.



Figuur 4-1. Feddesfunctie voor het bepalen van de verdampingsreductie (Feddes et al. 1978)

Als de gemiddelde drukhoogte boven de grens voor natte omstandigheden ($red_et_high_h$) komt, stopt de transpiratie en is er alleen bodemverdamping. In dat geval is de reductiefactor voor natte omstandigheden, $wtatp$, 0.1.

Voor droge omstandigheden wordt de evapotranspiratie lineair gereduceerd:

$$dtatp = \min \left(1, \max \left(\frac{h_{rtzone} - h_{wp}}{red_et_low_h - h_{wp}}, 0 \right) \right) \quad (7)$$

Waarbij:

$dtatp$ = reductiefactor evapotranspiratie door droge omstandigheden

h_{wp} = verwelkingspunt, hiervoor is een waarde van -10 000 cm aangenomen voor alle vegetatie

$red_et_low_h$ = grens drukhoogte voor droogteschade

De actuele verdamping wordt vervolgens bepaald via:

$$ET_{act} = \min(wtatp, dtatp, 1) * ET_{pot} \quad (8)$$

Waarna het vochtgehalte opnieuw bepaald wordt:

$$\theta(t_c) = \theta(t_b) - \frac{ET_{act}}{dwz} \quad (9)$$

Uitwisseling tussen wortelzone en grondwater: grondwateraanvulling of capillaire opstijging

Vanuit de onverzadigde zone kan aanvulling van het grondwater plaatsvinden of er kan capillaire opstijging vanuit het freatisch grondwater naar de wortelzone optreden. Deze stroom wordt bepaald door het stijghoogteverschil tussen de wortelzone (H_{rz}) en het freatisch grondwater (H_{gw}) en de (onverzadigde of verzadigde) doorlatendheid

tussen de onverzadigde zone en het freatisch grondwater, op basis van de Richards vergelijking. De stijghoogte van het freatische grondwater is gelijk aan de grondwaterstand (de drukhoogte is daar per definitie 0). De stijghoogte van de wortelzone wordt berekend door de drukhoogte van de wortelzone (zie hierboven) en de plaatshoogte van het midden van de wortelzone bij elkaar op te tellen:

$$H_{rz} = level_surf_{it} - 0.5 \, dwz + h_{rootzone} \quad (10)$$

Om de doorlatendheid van de zone tussen wortelzone en grondwater te berekenen wordt grofweg aangenomen dat het vochtgehalte in deze zone het gemiddelde is tussen het vochtgehalte in de wortelzone (θ) en het grondwater (verzadiging). Dit vochtgehalte wordt (geconverteerd naar mate van verzadiging Se) gebruikt om de onverzadigde doorlatendheid te berekenen (Van Genuchten 1980):

$$K_{onverz} = K_s * Se_{\frac{1}{m}}^l * \left(1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}}\right)^m\right)^2 \quad (11)$$

De grondwateraanvulling/capillaire opstijging wordt vervolgens berekend met behulp van de Richards vergelijking.

$$q_{recharge} = K_{onverz} \frac{(H_{rz} - H_{gw})}{dz} \quad (12)$$

Gezien de relatief grote tijdsstap die het model hanteert, wordt per tijdsstap de uitwisseling tussen wortelzone en grondwater gelimiteerd: de uitwisseling mag niet leiden tot een flux die leidt tot overschrijding van een hydrostatische evenwichtssituatie. Ook wordt de stijging van de grondwaterstand tot boven het maaiveld gelimiteerd, in dat geval wordt het overschot opgeteld bij de oppervlakkige afstroming naar het oppervlaktewater.

Het vochtgehalte wordt vervolgens opnieuw bepaald:

$$\theta(t_d) = \theta(t_c) - \frac{q_{recharge}}{dwz} \quad (13)$$

Grondwater

De grondwaterstand wordt in stappen berekend op basis van de grondwaterstand in de vorige tijdsstap en inkomende en uitgaande stromen, waarbij er een bergingscoëfficiënt wordt toegepast. Deze bergingscoëfficiënt heeft ofwel een vaste waarde (in het geval dat de grondwaterstand onder de wortelzone ligt, dan wordt hiervoor het verschil in vochtgehalte dat optreedt tussen drukhoogtes van 0 en -100 cm (veldcapaciteit) genomen), of is gebaseerd op het verschil tussen verzadiging en het actuele vochtgehalte in de wortelzone (in geval van een grondwaterstand in de wortelzone).

$$gw(t_a) = gw(t-1) + \frac{q_{recharge}}{storage_coef} \quad (14)$$

Drainage van grondwater naar het oppervlaktewater of infiltratie van oppervlaktewater naar het grondwater (q_s) wordt bepaald door het verschil tussen de freatische grondwaterstand en het oppervlaktewaterpeil (sw), de drainageweerstand en de bergingscoëfficiënt:

$$q_s = \frac{(gw_{freatisch} - sw)}{resistance} \quad (15)$$

Hierbij wordt de uitwisseling wederom gelimiteerd, zodat het evenwicht niet overschreden kan worden (dit is slechts in uitzonderlijke gevallen nodig):

$$q_{max} = (gw_{freatisch} - sw) * stor_coef \quad (16)$$

$$q = \min(q_s, q_{max}) \quad (17)$$

De wegzijging of kwel wordt bepaald door het verschil tussen de freatische grondwaterstand en de diepere stijghoogte en de weerstand tussen de pakketten:

$$recharge = \frac{(gw_{freatisch} - gw_{diep})}{resistance} \quad (18)$$

Oppervlaktewater

Voor het oppervlaktewater geldt dat voor elke tijdsstap de balans wordt berekend door bij het volume van de vorige tijdsstap de ingaande stromen op te tellen en uitgaande stromen af te trekken. Vervolgens wordt de afvoer of eventuele aanvoer berekend. De manier waarop het oppervlaktewater het gebied verlaat is afhankelijk van het type gebied: polder of vrij afwaterend.

Na iedere nieuwe berekening van het volume wordt ook het peil bepaald, op basis van de lengte van het oppervlaktewatersysteem en het talud.

Polder

Via gemalen wordt overtollig oppervlaktewater naar buiten het systeem getransporteerd, in dit geval gaat het hier om een antropogene stroom. Deze stroom wordt gelimiteerd door de vraag op basis van de aanwezigheid van overtollig oppervlaktewater (wanneer het peil hoger is dan gewenst) en de capaciteit van de gemalen (cap_out).

$$Q_{uit,polder} = \min(bemalingsvraag, cap_out) \quad 19$$

Waarbij:

$$bemalingsvraag = (polderpeil - level_out) * oppervlak_{ow} \quad 20$$

Waarin $level_out$ het gewenste polderpeil is.

Vrij afwaterend

Voor de vrij afwaterende gebieden wordt gebruik gemaakt van de Manning formule, welke de meest gebruikte afvoervergelijking is voor vrij afwaterende oppervlaktewateren in Nederland (Bot 2016).

$$Q_{uit} = \left(A * R^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}} \right) * \frac{1}{n_{Manning}} \quad 21$$

Waarbij:

A = doorstroomde oppervlak

R = hydraulische straal

I = verhang in de waterloop (parameter *Verhang*, Tabel 2-1)

$n_{Manning}$ = Manning coëfficiënt (parameter *Manning_n*, Tabel 2-1)

Indien gekozen wordt voor de interventie 'Hermeanderen' worden de waarden voor het verhang en de Manning coëfficiënt aangepast, zie Tabel 3-1. In geval dat gekozen wordt voor de interventie 'extra stuwings oppervlaktewaterpeilen' wordt de berekende afvoer alleen toegepast wanneer het peil de stuwhoogte overschrijdt.

4.3 Antropogene waterstromen

Voor antropogene waterstromen wordt deze algemene vergelijking verondersteld:

$$Q = \min(vraag, beschikbaarheid, transportcapaciteit, afspraken, ...) \quad 22$$

Specifieke antropogene waterstromen worden vaak beschreven door het minimum van twee van bovenstaande variabelen, bijvoorbeeld vraag en beschikbaarheid. Voor de antropogene systeemcomponenten wordt aangenomen dat er op de beoogde tijdsschaal geen aanmerkelijke bergingsveranderingen plaatsvinden. Berging wordt daarom niet meegenomen. Wel kan er sprake zijn van verliezen van water naar bijvoorbeeld de atmosfeer of naar producten. Waar dit van toepassing is (bijvoorbeeld bij industriële processen) wordt hiervoor een verliesterm opgenomen.

Watergebruik industrie

Industrie kan gebruik maken van verschillende bronnen water: grondwater, drinkwater, oppervlaktewater of externe aanvoer. De totale watervraag voor de industrie wordt als invoer gegeven in het model via de parameter *Demand_ind_mj*. Ook de verdeling van de bronnen van water wordt als invoer meegegeven via de fracties voor elke watertype: *fraction_ext*, *fraction_dw*, *fraction_sw* en *fraction_gw*. Het benodigde water wordt rechtstreeks onttrokken uit het oppervlaktewater of dieper grondwater of aangeleverd als drinkwater. Indien niet voldoende water beschikbaar is vanuit een bepaalde bron, dan kan niet aan de watervraag voldaan worden. Bij schaarste van het oppervlaktewater heeft de drinkwatervoorziening voorrang over de onttrekking voor de industrie. Wanneer via een interventie wordt gekozen voor hergebruik van restwater voor de industrie, dan wordt de onttrekking uit het grondwater vervangen door het gebruik van restwater.

Irrigatiewater landbouw

Er kan water onttrokken worden uit het grond- of oppervlaktewater door de landbouw als er een bepaalde mate van verdampingsreductie door droogtestress in het gewas optreedt. De totale watervraag voor irrigatie wordt bepaald door de hoeveelheid water beschikbaar in de wortelzone, de potentiële verdamping en het veronderstelde deel van het landbouwoppervlak waar irrigatie plaats kan vinden (*fraction_area_irr*). Irrigatie vindt alleen plaats als de verdampingsreductie (*dtatp*, vergelijking 7) groter is dan de drempelwaarde voor irrigatie, die als invoer gegeven wordt als parameter *irr_threshold* (Tabel 2-3). De hoeveelheid water die geïrrigeerd wordt, is gelijk aan de hoeveelheid die nodig is om het bodemvochtgehalte aan te vullen tot de grenswaarde voor droge omstandigheden (*theta_red_low*, dit is het relatieve vochtgehalte bij de drukhoogte *red_et_low_h*). Er wordt geen extra water toegevoegd.

$$irr_demand = \min((\theta_{red_low} - \theta) * dwz, (1 - dtatp) * ET_{pot}) \quad 23$$

Waarbij:

θ_{red_low} = waarde van θ bij de grens voor droge omstandigheden

Afhankelijk van de gebruikte irrigatiemethode wordt er een inefficiëntiefactor toegepast (om te corrigeren voor de hoeveelheid water die verloren gaat naar de atmosfeer).

De irrigatiewatervraag wordt vervolgens vermenigvuldigd met het betreffende oppervlak, waardoor de vraag in volume (m³ water) wordt uitgedrukt. Vervolgens wordt gekeken of deze hoeveelheid water beschikbaar kan worden gemaakt door onttrekkingen. De verdeling tussen de onttrekking van grond- of oppervlaktewater wordt bepaald in de invoer door parameter *Fraction_irr_sw*. Indien er niet voldoende oppervlaktewater beschikbaar is om aan het gewenste deel van de irrigatievraag te voldoen, wordt er extra water onttrokken aan het grondwater. Voor het grondwater kan gekozen worden voor een onttrekking uit het freatisch pakket of dieper grondwater met de parameter *Irr_gw_source*. Via de interventies kunnen de onttrekkingen stopgezet worden (onttrekkingsverbod). Als voor de interventie van waterhergebruik wordt gekozen zonder verbod op onttrekkingen, dan wordt de volgorde van watergebruik als volgt: restwater, oppervlaktewater, grondwater.

Drinkwater

De totale drinkwatervraag bestaat uit de drinkwatervraag voor het stedelijk gebied en voor de industrie:

$$drinkwatervraag = drinkwatervraag_{stedelijk} + drinkwatervraag_{industrie} \quad 24$$

De drinkwatervraag voor het stedelijk gebied wordt bepaald aan de hand van het aantal inwoners, het dagelijkse drinkwaterverbruik en het verbruik van zakelijke klanten. Daarnaast is er een variatie in de vraag gedurende het jaar, waarbij de vraag groter is in droge, warme periodes:

$$drinkwatervraag_{stedelijk} = (use_{pp} * population * (1 + dw_businesses_rel_to_pop)) * factor_season \quad 25$$

Waarbij:

Use_{pp} = verbruik per persoon

$Population$ = aantal inwoners in het gebied, dit kan opgegeven worden indien bekend of geschat worden op basis van gemiddeld aantal inwoners per km²

$Dw_businesses_rel_to_pop$ = waterverbruik kleinzakelijke (niet-industriële) klanten t.o.v. waterverbruik huishoudens

$Factor_season$ = factor voor verschil in verbruik gedurende het jaar

De variatie gedurende het jaar wordt bepaald volgens de volgende polynomial (waarvoor de invoerdata gefit is – zie paragraaf 5.2):

$$factor_season = daily_pars1 * neerslagtekort^2 + daily_pars2 * neerslagtekort + daily_pars3 \quad 26$$

Waarbij:

$neerslagtekort$ = maandelijks verschil tussen neerslag en referentieverdamping vanaf een drempelwaarde van -25 mm

$daily_pars1$, $daily_pars2$ en $daily_pars3$ = parameters voor berekenen van dagelijkse factor watervraag t.o.v. jaarlijkse vraag, zie paragraaf 5.2.

Deze vergelijking zorgt voor een lichte stijging van de watervraag tijdens droge zomerperiodes. In geval dat de interventie ‘campagne vermindering drinkwatergebruik tijdens droogte’ is aangevinkt, dan wordt deze stijging teniet gedaan.

De drinkwatervraag van de industrie is afhankelijk van de totale watervraag voor industrie en de fractie daarvan welke drinkwater is, beide worden als input ingevoerd in het model:

$$drinkwatervraag_{industrie} = Demand_ind_mj * fractie_dw \quad 27$$

Om de totale onttrekking te bepalen wordt rekening gehouden met de verliezen die optreden bij de productie en distributie van drinkwater. Daarnaast kan een deel van het drinkwater geïmporteerd of geëxporteerd worden. De totale onttrekking voor het drinkwater binnen het gebied wordt daarom bepaald met:

$$drinkwateronttrekking = \frac{drinkwatervraag}{\left(1 - \frac{loss}{100}\right)} * factor_locally_produced \quad 28$$

Waarbij:

$loss$ = percentage verlies bij productie en distributie

$factor_locally_produced$ = deel van drinkwatervraag dat lokaal geproduceerd wordt (getal groter dan 1 betekent dat water geëxporteerd wordt naar buiten het gebied, kleiner dan 1 betekent dat er sprake is van aanvoer van buiten het gebied)

Het water kan onttrokken worden uit oppervlakte- of grondwater. De verdeling over de bronnen wordt bepaald met de parameter *Fraction_dw_sw*. Het grondwater wordt onttrokken aan het diepe grondwater. Indien niet voldoende oppervlaktewater beschikbaar is, wordt er meer grondwater onttrokken. Wanneer gekozen wordt voor de interventie hergebruik, dan wordt eerst de grondwateronttrekking verminderd. De interventie voor het verlagen van de piekvraag tijdens droge perioden heeft effect op de variatie gedurende het jaar, *factor_season*.

Wateraanvoer via oppervlaktewater

In poldergebieden en vrij afwaterende gebieden met wateraanvoer kan externe wateraanvoer via het oppervlaktewater plaatsvinden. Zodra het waterpeil daalt onder een bepaald niveau (*level_supply*) dat bepaald wordt via invoer, wordt er water aangevoerd.

Polder

In polders hangt de wateraanvoer af van de capaciteit beschikbaar voor externe aanvoer en de vraag voor aanvoer:

$$Q_{in,polder} = \min(aanvoervraag, cap_supply) \quad 29$$

Waarbij:

$$aanvoervraag = (level_supply - polderpeil) * oppervlak_{ow} \quad 30$$

Vrij afwaterend gebied met wateraanvoer

In het vrij afwaterend gebied met wateraanvoer is de wateraanvoer alleen afhankelijk van de capaciteit die beschikbaar is voor aanvoer. Zodra het waterpeil daalt onder het gewenste niveau, wordt water aangevoerd.

Restwater industrie

De hoeveelheid restwater voor de industrie wordt bepaald via de invoer. De parameter *Fraction_restwater* geeft aan hoeveel van het aangevoerde water restwater wordt dat afgevoerd moet worden. Via *Fraction_wwtp* wordt aangegeven welk deel van het restwater naar de AWZI gaat. Het overige deel van het restwater gaat naar het oppervlaktewater. Voor een polder wordt dit water afgevoerd via extern oppervlaktewater, voor vrij afwaterende gebieden wordt het rechtstreeks op het oppervlaktewater in het gebied geloosd.

Riolering en AWZI

De hoeveelheid neerslag die afgevoerd wordt via het riool, wordt gelimiteerd door de neerslag van het deel van de bebouwde omgeving dat op het riool is aangesloten (*Factor_prec_sewage*). Er wordt (vooralsnog) geen rekening gehouden met verliezen vanaf het dakoppervlak of andere verharde oppervlakken. Indien de interventie 'afkoppelen en infiltreren regenwater' wordt ingezet, wordt het betreffende percentage van de neerslag die op verhard oppervlak valt toegevoegd als extra infiltratie in het stedelijk gebied.

Daarnaast wordt stedelijk en industrieel restwater afgevoerd via de riolering. Een vierde stroom die via het riool gaat is rioolvreemd water. Rioolvreemd water bestaat in dit model uit grondwater uit het stedelijk gebied dat afgevoerd wordt via het riool (in de praktijk is grondwater een belangrijke, maar zeker niet de enige, bron van rioolvreemd water (Van de Kerk 2005)):

$$Q_{rioolvreemd} = \left(\frac{gw_{stad} - (level_surface - depth_{sewers})}{drainageres_sewage} \right) \quad 31$$

gw_{stad} = grondwaterniveau in het stedelijk gebied

$depth_{sewers}$ = diepte waarop riolering zich bevindt

Om eventuele numerieke problemen te voorkomen is deze stroom gelimiteerd door de evenwichtssituatie (zodra grondwaterstand gelijk is aan het niveau in de riolering stopt de stroom).

Het influent vanuit de industrie wordt bepaald door het totale geleverde water aan de industrie, de fractie restwater en de fractie van het restwater dat naar de AWZI gaat.

$$influent_{industrie} = aanvoer_{industrie} * fraction_{restwater} * fraction_{WWTP} \quad 32$$

Indien de totale hoeveelheid restwater die afgevoerd wordt de capaciteit van de riolering overschrijdt (*sewage_cap*), wordt verondersteld dat er sprake is van wateroverlast in het stedelijk gebied (bijvoorbeeld bij grote regenbuien). Aangezien dit water in de praktijk na een relatief korte tijd via het riool wordt afgevoerd, wordt het niet in mindering gebracht op de hoeveelheid water die binnen de tijdsstap via het riool wordt afgevoerd.

Het transport van rioolwater naar de AWZI heeft een bepaalde capaciteit (*lim_overflow*), waarboven er riooloverstorten kunnen ontstaan (het overtollige rioolwater komt terecht op het oppervlaktewater). De hoeveelheid influent wordt dus gelimiteerd door enerzijds de aanvoer en anderzijds de capaciteit.

Er wordt aangenomen dat de hoeveelheid effluent gelijk is aan de hoeveelheid influent. Het effluent wordt op het oppervlaktewater geloosd of ingezet voor hergebruik (waarbij een maximum geldt vanwege de aanvullende zuivering die nodig is).

5 Invoer, parameterisatie en initiële condities

5.1 Inleiding

Als invoer voor de Watersysteemverkenner kunnen getallen worden gebruikt die beschikbaar zijn uit publieke bronnen. In dit hoofdstuk worden uitgangspunten en definities behandeld die van toepassing zijn bij de keuze voor invoergetallen. Vervolgens is een overzicht van de parameters en eventuele standaardwaarden opgenomen, waarbij (indien van toepassing) een indicatie wordt gegeven van de range waarover deze parameters kunnen voorkomen. Ten slotte is een overzicht van initiële condities toegevoegd.

5.2 Uitgangspunten, definities en parameters

Voor de parameterisatie van ‘standaardsituaties’ zijn vooral gemiddelden voor de Nederlandse situatie gebruikt (Tabel 5-5). Voor de range die gebruikt kan worden in gevoeligheidsanalyses zijn (schattingen van) extremen in Nederlandse regio’s gebruikt. Daarnaast kan specifieke informatie voor een bepaald (type) gebied als invoer gebruikt worden, zoals bijvoorbeeld gedaan is in Stofberg en van Huijgevoort (2024). De getallen worden in de meest gangbare eenheden weergegeven (zoals ze in de literatuur gebruikt worden). In het model worden ze indien nodig geconverteerd naar standaardeenheden, om conversiefouten te voorkomen.

Meteorologie

Voor de meteorologische invoer worden dagwaarden van neerslag en referentieverdamping (Makkink) gebruikt. In de huidige versie van het model zijn de KNMI data van Eindhoven voor 2015-2020 opgenomen.

Landgebruik

De specifieke oppervlaktes voor landgebruik kunnen bepaald worden uit landgebruikskaarten (Bestand Bodemgebruik, (CBS 2022)). De klassen uit de landgebruikskaarten die per landgebruikstype in het model gebruikt worden, zijn weergegeven in Tabel 5-1.

Binnen het landgebruik natuur wordt een verdeling gemaakt tussen natte natuur en droge natuur. De verdeling tussen natte en droge natuur is gebaseerd op de natuurbeheertypen kaart (BIJ12 2024), waarbij de volgende beheertypen onder natte natuur vallen: N12.02 Kruiden- en faunarijk grasland, N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos, N10.02 Vochtig hooiland, N14.02 Hoog- en laagveenbos, N06.04 Vochtige heide, N16.04 Vochtig bos met productie, N17.06 Vochtig en hellinghakhout, N12.06 Ruigteveld, N14.03 Haagbeuken- en essenbos, N05.04 Dynamisch moeras, N06.03 Hoogveen, N06.01 Veenmosrietland en moerasheide, N10.01 Nat schraalland, N17.03 Park- of stinzenbos, N17.05 Wilgengriend. Alle oppervlakken onder natuur en overig die niet onder deze beheertypen vallen worden ingedeeld bij droge natuur.

Tabel 5-1 Verdeling van de klassen landgebruik uit landgebruikskaarten over de typen landgebruik in de Watersysteemverkenner.

Type oppervlak in model	Type oppervlak CBS
Landbouw	Landbouw en glastuinbouw
Stedelijk	Bebouwd terrein en bedrijfsterrein
Natuur en overig	Alle overgebleven landgebruikstypen, nl. bos, droog natuurlijk terrein, hoofdweg, nat natuurlijk terrein, semi-bebouwd, spoorweg, vliegveld
Oppervlaktewater	Binnenwater minus grote wateren (grote rivieren, meren, spaarbekkens etc.)
Niet meegenomen (valt namelijk buiten regionaal model)	Buitenwater

De actuele verdamping is afhankelijk van het type vegetatie. Er zijn per vegetatietype een aantal parameters gedefinieerd (Tabel 5-2), waarmee onder andere de verdamping berekend wordt. Waar het landgebruik landbouw is, kan vooralsnog gekozen worden voor gras of mais (de meest voorkomende gewassen in Nederland). De verdampingsreductie vindt plaats op basis van de Feddesfunctie (Feddes et al. 1978) (zie ook paragraaf 4.2), de benodigde parameters voor de landbouwgewassen zijn overgenomen uit Wesseling (1991), zoals deze gebruikt worden in Hydrus (Simunek et al. 2022). Voor natuur en stedelijk gebied zijn deze waarden geschat, waarbij er vanuit gegaan wordt dat natte natuur gevoelig is voor droogte maar goed bestand is tegen natte omstandigheden. Voor irrigatie is vooralsnog aangenomen dat deze wordt aangezet wanneer de verdampingsreductie tenminste 50% is. Voor de gewasfactoren voor de Nederlandse situatie is gebruik gemaakt van de gewasfactoren per maand uit Bot (2011).

Tabel 5-2 Waarden voor parameters die worden gespecificeerd per landgebruikstype, waarbij voor landbouw gekozen kan worden voor gras of mais

Parameter	Eenheid	Omschrijving	Gras	Mais	Natte natuur	Droge natuur	Stedelijk gebied
<i>Cropfactor</i>	-	Gewasfactor verdamping	1	1.2	1.2	0.8	0.7
<i>Fraction_cf_not_growingseason</i>	-	Fractie van de gewasfactor buiten het groeiseizoen	0.9	0.8	1	1	1
<i>Depth_rootzone</i>	M	Dikte wortelzone	0.25	0.5	0.5	1	0.3
<i>Red_et_low_h</i>	Cm	Grens drukhoogte voor droogteschade	-200	-325	-50	-200	-200
<i>Red_et_high_h</i>	Cm	Grens drukhoogte voor natschade	-25	-30	100	0	-30
<i>Irr_threshold</i>	-	Verdampingsreductiewaarde waarbij irrigatie aangezet wordt	0.5	0.5	-	-	-

Oppervlaktewater

De waarden van de parameters voor het oppervlaktewater (Tabel 5-3) zijn afhankelijk van het type gebied: polder, vrij afwaterend met aanvoer of vrij afwaterend zonder aanvoer.

Tabel 5-3 Waarden voor parameters die worden gespecificeerd per type gebied.

Parameter	Eenheid	Omschrijving	Polder	Vrij afwaterend met aanvoer	Vrij afwaterend	Onderbouwing
<i>Etfactor</i>	-	Factor open-water verdamping	1.25	1.25	1.25	Gewasfactoren (Bot 2011)
<i>Level_out</i>	M	Grens bemaling of afvoer				Dit betreft het waterniveau waar vanaf afvoer dan wel bemaling plaatsvindt. Voor polders is dit bijvoorbeeld het streefpeil, en voor vrij afwaterende gebieden is dit het niveau van de waterbodem of eventuele stuw.
<i>Cap_out</i>	miljoen m ³ /d	Capaciteit polderbemaling	0.014*total_area / 1000000	-	-	Op basis van voorbeeldpolders uit (Buma en Griffioen 2010) met capaciteiten van 0.014 m/d, 0.018 m/d en 0.010 m/d. Vermoed wordt dat in de praktijk de capaciteiten nog iets meer kunnen variëren dan in deze drie voorbeelden.
<i>Cap_supply</i>	miljoen m ³ /d	Capaciteit aanvoer			-	Capaciteit van zoetwateraanvoer naar het betreffende watersysteem (oppervlaktewater). Deze kan variëren tussen zeer groot (nabij grote rivieren) tot nihil. Zie

						bijvoorbeeld Mens et al. (2020) of (Van der Gaast et al. 2006).
Level_supply	M	Peil waarbij aanvoer start			-	Dit betreft het peil waaronder eventuele aanvoer start, de waarde hangt sterk af van het gebied.
Resistance	D	Weerstand verticale grondwater uitwisseling met het diepere grondwater	1000	600	600	Effectieve weerstand tussen freatisch grondwater en het diepere grondwater. Hangt sterk af van het type studiegebied, hier kan bijvoorbeeld REGIS voor worden gebruikt (Dinoloket, (TNO 2024)).
Resistance_sea	d	Weerstand (laterale) diepe grondwater uitwisseling	500	15000	15000	Effectieve weerstand tussen het diepere grondwater en de verdere omgeving (bijvoorbeeld zeeniveau). Vooralsnog wordt hier gebruik gemaakt van een schatting.

Bodemtype en bodemfysische parameters

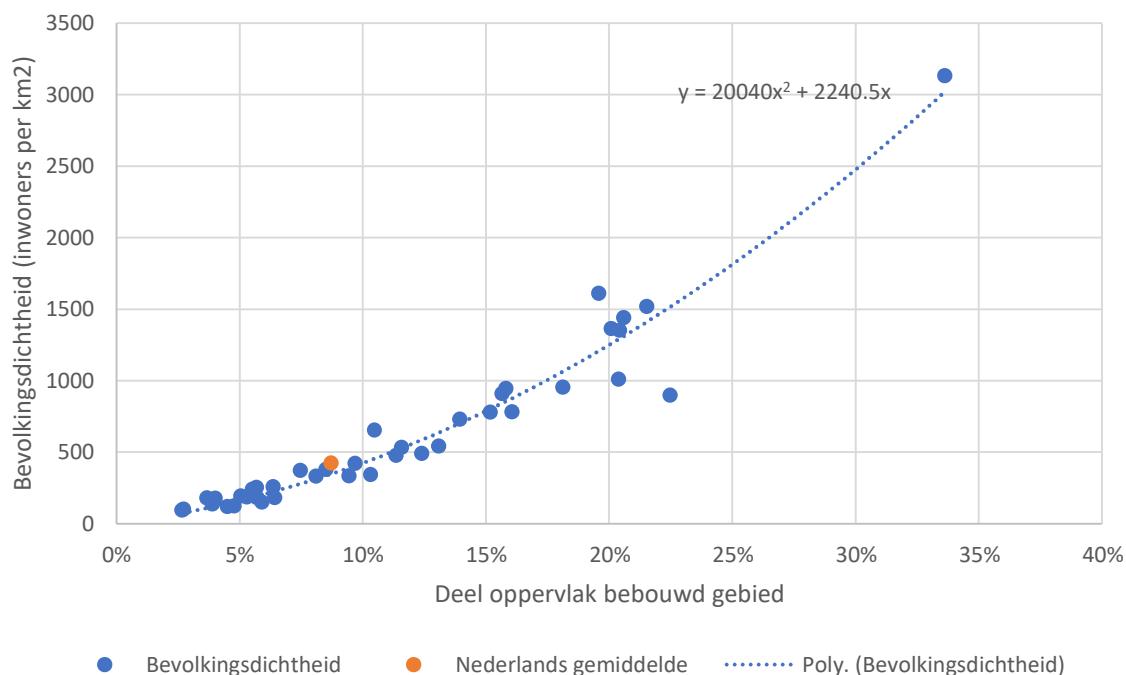
Voor drie veelvoorkomende bodems (zand, klei en veen) zijn de Mualem-Van Genuchten-parameters (MvG parameters) overgenomen van enkele bouwstenen uit de Staringreeks (Heinen et al. 2020), zie Tabel 5-4. Hierbij zijn de MvG parameters van de bovengronden (B typen) overgenomen en de verzadigde doorlatendheid van de ondergronden (O typen), omdat MvG parameters vooral van belang zijn voor de processen nabij het oppervlak en de doorlatendheid vooral van belang is in de uitwisseling van en naar het grondwater.

Tabel 5-4 Waarden voor de bodemfysische parameters voor de Mualem van Genuchten vergelijking voor verschillende bodemtypes.

Parameter	Eenheid	Omschrijving	Zand (B02 en O02)	Klei (B09 en O10)	Veen (O17)
ThetaR	cm ³ /cm ³	θ_r , resterend watergehalte	0.02	0	0.01
ThetaS	cm ³ /cm ³	θ_s , watergehalte bij verzadiging	0.434	0.430	0.849
Alpha	1/cm	Vormparameter α	0.0216	0.007	0.0119
MvG_n	-	Vormparameter n	1.349	1.267	1.272
MvG_l	-	Vormparameter l	7.202	-2.387	-1.249
Ks	cm/d	Verzadigde doorlatendheid	22.32	2.3	5

Bevolkingsdichtheid

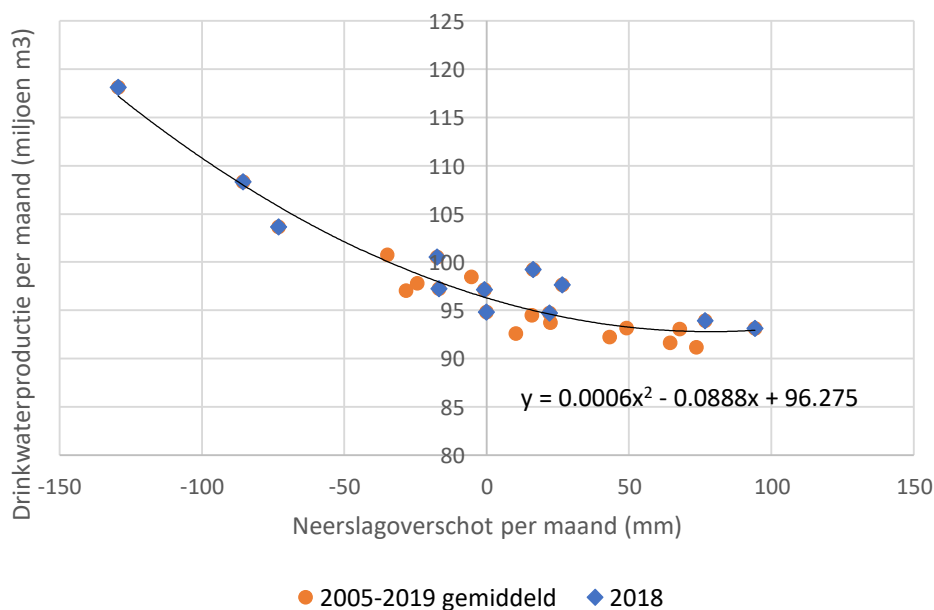
Het aantal inwoners in een studiegebied kan los opgegeven worden als invoer, maar indien gewenst ook ingeschat worden op basis van de gemiddelde bevolkingsdichtheid in Nederland. De laagste bevolkingsdichtheid in Nederland is te vinden in COROP regio Oost-Groningen, de hoogste dichtheid in totaalagglomeratie ‘s-Gravenhage (Figuur 5-1).



Figuur 5-1. Bevolkingsdichtheid per COROP regio, uitgezet tegen het percentage bebouwd gebied in die regio (cijfers uit CBS Statline).

Variatie drinkwatervraag over het jaar

De drinkwatervraag varieert gedurende het jaar en is mede afhankelijk van de weersomstandigheden. In droge, warme perioden wordt meer drinkwater verbruikt dan gemiddeld. In Figuur 5-2 is de drinkwaterproductie per maand ten opzichte van het maandelijks neerslagoverschot weergegeven. De relatie die hieruit is afgeleid wordt in het model gebruikt voor de variatie in de drinkwatervraag door het jaar heen via de parameters *Daily_pars1*, *Daily_pars2* en *Daily_pars3*. De relatie kan niet worden gebruikt voor extrapolatie naar een groter neerslagoverschot, dit is een voorlopige beperking van het model.



Figuur 5-2. Drinkwaterproductie per maand (Vewin 2022), afgezet tegen het maandelijks (gemiddelde) neerslagoverschot (KNMI, 2023), en een gefitte polynomial.

Drinkwatervraag huishoudens en kleinzakelijk gebruik

De drinkwatervraag van huishoudens en (niet-industriële bedrijven) kan op verschillende manieren worden benaderd, waarvan er hier twee genoemd worden.

De eerste manier gaat uit van het aantal inwoners van het studiegebied. Dit aantal wordt vermenigvuldigd met het veronderstelde drinkwatergebruik per dag. Vervolgens wordt dit getal vermenigvuldigd met een factor om het veronderstelde drinkwatergebruik door bedrijven mee te nemen.

De andere methode gaat uit van het gemiddelde niet-industriële drinkwatergebruik per oppervlak in Nederland, waarbij dit getal voor een specifiek gebied gecorrigeerd kan worden op basis van bijvoorbeeld de bevolkingsdichtheid (ten opzichte van het Nederlandse gemiddelde) voor het studiegebied.

Industriewatervraag

Aangenomen is dat de 'industrie' de categorieën B, C en D uit de CBS systematiek betreft, dus naast de 'maak-industrie' ook de energie- en mijnbouwsector. Bij de drinkwaterbedrijven gaat het dan om de categorie 'grootzakelijke klanten'. Deze bedrijven gebruiken water uit de omgeving (grondwater, oppervlaktewater en zeewater) en drinkwater. Binnen het model wordt onderscheid gemaakt tussen water dat gewonnen wordt binnen het regionale watersysteem (polder, klein vrij afwaterend stroomgebied) en daarbuiten (grote rivieren, evt. kanalen, zee). Een groot deel van het water dat door industrieën onttrokken wordt komt uit deze laatste categorie en wordt ingezet als koelwater.

Drainage- en maaiveldniveaus

Per landgebruikstype wordt één freatische grondwaterstand bepaald, daarnaast wordt er één waarde berekend voor het oppervlaktewaterpeil voor het hele studiegebied. Ter verduidelijking, er wordt op dit moment geen onderscheid gemaakt tussen boven- en benedenstrooms landgebruik. Om de interacties tussen het grond- en oppervlaktewaterniveau te berekenen, moet een maaiveldniveau ten opzichte van de bodem van het oppervlaktewater ('niveaubovenwaterbodem'), oftewel de diepte van de ontwatering, opgegeven worden. Deze parameters zijn ingeschat op basis van de getallen voor de ontwateringsbasis uit Tabel 4.11 uit Van der Gaast et al. (2006).

Voor het bepalen van de kwel en wegzijging naar het diepere grondwater wordt gebruik gemaakt van het maaiveldniveau. Het stijghoogteverschil tussen het freatisch en diepere grondwater bepaalt, samen met de weerstand, de kwel of wegzijging.

Drainageweerstand

De drainageweerstand bepaalt de interactie tussen oppervlaktewater en grondwater. Per type landgebruik kan er één waarde voor drainageweerstand worden gekozen. Dit is een sterke vereenvoudiging, omdat voor een gebied een combinatie van waarden zal gelden en deze ook kunnen veranderen afhankelijk van de grondwaterstand (bij hogere grondwaterstanden zullen meer drainagemiddelen bijdragen aan de ontwatering). Voor de invoerwaarde kan gebruik gemaakt worden van de 'drainageweerstand totaal' uit Van der Gaast et al. (2006), zoals weergegeven in Figuur 4.10 met bijbehorende uitleg.

Tabel 5-5. Typische waarden voor de modelparameters en variaties zoals deze in Nederland (mogelijk) voorkomen op basis van literatuur en schattingen.

Parameternaam	Omschrijving	Startwaarde basismodel	Range gevoeligheidsanalyse	Onderbouwing
Algemene eigenschappen				
Urban_per	Percentage oppervlak stedelijk gebied	10%	1% - 67%	Startwaarde op basis van de gemiddelde waarde voor Nederland in 2015 (https://opendata.cbs.nl/). Extremen

				gebaseerd op COROP regio Zuidwest Friesland en gemeente Den Haag
<i>Agriculture_per</i>	Percentage oppervlak landbouw	64%	1% - 94%	Startwaarde op basis van de gemiddelde waarde voor Nederland in 2015 (https://opendata.cbs.nl/). Extremen gebaseerd op gemeente Den Haag en COROP regio Delfzijl en omgeving.
<i>Surface_water_per</i>	Percentage oppervlak oppervlaktewater	3%	0% -38%	Startwaarde op basis van de gemiddelde waarde voor Nederland in 2015 (https://opendata.cbs.nl/). Extremen gebaseerd op COROP regio's Twente, Achterhoek, Zuidwest Drenthe, Zuidoost Noord-Brabant en COROP Regio Zuidwest Friesland.
<i>Nature_dry_per</i>	Percentage droge natuur van totale natuuroppervlakte	%	0% - 100%	Verschilt zeer sterk per regio. Natuurbeheertypenkaarten zijn beschikbaar per provincie.
<i>Level_sea</i>	Zeeniveau; wordt gebruikt als referentieniveau	0 m		Dit wordt gebruikt als referentieniveau. Bij zeespiegelstijging kan dit getal veranderen
<i>Level_sw_base</i>	Bodemhoogte oppervlaktewater	m	-6m – 200m	Dit is zeer afhankelijk van het type gebied. Voor een te kiezen studiegebied zou gebruik gemaakt kunnen worden van het AHN, eventueel in combinatie met landgebruikskaarten. Voor het oppervlaktewaterniveau wordt geadviseerd om een gangbare waarde (niet te laag) te gebruiken.
<i>Level_surf_agri</i>	Maaiveldhoogte landbouw	m		
<i>Level_surf_urban</i>	Maaiveldhoogte stedelijk gebied	m		
<i>Level_surf_nature_wet</i>	Maaiveldhoogte natte natuur	m		
<i>Level_surf_nature_dry</i>	Maaiveldhoogte droge natuur	m		
<i>Sw_level_ini</i>	Beginwaarde oppervlaktepeil t.o.v. referentieniveau	m		
<i>Head_gwdeep</i>	Gemiddelde stijghoogte wvp1	m		Dit is zeer afhankelijk van het type gebied. Voor een goede schatting kunnen isohypsenkaarten gebruikt worden.
<i>Niveaubovenwaterbodem_agri</i>	Maaiveldniveau landbouw t.o.v. bodem oppervlaktewater (diepte van ontwatering)	<i>Sw_level_ini</i> +2.1 m		De aanname is dat de gemiddelde waterdiepte gelijk is aan <i>Sw_level_ini</i> , ten opzichte hiervan vindt drooglegging plaats, deze is gebaseerd op Van der Gaast et al. (2006)
<i>Niveaubovenwaterbodem_urban</i>	Maaiveldniveau stedelijk gebied t.o.v. bodem oppervlaktewater (diepte van ontwatering)	<i>Sw_level_ini</i> +2.1 m		
<i>Niveaubovenwaterbodem_nature_wet</i>	Maaiveldniveau natte natuur t.o.v. bodem oppervlaktewater (diepte van ontwatering)	<i>Sw_level_ini</i> +0.8 m		
<i>Niveaubovenwaterbodem_nature_dry</i>	Maaiveldniveau droge natuur t.o.v. bodem oppervlaktewater (diepte van ontwatering)	<i>Sw_level_ini</i> +3.1 m		
<i>Talud</i>	Talud oevers oppervlaktewater	1/5	1/1 – 1/10	Schatting voor een relatief flauw talud.
<i>Manning_n</i>	Manning coëfficiënt	0.03 s/m ^{1/3}	0.01 - 0.25 s/m ^{1/3}	Voor 'schone rechte waterloop' wordt een coëfficiënt van 0.03 s/m ^{1/3} verondersteld. De coëfficiënt kan variëren van 0.01 s/m ^{1/3} (goed afgewerkt beton) tot 0.25 s/m ^{1/3} (dichtgegroeide natuurlijke waterloop in de zomer) (Bot 2016).
<i>Verhang</i>	Relatieve hoogteverschil van de waterloop	1 m/km	0.5 - 5 m/km	Watertypen worden o.a. onderscheiden in verhang: 0.5 – 1 m/km voor langzaam stromend laagland wateren en meer dan 1 m/km voor (langzaam en sneller stromende) bovenlopen (Van der Molen et al. 2018). Ter illustratie, de rivier de Geul heeft een verhang van ruim 4 m/km.
Industrie				

<i>Demand_ind_mj</i>	Totale jaarlijkse watervraag industrie	0.023 m ³ /m ² /j		CBS Water accounts 2018-2020 (Van Berkel et al. 2022).
<i>Fraction_ext</i>	Fractie watervraag externe bron		0-100%	Sterk afhankelijk van gekozen regio, kan variëren van 0 tot 100%.
<i>Fraction_sw</i>	Fractie watervraag oppervlaktewater	70%		CBS Water accounts 2018-2020 (Van Berkel et al. 2022), geen ruimtelijke verdeling bekend, kan variëren van 0% tot 100% afhankelijk van de regio.
<i>Fraction_dw</i>	Fractie watervraag drinkwater	13%		CBS Water accounts 2018-2020 (Van Berkel et al. 2022), geen ruimtelijke verdeling bekend, kan variëren van 0% tot 100% afhankelijk van de regio.
<i>Fraction_gw</i>	Fractie watervraag grondwater	17%		CBS Water accounts 2018-2020 (Van Berkel et al. 2022), geen ruimtelijke verdeling bekend, kan variëren van 0% tot 100% afhankelijk van de regio.
<i>Fraction_restwater</i>	Fractie aangevoerd water dat restwater wordt	0.95		Een deel van het water dat de industrie gebruikt verdwijnt naar de atmosfeer of in producten. Voor de jaren 2018-2019 was dit zo'n 4-5 % CBS Water accounts 2018-2020 (Van Berkel et al. 2022).
<i>Fraction_wwtp</i>	Fractie restwater dat naar AWZI gaat	43%		CBS Water accounts 2018-2020 (Van Berkel et al. 2022)
AWZI				
<i>Sewage_cap_m</i>	Rioolcapaciteit stedelijk gebied	0.02 m/d	0.005 – 0.026	Dagsom van de bui die door de riolering verwerkt kan worden. Typische waarde voor 'verbeterde gescheiden riolsystemen is 24h*0.3mm/h + 4 mm berging = 12 mm per dag. (https://www.riool.net/dimensioneren-2), voor gemengde stelsels is de capaciteit hoger, in de orde grootte van 0.68 mm/h + 7-10 mm berging (Van den Herik 1978). Typische waarde is nu een schatting op basis van de aanname dat een beperkt deel van de rioleringen gescheiden is.
<i>Limit_overflow_m</i>	Grens riooloverstort	0.9*capaciteit		Grofweg gekalibreerd op verwacht aantal overstorten van gemengd rioolstelsel van 5 keer per jaar (Langeveld en van Voorthuizen 2019).
<i>Factor_prec_sewage</i>	Deel van stedelijk gebied waarvan neerslag afgevoerd wordt naar riool	0.5	0.2 – 0.8	Ongeveer de helft van de neerslag in bebouwd gebied gaat naar de RWZI. Geen duidelijke gegevens hoe dit varieert, maar geschat wordt dat dit kan variëren van 20% in extensieve/afgekoppelde omgevingen tot vrij hoog in sterk verstedelijkte gebieden (Langeveld 2019)
<i>Reusepotential-factor</i>	Deel van influent dat potentieel hergebruikt kan worden	0.8		Dit is een schatting van de hoeveelheid water die na zuivering als waterbron beschikbaar kan komen.
Stedelijk gebied				
<i>St</i>	Bodemtype: zand, veen of klei	Zand		Zie Tabel 5-4 voor specifieke waarden per bodemtype
<i>Drainageres</i>	Drainageweerstand	200 dagen		Dit is zeer afhankelijk van het type gebied, het huidige gebruikte getal is een schatting omdat dergelijke getallen niet voor stedelijk gebied beschikbaar zijn (Van der Gaast et al. 2006).
<i>Ct</i>	Gewastype	Stedelijk gebied		Zie Tabel 5-2 voor specifieke waarden voor dit type vegetatie
<i>Dis_gr</i>	Deel (fractie) van stadsoppervlak van waaruit evapotranspiratie kan plaatsvinden	0.2		Grove schatting.
<i>Depth_sewage</i>	Diepte waarop riolering is aangelegd	2.7m		Diepte en drainageweerstand van de riolering zijn beide van belang om de eventuele afvoer van grondwater als rioolvreed water te berekenen. Het gaat hier niet per se om een werkelijke gemiddelde diepte, maar om een 'effectieve' diepte van drainerende riolen. Is in dit geval

				gekalibreerd om de geobserveerde hoeveelheid rioolvreemd water te verkrijgen.
<i>Drainageres_se wage</i>	Drainageweerstand riolering	1200 dagen		Kalibratiefactor, is gekozen om de geobserveerde hoeveelheid rioolvreemd water te verkrijgen.
Landbouw				
<i>St</i>	Bodemtype: zand, veen of klei	Zand		Zie Tabel 5-4 voor specifieke waarden per bodemtype
<i>Drainageres</i>	Drainageweerstand	180 dagen		Zeer afhankelijk van het type gebied, zie (Van der Gaast et al. 2006) voor waarden variërend van 50 tot 25000 dagen voor verschillende Nederlandse landschappen.
<i>Fraction_area_i rr</i>	Deel van het oppervlak waar irrigatie plaats kan vinden	0.25	0 - 1	Grove aanname, kan sterk per gebied verschillen. Zie hiervoor bijvoorbeeld de LHM invoerdata voor potentiële beregeningslocaties (NHI 2024).
<i>Irr_ineff</i>	Inefficiëntie van irrigatie	1.4		Door verliezen naar bijvoorbeeld verdamping is gangbare beregening minder efficiënt dan bijvoorbeeld druppelirrigatie. Deze factor geeft aan hoeveel water in verhouding nodig is om een eenheid aan effectieve beregening te realiseren. Gemiddeld worden de verliezen geschat op 46% van de beregeningsgift (De Louw et al. 2020). Andere studies komen echter op lagere getallen uit (Van den Eertwegh et al. 2020) (12-29%).
<i>Fraction_irr_sw</i>	Fractie van irrigatie uit oppervlaktewater	0.25	0-100	Dit is zeer afhankelijk van het type gebied, hangt voornamelijk af van de beschikbaarheid van zoet oppervlaktewater. Indien niet beschikbaar zal men doorgaans overstappen naar grondwater. Kan variëren van 0% tot 100%. Gemiddeld wordt geschat dat 25% van de irrigatie uit oppervlaktewater is (De Louw et al. 2020).
<i>Irr_gw_source</i>	Onttrekking uit freatisch of diep grondwater	-		Afhankelijk van het type gebied wordt grondwater voor irrigatie onttrokken uit het freatische grondwater of een diepere aquifer.
<i>Ct</i>	Gewastype	Gras		Zie Tabel 5-2 voor specifieke waarden voor dit type vegetatie
Natte natuur				
<i>St</i>	Bodemtype: zand, veen of klei	Veen		Zie Tabel 5-4 voor specifieke waarden per bodemtype
<i>Ct</i>	Gewastype	Natte natuur		Zie Tabel 5-2 voor specifieke waarden voor dit type vegetatie
<i>Drainageres</i>	Drainageweerstand	120 dagen		Afhankelijk van het type gebied. Vaak een schatting; natte natuur heeft doorgaans veel connectie met het oppervlaktewater ten opzichte van omliggende gebieden.
Droge natuur				
<i>St</i>	Bodemtype: zand, veen of klei	Zand		Zie Tabel 5-4 voor specifieke waarden per bodemtype
<i>Ct</i>	Gewastype	Droge natuur		Zie Tabel 5-2 voor specifieke waarden voor dit type vegetatie
<i>Drainageres</i>	Drainageweerstand	1200 dagen		Afhankelijk van het type gebied. Vaak een schatting; droge natuur heeft doorgaans relatief weinig connectie met het oppervlaktewater ten opzichte van omliggende gebieden.
Diep grondwater				
<i>D</i>	Dikte van 'dieper grondwater' (eerste watervoerende pakket)	M		Verschilt sterk per gebied. Geohydrologische modellen zoals REGIS kunnen hier inzicht in geven (TNO 2024). Voorsnog is de werking van dit modelonderdeel nog onvoldoende onderzocht en uitgewerkt.
<i>S</i>	Elastische berging per m pakketdikte	$3 \cdot 10^{-5} \text{m}^{-2}$		Standaard literatuurwaarde (Bot 2016).
Drinkwatervoorziening				
<i>Loss</i>	Verlies bij productie en distributie	9%	-	Gebaseerd op de Vewin Drinkwaterstatistieken, de gemiddelde nirg (niet in rekening gebracht gebruik) en productieverliezen voor Nederland (Vewin 2022)

<i>Use_pp</i>	Verbruik per persoon	130 l/d		(CBS Statline 2019)
<i>Fraction_dw_sw</i>	Deel van drinkwatervraag uit oppervlaktewater		0 - 1	Afhankelijk van het gebied kan dit variëren van 0 tot 1 (Vewin 2022)
<i>Factor_locally_produced</i>	Deel van drinkwatervraag dat lokaal geproduceerd wordt		0 - >1	Afhankelijk van het gebied kan dit variëren van 0 tot een getal ver boven de 1 (indien er veel drinkwater geproduceerd wordt dat elders gebruikt wordt).
<i>Daily_pars1</i>	Parameters voor berekenen van dagelijkse factor watervraag t.o.v. jaarlijkse vraag	$1 \cdot 10^{-08}$		Zie figuur 5-2 en bijbehorende toelichting, deze parameters hebben betrekking op een gefitte curve die de relatie tussen maandelijks watergebruik en neerslagoverschot beschrijft.
<i>Daily_pars2</i>		$-3 \cdot 10^{-06}$		
<i>Daily_pars3</i>		0.0028		
<i>Population</i>	Aantal inwoners (methode 1 om niet-industriële drinkwatervraag te benaderen)			Afhankelijk van het studiegebied, deze data is per gemeente beschikbaar via cbs.nl.
<i>dw_businesses_rel_to_pop</i>	Waterverbruik zakelijke niet-industriële klanten t.o.v. waterverbruik huishoudens (methode 1 om niet-industriële drinkwatervraag te benaderen)	0.12		Sterk afhankelijk van het studiegebied. Landelijk is de verhouding zo'n 12% (Van Berkel et al. 2022).
<i>Daily_dw_demand_urban</i>	Drinkwatervraag huishoudens en bedrijven (niet-industrie) (methode 2 om niet-industriële drinkwatervraag te benaderen)	$0.027 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$	$0.011 - 0.163 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$	Gebaseerd op de Vewin Drinkwaterstatistieken, gemiddelde vraag voor Nederland en de maximale variatie tussen drinkwaterbedrijven WMD en Waternet (Vewin 2022) en de verhouding tussen huishoudelijk en niet-industrieel zakelijk gebruik (onder industrie worden CBS categorieën B, C en D verstaan).
Interventies				
<i>Maxinf_ow</i>	Maximum toevoer van oppervlaktewater in droge natuur	0.003 m/d		Verondersteld maximum aan toevoer oppervlaktewater in natuur.
<i>Maxinf_partofow</i>	Fractie van het oppervlaktewater dat geïnfiltreerd kan worden in droge natuur	0.25		Verondersteld maximum aandeel van het oppervlaktewater dat onttrokken mag worden voor infiltratie in natuur.

5.3 Initiële condities

In het model zijn voor enkele variabelen initiële condities nodig. Vooralsnog hebben deze waarden die redelijkerwijs passen bij de casus die is uitgevoerd (Tabel 5-6), mogelijk dat deze in het vervolg meer universeel gedefinieerd moeten worden.

Tabel 5-6. Initiële waarden voor het basismodel

Variabele	Initiële waarde
Grondwater stedelijk gebied	<i>sw_level_ini</i> +0.1
Grondwater landbouw	<i>sw_level_ini</i> +0.1
Grondwater droge natuur	<i>sw_level_ini</i> + 0.4
Grondwater natte natuur	<i>sw_level_ini</i> + 0.1
Bodemvocht stedelijk gebied	0.2
Bodemvocht landbouw	0.2
Bodemvocht droge natuur	0.2
Bodemvocht natte natuur	0.5
Stijghoogte diep grondwater	<i>Head_gwdeep</i>
Oppervlaktewaterpeil	<i>Sw_level_ini</i>

Breedte oppervlaktewater (<i>sw_width_ini</i>)	$2 * talud^{*-1} * (sw_level_ini - level_sw_base)$
Lengte oppervlaktewater (<i>sw_length</i>)	sw_area / sw_width_ini
Beginvolume oppervlaktewater (m ³)	$sw_length * (sw_level_ini - level_sw_base) * 0.5 * sw_width_ini$

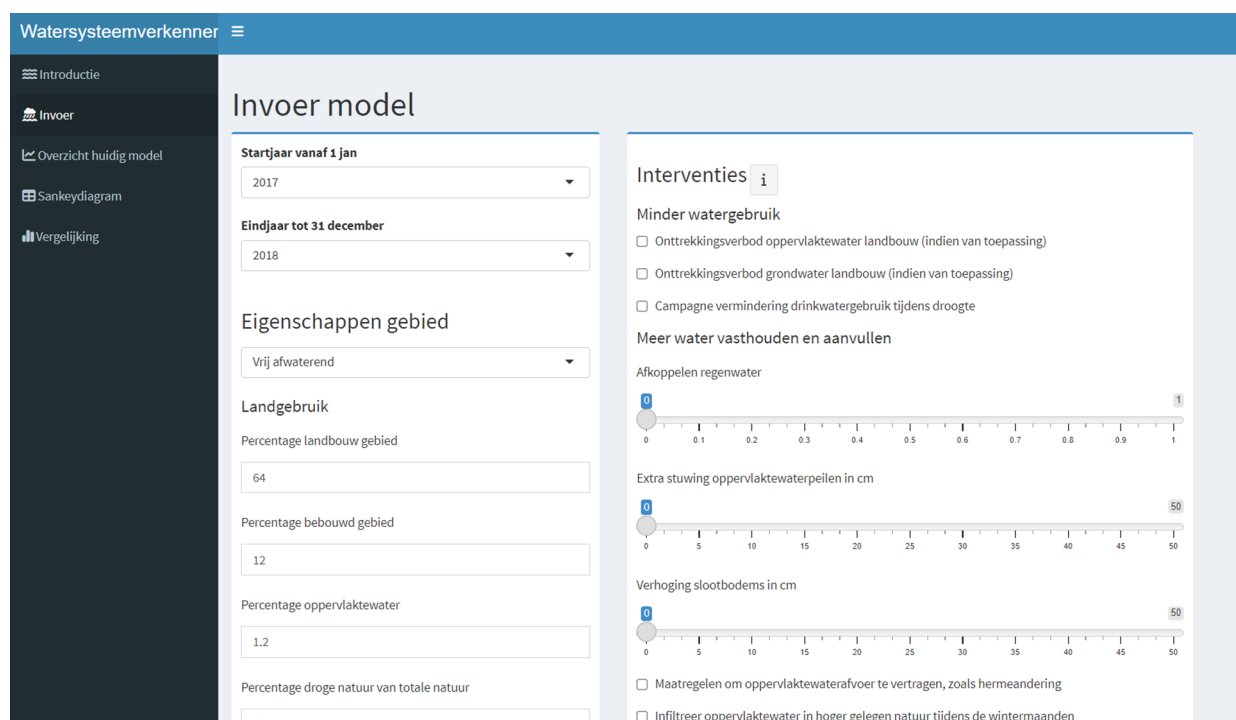
6 Interface en uitvoer

6.1 Inleiding

De interface van de ‘Watersysteemverkenner’ is een web app die via een browserscherm te bedienen is. De interface start met een beginscherm met een korte uitleg, waarna er gekozen kan worden uit verschillende interactieve tabbladen: één om de modelinvoer te kiezen, twee tabbladen waarin de uitvoer van het gekozen model kan worden bestudeerd en één waarin de uitvoer van verschillende modelsimulaties vergeleken kan worden.

6.2 Invoer

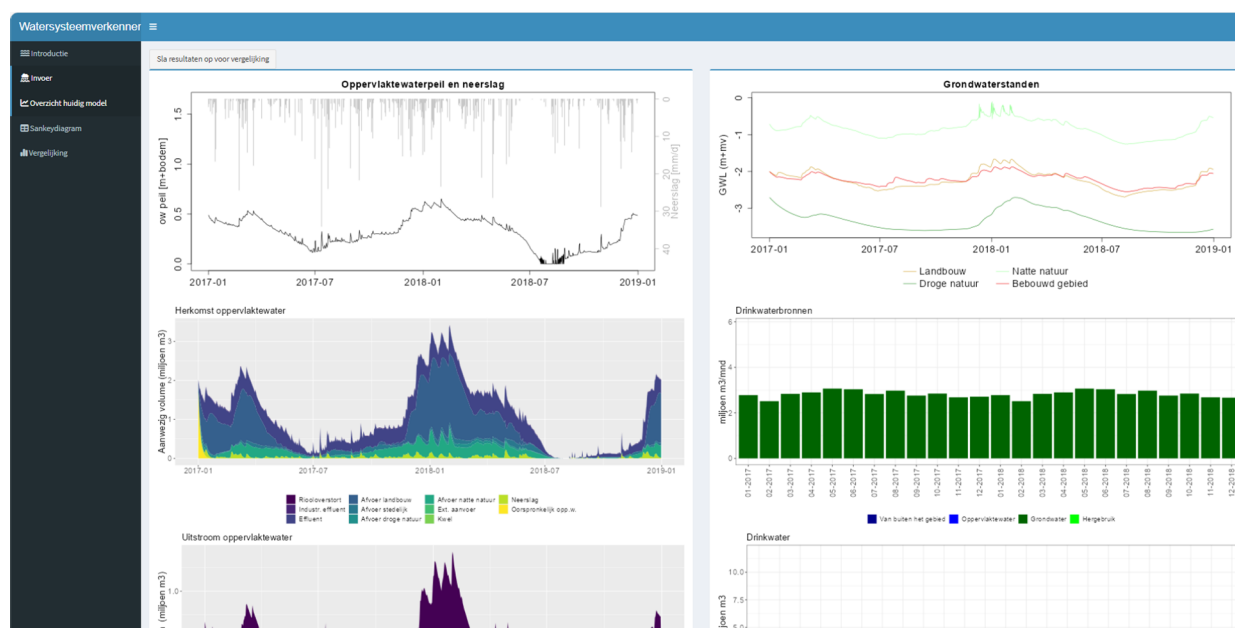
In het tabblad ‘Invoer’ (zie Figuur 6-1) kan de modelinvoer gekozen worden. Vooral nog is niet alle mogelijke modelinvoer in de interface te kiezen (dit kan uiteraard wel in de scripts), maar kunnen voor een vooraf ingestelde casus (gekozen set aan invoergetallen) een aantal wijzigingen worden aangebracht, waaronder de door te rekenen periode en het landgebruik. Daarnaast kan een keuze worden gemaakt uit verschillende watersysteeminterventies die worden toegepast.



Figuur 6-1. Het tabblad ‘Invoer’ van de Watersysteemverkenner.

6.3 Overzicht huidig model

Door op dit tabblad te klikken, wordt de modelsimulatie uitgevoerd en de resultaten gevisualiseerd (Figuur 6-2).



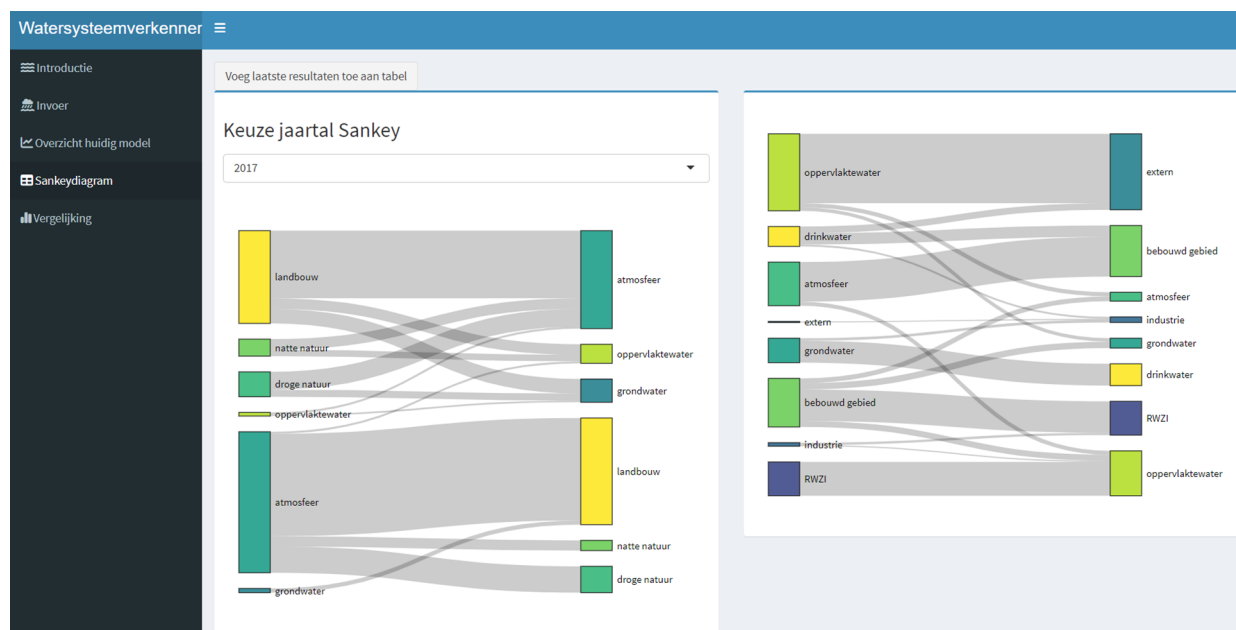
Figuur 6-2. Het tabblad 'Overzicht huidige model' in de Watersysteemverkenner. Hier wordt informatie voor verschillende variabelen getoond, zoals tijdreeksen van het oppervlaktewaterpeil en neerslag, tijdreeksen van grondwaterstanden, herkomst en uitstroom van oppervlaktewater over de tijd en verschillende bronnen voor drinkwater over de tijd.

Op dit tabblad worden tijdreeksen van de verschillende variabelen weergegeven op basis van de meest recente invoergegevens. Door het gebruik van tijdreeksen wordt de variatie gedurende het jaar duidelijk zichtbaar. Voor het oppervlaktewater worden verschillende factoren gevisualiseerd: het oppervlaktewaterpeil in combinatie met neerslag, de herkomst van het oppervlaktewater en de uitstroom van het oppervlaktewater. Met name de laatste twee figuren geven inzicht in het watersysteem, omdat hierdoor duidelijk wordt waar het oppervlaktewater vandaan komt en waar het vervolgens naartoe gaat. Voor de grondwaterstand wordt per landgebruikstype de freatische grondwaterstand ten opzichte van maaiveld getoond. Voor de drinkwatervoorziening is van belang welke bronnen gebruikt worden (grondwater, oppervlaktewater, restwater of een externe bron), hoeveel drinkwater geproduceerd wordt per sector (stedelijk gebied of industrie) en wat de drinkwatervraag is per sector. Zo is ook meteen te zien of er genoeg water beschikbaar is om aan de drinkwatervraag te voldoen. Voor de AWZI is weergegeven hoeveel water er aangevoerd wordt vanuit de verschillende bronnen: neerslag, rioolvreemd water, industrieel restwater of stedelijk restwater. Hieruit volgt ook hoeveel effluent beschikbaar is voor eventueel hergebruik bij het toepassen van interventies. Als laatste wordt de netto kwel of wegzijging voor het hele gebied weergegeven.

Op dit tabblad kunnen ook de resultaten worden opgeslagen, zodat de gegevens gebruikt kunnen worden voor het visualiseren van de effecten van interventies.

6.4 Sankeydiagram

In de Sankeydiagrammen worden alle gesimuleerde waterstromen voor één jaar in het gebied samengevat. De diagrammen geven een beeld van de onderlinge verhoudingen van de stromen, omdat de grootte van de stromen meteen duidelijk is (Pronk et al. 2020). De waterstromen zijn onderverdeeld in de meer natuurlijke stromen en de stromen in de waterketen. De opgeslagen resultaten kunnen hier ook ingeladen worden om een tabel (Figuur 6-4) weer te geven waarin alle waterstromen voor het gekozen jaar in opgenomen zijn. Alle ingeladen scenario's worden in de tabel vergeleken met de waarden van scenario 1. Een toename in de waterstroom wordt aangegeven met een paarse kleur, een afname in de waterstroom met een oranje kleur.



Figuur 6-3. Het tabblad 'Sankeydiagram' in de Watersysteemverkenner.

Omvang waterstroom (miljoen m3/jaar)	Scenario 1	Scenario 2
Neerslag op landbouw	329.1	329.1
Neerslag op oppervlaktewater (direct)	6.2	6.2
Neerslag op natte natuur	32.8	32.8
Neerslag op droge natuur	84.4	84.4
Verdamping landbouw	217.1	217.2
Uitstroom landbouw naar oppervlaktewater	34	30.3
Wegzijging landbouw naar dieper grondwater	46.6	50.3
Verdamping uit oppervlaktewater	6.4	6.4
Onttrekking landbouw uit oppervlaktewater	0	0
Wegzijging oppervlaktewater naar dieper grondwater	5.4	5.5
Onttrekking landbouw uit grondwater	13.4	13.4
Verdamping uit natte natuur	33.9	33.9
Uitstroom natte natuur naar oppervlaktewater	20.7	19.7
Wegzijging natte natuur naar dieper grondwater	-31.2	-30.9

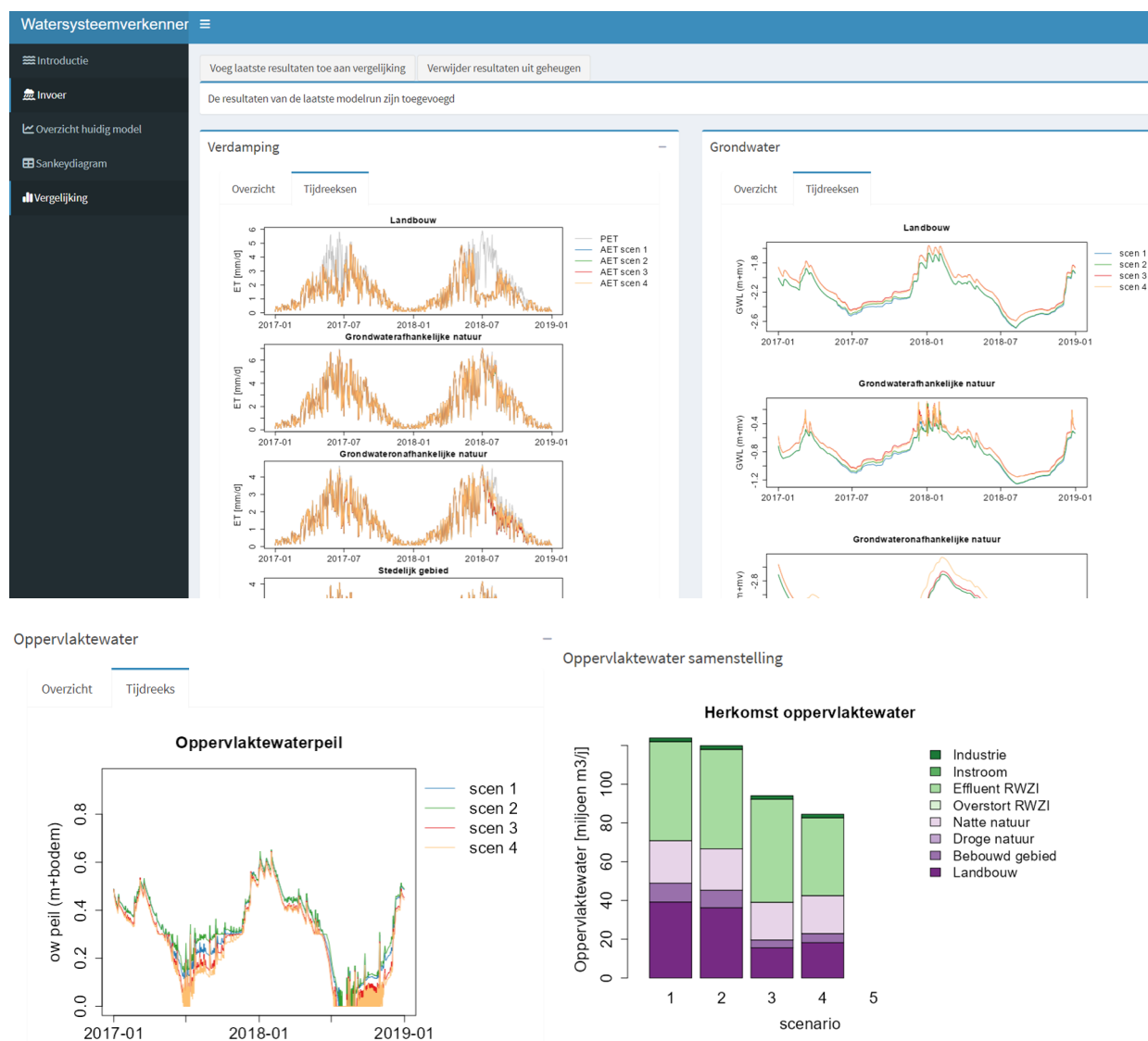
Figuur 6-4. Tabel waarin waterstromen tussen scenario's vergeleken kunnen worden in het tabblad 'Sankeydiagram' in de Watersysteemverkenner.

6.5 Vergelijking

In dit tabblad worden de resultaten van de verschillende scenario's naast elkaar gezet om de effecten van interventies te bepalen (Figuur 6-5). De volgende variabelen worden gevisualiseerd:

- **Verdamping:** zowel de gemiddelde verdampingsreductie over de hele periode als tijdreeksen van de potentiële en actuele verdamping worden weergegeven per landgebruikstype. Voor de verdampingsreductie wordt de factor ET_a/ET_p berekend, waarbij ET_a de actuele verdamping is en ET_p de potentiële verdamping. Een waarde van 1 betekent dat er geen verdampingsreductie optreedt. In de tijdreeksen wordt de variatie gedurende een jaar zichtbaar en zijn ook de waarden van de actuele en potentiële verdamping en een eventuele reductie zichtbaar.

- **Grondwater:** voor grondwater worden de gemiddelde, hoogste en laagste grondwaterstand ten opzichte van maaiveld over de hele rekenperiode en tijdreeksen weergegeven per landgebruikstype. Voor de hoogste en laagste grondwaterstand worden respectievelijk de maximum- en minimumwaarde in de hele periode bepaald. De tijdreeksen geven de variatie weer gedurende de rekenperiode.
- **Water bebouwde omgeving:** hier wordt getoond hoeveel dagen per jaar er sprake is van water op straat of van een riooloverstort.
- **Watervoorziening industrie:** deze figuur toont de bronnen voor het water dat gebruik wordt in de industrie. De industrie kan gebruik maken van grond-, oppervlakte-, drink- of restwater.
- **Diepere grondwateraanvulling:** de gemiddelde jaarlijkse netto kwel of wegzijging van het freatisch grondwater naar het diepere grondwater per landgebruikstype wordt hier weergegeven.
- **Drinkwatertoepassing:** de totale gemiddelde jaarlijkse drinkwaterproductie verdeeld over de sectoren is hier gevisualiseerd.
- **Drinkwaterbron:** drinkwater kan geproduceerd worden uit grond-, rest-, of oppervlaktewater, of vanuit buiten het gebied aangevoerd worden. Hier wordt de gebruikte bron voor drinkwater getoond.
- **Irrigatie:** berekening kan plaatsvinden met grond-, oppervlakte- of restwater. De gemiddelde totale jaarlijkse hoeveelheid water voor berekening wordt hier opgesplitst in de gebruikte bronnen.
- **RWZI:** de totale gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid water die naar de RWZI gaat wordt hier getoond en opgesplitst in de verschillende herkomstmogelijkheden: overstort, neerslag, rioolvreemd water, industrieel restwater en stedelijk restwater.
- **Oppervlaktewater samenstelling:** het water in het oppervlaktewater kan afkomstig zijn van drainage vanuit de verschillende landgebruikstypes, lozingen vanuit industrie of RWZI, overstorten of externe wateraanvoer. Hier wordt de herkomst van het oppervlaktewater weergegeven.
- **Oppervlaktewater:** hier worden zowel de waarden van het maximum, minimum en het 25^{ste}, 50^{ste} en 75^{ste} percentiel over de hele rekenperiode voor het oppervlaktewaterpeil als de tijdreeksen van het oppervlaktewaterpeil getoond.
- **Natuurtype:** onderaan het tabblad staat een tabel (Figuur 6-6) met verschillende natuurtypen (BIJ12 2024). Voor de landgebruikstypes 'natte natuur' en 'droge natuur' wordt hier aangegeven hoe geschikt de omstandigheden zijn voor een bepaald natuurtipe gebaseerd op de knippunten voor GVG en GLG uit WATERNOOD (Runhaar en Hennekens 2015). Donkergroen betekent geschikt voor het natuurtipe, 0 betekent ongeschikt en 0.5 (lichtgroen) betekent mogelijk geschikt.



Figuur 6-5. Het tabblad 'Vergelijking' in de Watersysteemverkenner (boven) en twee voorbeelden van uitvoergrafieken (onder).

Namen	Natte natuur scen 1	Droge natuur scen 1	Natte natuur scen 2	Droge natuur scen 2	Natte natuur scen 3	Droge natuur scen 3	Natte natuur scen 4	Droge natuur scen 4	Natte natuur scen 5
N05.01	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0	
N05.02	0	0	0	0	0	0	0	0	
N06.01	0	0	0	0	0	0	0	0	
N06.02	0	0	0	0	0	0	0	0	
N06.03	0	0	0	0	0	0	0	0	
N06.04	0	0	0	0	0	0	0	0	
N06.05	0	0	0	0	0	0	0	0	
N06.06	0	0	0	0	0	0	0	0	
N07.01					0.5		0.5		
N07.02	0		0		0		0		
N09.01	0	0	0	0	0	0	0	0	
N10.01	0	0	0	0	0	0	0	0	
N10.02	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0	
N11.01									
N12.01									
N12.02									
N12.03									

Figuur 6-6. Tabel met score voor natuurtypen voor verschillende scenario's in het tabblad 'Vergelijking' in de Watersysteemverkenner.

7 Gewenste wijzigingen, uitbreidingen en toepassingen

7.1 Inleiding

Ten tijde van schrijven van dit rapport (2024) is de ‘Watersysteemverkenner’ toegepast op een casus (Stofberg en van Huijgevoort 2024) en eenmalig voorgelegd aan een groep potentiële gebruikers (buiten de ontwikkelaars).

Het model betreft nog een eerste opzet, waaruit wel al belangrijke inzichten naar voren komen. Voor verdere toepassing van het model in de verkenning van watersysteemmaatregelen voor verschillende typen landschappen is het gewenst dat de modelcode en parameterisatie verder ontwikkeld en getest worden voor verschillende situaties en landschappen. Daarom is de tool op moment van schrijven (2024) nog niet openbaar beschikbaar.

Voor verdere en bredere toepassing van het model zou het goed zijn om in een traject met een klankbordgroep met beoogde gebruikers het model en de interface verder te ontwikkelen, waarbij kritisch wordt gekeken naar de beoogde toepassing (en de limitaties daarop) en wat dit betekent voor de gewenste uitwerking van de interface.

In onderstaande paragrafen zijn verschillende mogelijke verbeteringen opgenomen, die tijdens de ontwikkeling van het model en de interface naar voren zijn gekomen.

7.2 Het watersysteemmodel

Het watersysteemmodel is een compromis tussen enerzijds een sterke versimpeling (voor snelle rekentijden) en anderzijds voldoende recht doen aan de processen (om voldoende realistische resultaten te verkrijgen). De gewenste verbeteringen betreffen beide aspecten.

In alle gevallen gewenst:

- Verder onderzoeken van de numerieke opzet en eventuele verbeteringen hiervan (bijvoorbeeld een variabele tijdsstap), met het oog op snelle rekentijden, voldoende stabiliteit en precisie.
- Stroomlijnen van scripts en verbeteringen aanbrengen in de wijze waarop met simulatiedata wordt omgegaan om rekentijden te verkorten.
- Laterale interactie via het grondwater tussen verschillende soorten landgebruik implementeren. Vooralsnog vindt eventuele interactie van het grondwater van verschillende typen landgebruik alleen plaats via het diepere grondwater en indirect via het oppervlaktewater. Voor hoog Nederland is zo’n aanname vaak onterecht. Interactie tussen landgebruik zou verbeterd kunnen worden door gebruik te maken van een vorm van ‘systeemweerstand’ toe te passen, zoals bijvoorbeeld werd voorgesteld door Van der Gaast et al. (2006).
- Verdampingsverliezen van daken/verharde oppervlakken goed meenemen.
- Testprocedures automatiseren, zodat bij wijzigingen en updates de werking van de modelcode eenvoudig en systematisch gecontroleerd kan worden.

Mogelijk gewenst voor specifieke cases:

- In geval van vrij afwaterend oppervlaktewater zou het oppervlaktewater gedifferentieerd kunnen worden in bovenstrooms, midden en benedenstrooms, waarbij bepaald landgebruik toegewezen kan worden aan deze onderdelen.
- Toepassing van het model kan ‘zonder oppervlakte’, waarbij het bij zowel invoer als uitvoer in mm wordt weergegeven. Invoer wordt hiertoe geschaald (bijvoorbeeld percentage van een bepaald landgebruik, in plaats van een oppervlakte). Voor sommige invoer (zoals industrieel watergebruik) is deze invoer minder intuïtief ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{jaar}^{-1}$), maar wel goed te relateren aan (landelijke) data.
- Indien verdere detaillering van de processen aan het oppervlak en in de onverzadigde zone nodig is, kan overwogen worden om op fijnere tijdschalen enkele aanvullende processen mee te nemen, zoals bijvoorbeeld interceptie van neerslag op vegetatie.
- Voor industrie is de gewenste waterbron (bijvoorbeeld drinkwater of oppervlaktewater) een vaste waarde, en er kan niet automatisch overgeschakeld worden op een andere bron. Voor sommige vraagstukken kan het van pas komen om de waterbron flexibeler te maken.
- Verbetering en testen van de werking van het diepere grondwater. Hierbij hoort ook een overweging hoe effecten op langere termijn dan de overige modeleffecten (die bijvoorbeeld over tientallen jaren plaatsvinden) een plaats kunnen krijgen in het model en de uitvoer.
- Implementeren van waterkwaliteitsindicatoren, te beginnen met een indruk van de waterkwaliteit op basis van de samenstelling (denk bijvoorbeeld aan het aandeel effluent in het oppervlaktewater).

7.3 Invoer, parameterisatie, kalibratie en validatie

Voor (bredere) toepassing zou het model meer varianten van invoerdata nodig hebben en getest moeten worden om verschillende typen watersystemen te simuleren.

- Modelinvoer samenstellen en het model testen op juiste werking voor verschillende typen landschappen.
- Kalibratie en validatie voor verschillende typen landschappen, waarbij onderzocht wordt hoe dit type model zich verhoudt tot de werkelijkheid, en wat dit betekent voor de toepassing. Hierbij moet opgemerkt worden dat validatie waarschijnlijk slechts beperkt mogelijk is, enerzijds vanwege de sterke vereenvoudigingen (‘typische’ watersystemen bestaan niet), en anderzijds vanwege het feit dat van veel belangrijke modeluitvoer simpelweg geen metingen beschikbaar zijn.
- Procedure voor het verkrijgen van invoerdata standaardiseren, waarbij een aantal standaard sets aan invoer voor verschillende ‘typische’ landschappen worden samengesteld.
- Indien gewenst interventies uitbreiden op basis van voorkeuren van gebruikers, inclusief aandacht voor veranderingen in landgebruik (aansluitend op recente ontwikkelingen, zoals de Kamerbrief Bodem Water Sturend).
- Langere tijdreeksen van meteodata beschikbaar maken, inclusief verschillende meetstations en klimaatscenario’s.
- Niet alleen hermeandering als interventie, maar in de invoer een range aan typen oppervlaktewateren mogelijk maken, van zeer recht, steil en glad tot meanderend en ruw.

- Beter uitwerken, onderbouwen en kalibreren van vegetatie parameters, waarbij onderzocht moet worden hoe combinaties van verschillende typen vegetatie per landgebruik op een goede manier opgeschaald kunnen worden.

7.4 De interface

Eventuele verbeteringen aan de interface zouden gedaan moeten worden in samenwerking met een groep potentiële gebruikers, om de interface zo goed mogelijk aan te passen aan hun wensen. Dit houdt ook in dat verder verkend moet worden welke *criteria* gebruikers uit verschillende doelgroepen hanteren om het gedrag van een watersysteem te beoordelen (in andere woorden, welke informatie heeft men minimaal nodig om een oordeel te vellen over de werking van het watersysteem in een bepaalde situatie?).

Naar verwachting zijn verschillende aanpassingen gewenst om de interface toegankelijker en inzichtelijker te maken.

- Nette lay-out voor alle grafieken in dezelfde stijl, die goed leesbaar is, met de mogelijkheid de grafieken te vergroten of in te zoomen. De kleuren zijn goed te onderscheiden, ook voor mensen die kleurenblind zijn.
- Info knopje bij elke grafiek en maatregel, zodat de gebruiker meer info kan opvragen waar het over gaat.
- De interface zo inrichten dat er gekozen kan worden voor een van de 'standaardsituaties', maar het daarnaast ook mogelijk is om alle parameters naar wens te wijzigen.
- Module voor gevoeligheidsanalyses uitbreiden en beschikbaar maken in de interface

7.5 Mogelijke toepassingen

De Watersysteemverkenner kan een rol spelen in het begrijpen van vraagstukken en uitvoeren van verkenningen naar maatregelen in watersystemen, zoals die overwogen worden voor verschillende Nederlandse landschappen in het kader van watervoorzieningsvraagstukken en de watertransitie.

- Verkennen van vraagstukken in watersystemen, en hoe deze met gebiedseigenschappen en met elkaar samen kunnen hangen.
- Verkenning van doorwerking van maatregelen in watersystemen: welke (onverwachte) bijwerkingen van maatregelen kunnen mogelijk optreden, en wat betekent dit voor de eventuele inzet voor deze maatregelen? De aanpak is vooral interessant als het gaat om interacties tussen de waterketen en het watersysteem, bijvoorbeeld als het gaat om de maatregelen rondom waterbesparing en hergebruik (Stofberg et al. 2024).
- Gevoeligheidsanalyses inzetten voor een verkenning van kansrijke (combinaties van) maatregelen voor een set typische landschappen en (klimaat)scenario's. Welke soort (combinaties van) maatregelen zijn in welke gevallen zinrijk?

8 Referenties

- Arnold, R. D. en J. P. Wade (2015). "A definition of systems thinking: A systems approach." *Procedia computer science* **44**: 669-678.
- BIJ12. (2024). Retrieved 1-3-2024, 2024, from <https://www.bij12.nl/onderwerp/natuursubsidies/index-natuur-en-landschap/natuurtypen/>.
- Bot, B. (2011). *Grondwaterzakboekje*. Rotterdam, Bot Raadgevend Ingenieur.
- Bot, B. (2016). *Gwz2016*. Rotterdam, Bot.
- Buma, J. en J. Griffioen (2010). Zuiveren en gemalen: een logische combinatie? Utrecht, Deltares
https://publications.deltares.nl/1202057_000_3.pdf
- CBS. (2022). "Bodemgebruik; uitgebreide gebruiksvorm per gemeente." from
<https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/70262ned/table>.
- CBS Statline. (2019). "Watergebruik bedrijven en particuliere huishoudens; nationale rekeningen." 2019, from
<https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/82883NED/table?ts=1555497401962>.
- De Louw, P., V. Kaandorp, H. Massop en A. Veldhuizen (2020). Deltafact Berekening. *STOWA Deltafacts*, STOWA
<https://edepot.wur.nl/535694>
- Feddes, R., P. Kowalik en H. Zaradny (1978). "Simulation of field water use and crop yield."
- Heinen, M., G. Bakker en J. Wosten (2020). Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks: Update 2018. Wageningen, Wageningen Environmental Research <https://research.wur.nl/en/publications/waterretentie-en-doorlatendheidskarakteristieken-van-boven-en-ondergronden-in-nederland-de-staringreeks-update-2018>
- Langeveld, J. en E. van Voorthuizen (2019). Rek in afvalwatersystemen: hulpmiddel voor verkennen ruimte voor optimalisatie. Amersfoort, STOWA
<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202019/STOWA%202019-03%20rek.pdf>
- Langeveld, J. G. (2019). Afkoppelen. Kansen en risico's van anders omgaan met hemelwater in de stad. Amersfoort, STOWA
<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202019/STOWA%202019%2022%20WEB.pdf>
- Mens, M., J. Hunink, J. Delsman, J. Pouwels en F. Schasfoort (2020). Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II, Deltares
- NHI. (2024). "NHI data portaal ", from <https://data.nhi.nu/>.
- Posit (2024). R Shiny <https://shiny.posit.co/>
- Pronk, G. J., T. C. G. W. van Dooren, S. F. Stofberg en R. P. Bartholomeus (2020). Waterhergebruik en de zoetwatervoorziening (Managementsamenvatting en dataoverzicht op dia's) Nieuwegein, KWR
<https://library.kwrwater.nl/publication/60884959/waterhergebruik-en-de-zoetwatervoorziening-managementsamenvatting-en-dataoverzicht-op-dias/>
- R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing <https://www.R-project.org/>
- Runhaar, J. en S. Hennekens (2015). Hydrologische randvoorwaarden natuur: gebruikershandleiding (waternoodapplicatie versie 3), STOWA, KWR
<https://library.kwrwater.nl/publication/55365708/hydrologische-randvoorwaarden-natuur-gebruikershandleiding-waternoodapplicatie-versie-3/>
- Simunek, J., M. T. Van Genuchten en M. Sejna (2022). The HYDRUS Software Package for Simulating the One-, Two-, and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical Manual II. Version 5
- Stofberg, S. F. en M. H. J. van Huijgevoort (2024). Inzicht in het watersysteem door toepassing van een systeemmodel Nieuwegein, KWR <https://library.kwrwater.nl/publication/71685248/inzicht-in-het-watersysteem-door-toepassing-van-een-systeemmodel/>
- Stofberg, S. F., M. H. J. van Huijgevoort, H. J. Krajenbrink en E. A. Brakkee (2024). Interventies in het watersysteem Nieuwegein, KWR <https://library.kwrwater.nl/publication/71685755/interventies-in-het-watersysteem/>
- TNO. (2024). "DINoloket." from www.dinoloket.nl.

- Van Berkel, J., K. Baas, P. Bogaart, L. Egelmeers, R. Delahaye en S. Schenau (2022). Water accounts for the Netherlands. Den Haag, CBS <https://www.cbs.nl/en-gb/publication/2023/03/water-accounts-for-the-netherlands>
- Van de Kerk, A. J. (2005). DWAAS. Vervolgonderzoek rioolvreemd water. Utrecht, STOWA
- Van den Eertwegh, G., J. van Bakel, H. Massop, J. van Dam, F. Bosveld en A. Veldhuizen (2020). Efficiëntie van berekening <https://edepot.wur.nl/531301>
- Van den Herik, A. G. (1978). "Een rioolstelsel met grote hygienische betrouwbaarheid." *H2O* **11**(13).
- Van der Gaast, J. W. J., H. T. L. Massop, H. R. J. Vroon en I. G. Staritsky (2006). Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken. Wageningen, Alterra <https://edepot.wur.nl/555186>
- Van der Molen, D. T., R. Pot, C. H. M. Evers, F. J. C. van Herpen en L. L. J. van Nieuwerburgh (2018). REFERENTIES EN MAATLATTEN VOOR NATUURLIJKE WATERTYPEN VOOR DE KADERRICHTLIJN WATER 2021-2027. Amersfoort, STOWA
- Van Genuchten, M. T. (1980). "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils." *Soil Science Society of America Journal* **44**(5): 892-898.
- Vewin (2022). Vewin Drinkwaterstatistieken 2022. Den Haag, Vewin <https://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Cijfers/Vewin-Drinkwaterstatistieken-2022-NL-WEB.pdf>