

Bedrijfstakonderzoek  
BTO 2022.002 | Juni 2022

## Visualiseren van het watersysteem

Verkenning van methodes

Bedrijfstakonderzoek

**KWR**

Bridging Science to Practice



# Rapport

## Visualiseren van het watersysteem: verkenning van methodes

### BTO 2022.002 | Maart 2022

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

### Opdrachtnummer

40205/246 (Waterbeschikbaarheid en droogte lange termijn)

### Projectmanager

Ir. M.L. (Martin) van der Schans

### Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Bronnen en omgeving

BTO - Thematisch onderzoek – Klant

BTO – Thematisch onderzoek – Thema overstijgend

### Auteurs

E. (Esther) Brakkee MSc, dr. S.F. (Sija) Stofberg, dr. ir. M.H.J. (Marjolein) van Huijgevoort

### Kwaliteitsborger

Dr. ir. R.P. (Ruud) Bartholomeus

### Projectbegeleiding

Marleen van der Velden (Brabant Water), Martin de Haan (Brabant Water); Hanneke Vreugdenhil (Vitens); Marie-Louise Geurts (WML); Leon Kors (Waternet); Marieke van Gerven (Evides), Wout Kompagnie (Waterbedrijf Groningen), Ruben Wentink (Dunea); Vincent Dunon (de Watergroep)

### Verzonden naar

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

### Keywords

waterbeschikbaarheid, visualisatie, waterbalans

Jaar van publicatie  
2022

Meer informatie  
Esther Brakkee MSc.  
T +31 6 52825934  
E esther.brakkee@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



Juni 2022 ©

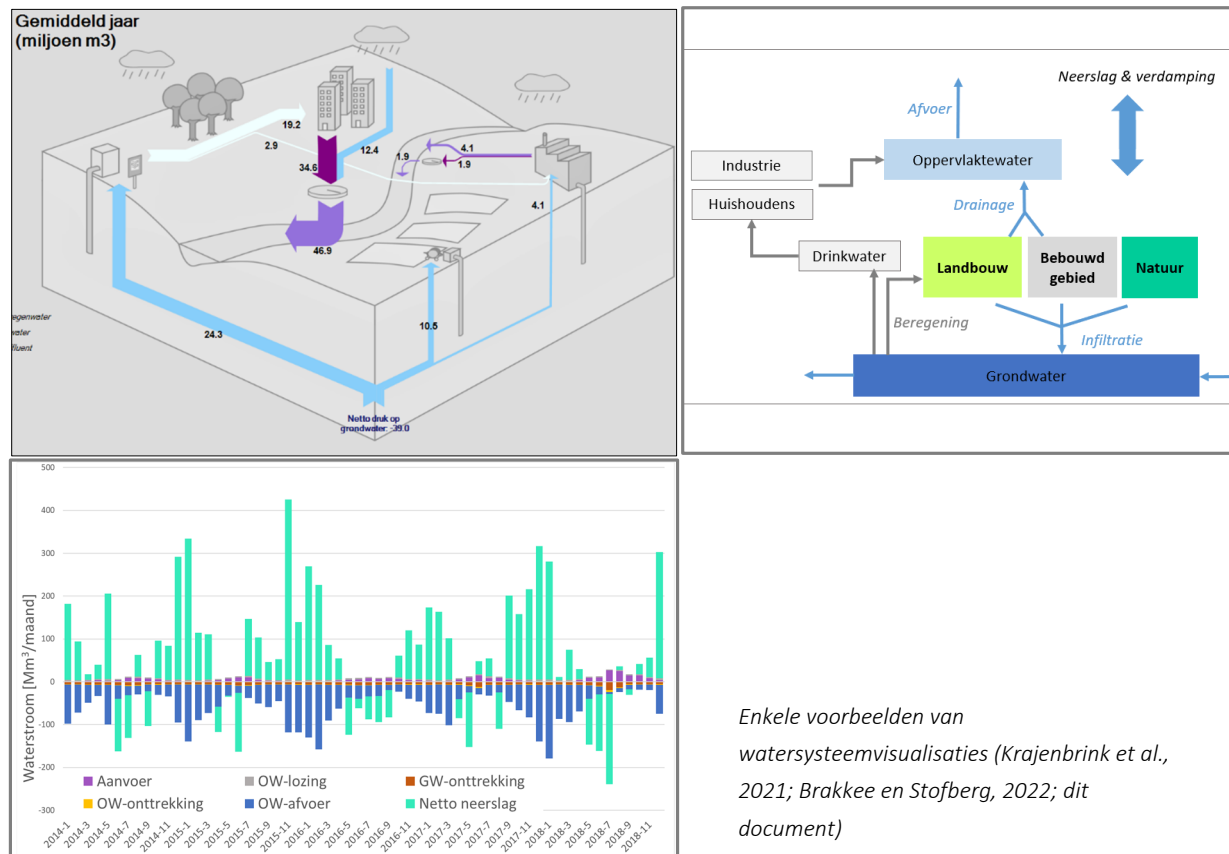
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen,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

# Managementsamenvatting

## Watersysteemvisualisaties ondersteunen werk aan regionale waterbeschikbaarheid

**Auteurs:** Esther Brakkee, Sija Stofberg, Marjolein van Huijgevoort

Om ook in de toekomst voldoende water te behouden is een integraal begrip nodig van de waterbronnen, -behoeftes en -stromen in regionale watersystemen. Visuele watersysteemoverzichten kunnen een waardevolle rol spelen om grip te krijgen op complexe watersystemen en hierover te communiceren. Daarom is een overzicht gemaakt van beschikbare methodes voor het maken van een visueel watersysteemoverzicht op regionaal niveau. Ook is hiervoor een praktisch stappenplan uitgewerkt. Het methode-overzicht uit deze studie kan direct worden toegepast om watersysteemvisualisaties in te zetten in studies rond duurzame waterbeschikbaarheid in de toekomst.



Enkele voorbeelden van watersysteemvisualisaties (Krajenbrink et al., 2021; Brakkee en Stofberg, 2022; dit document)

### Belang: Toenemende druk op waterbronnen vraagt om begrip van het watersysteem

Door klimaatverandering en de grote vraag naar ruimte staat in veel delen van Nederland en Vlaanderen de beschikbaarheid van water onder druk. In veel gebieden wordt gewerkt aan strategieën om effecten van droogte en waterbeschikbaarheid te beheren. Het volledige

regionale watersysteem, met een reeks op elkaar inwerkende natuurlijke en antropogene deelsystemen, is vaak complex en moeilijk te overzien. Bij waterbeschikbaarheidsvraagstukken is het daarom waardevol om een visueel overzicht te hebben van het watersysteem, waarin watervraag, -aanbod, -voorraden en -stromen zijn samengevat, zowel voor de natuurlijke als de



antropogene stromen ('waterketen'). Zo wordt duidelijk welke waterbronnen en -stromen een grote rol spelen in het systeem of nog onzeker zijn, wat helpt om verdere onderzoeksstappen richting te geven en oplossingen te ontwerpen. Een objectief, kwantitatief overzicht van het systeem is bovendien waardevol als 'gedeeld beeld van de werkelijkheid' als basis voor overleg tussen bijvoorbeeld stakeholders, verschillende gebiedspartners of onderzoekers.

### **Aanpak: Overzicht van methodes voor watersysteemvisualisaties**

Dit rapport biedt een informatiebasis en een praktische richtlijn voor het maken van watersysteemvisualisaties die toegepast kan worden op waterbeschikbaarheidsvraagstukken in uiteenlopende gebieden.

Eerst is in kaart gebracht welke methodes er beschikbaar zijn voor het maken van een regionaal *watersysteemoverzicht*: een kwantitatief visueel overzicht van watervraag en -aanbod, voorraden en stromen in een regio, voor de (semi)natuurlijke en antropogene watersystemen. Daarvoor zijn eerst bestaande onderzoeksvelden verkend die zich bezighouden met watersysteemoverzichten. Vervolgens is een generiek stappenplan ontwikkeld voor het maken van een watersysteemoverzicht voor een gebied, voortbouwend op recent onderzoek (Krajenbrink et al., 2021). Tot slot is verkend hoe watersysteemoverzichten uitgebouwd kunnen worden door naast waterkwantiteit ook aspecten als waterkwaliteit, watervoorraden, en betrouwbaarheid van gegevens mee te nemen.

### **Resultaten: Brede verkenning benaderingen en praktisch stappenplan**

De inventarisatie van benaderingen voor watersysteemoverzichten uit de literatuur laat zien dat verschillende onderzoeksgebieden relevante theoretische kaders en benaderingen hebben ontwikkeld, van fysisch-hydrologische benaderingen, methodes uit waterbeheer- en beleid tot sociaal-economische methodes. Onderdelen van deze onderzoekskaders kunnen ook inspiratie bieden voor toepassingen rond waterbeschikbaarheid.

Het ontwikkelde generieke stappenplan geeft algemene richtlijnen voor het maken van kwantitatieve watersysteemvisualisaties in vijf stappen:

1. Afbakening en maken van een conceptueel model;
2. Verzamelen en verwerken van data;
3. Ontwikkelen van scenario's;
4. Visualisatie en analyse;
5. Aanpassing en verfijning.

Binnen deze generieke stappen vraagt ieder vraagstuk en gebied om een eigen, mogelijk creatieve, aanpak. Het meenemen van waterkwaliteit, watervoorraden en onzekerheid kan een waardevolle toevoeging zijn op de kwantitatieve waterstroomanalyses, die in vervolgonderzoek verder kunnen worden getest en uitgebouwd.

### **Toepassing: Verdere ontwikkeling watersysteemanalyses voor waterbeschikbaarheid**

Ook bij vraagstukken rond drinkwaterwinningen vormen visuele watersysteemoverzichten een waardevol instrument. Drinkwaterbedrijven en hun partners kunnen deze watersysteemoverzichten gebruiken om de waterbeschikbaarheid rond drinkwaterwinningen of in grotere regio's in beeld te brengen en te verkennen hoe de drinkwaterwinning zich in de toekomst kan ontwikkelen, in relatie tot andere functies in het landschap. Ook kunnen de overzichten laten zien welke typen oplossingen geschikt kunnen zijn of welke effecten een specifieke ontwikkeling of ingreep heeft. Het methodeoverzicht uit deze studie kan direct worden toegepast om watersysteemvisualisaties in te zetten bij studies naar een duurzame drinkwaterbeschikbaarheid in de toekomst. Dit biedt ook kansen om de methodes uit te bouwen en te verbeteren.

### **Rapport**

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Visualiseren van het watersysteem: verkenning van methodes* (BTO 2022.002).

# Inhoud

<b>Managementsamenvatting</b>	<b>3</b>
<b>Inhoud</b>	<b>5</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>6</b>
Doel van dit overzicht	8
<b>2 Bestaande concepten voor kwantitatief watersysteemonderzoek</b>	<b>10</b>
2.1 Kwantitatieve hydrologie – de waterbalans	10
2.2 Material flow analysis	11
2.3 Water accounting	12
2.4 Geïntegreerde watersysteemmodellen en decision support tools	13
2.5 Voorbeelden van toepassingen	15
<b>3 Een algemene methode voor watersysteemoverzichten</b>	<b>17</b>
3.1 Stap 1: Conceptueel model en afbakening	18
3.2 Stap 2: Data en verwerking	20
3.3 Stap 3: Scenario's	25
3.4 Stap 4: Visualisatie en analyse	25
3.5 Stap 5: Aanpassing en verfijning	31
<b>4 Toevoegingen op watersysteemvisualisaties</b>	<b>32</b>
4.1 Waterkwaliteit in watersysteemvisualisaties	32
4.2 Watervoorraden in watersysteemvisualisaties	33
4.3 Onzekerheid in watersysteemvisualisaties	37
4.4 Toepassing voor drinkwaterwinningen	38
<b>5 Conclusies en toepassing</b>	<b>40</b>
<b>6 Referenties</b>	<b>41</b>
<b>I Bijlage: voorbeelden van visualisaties</b>	<b>44</b>

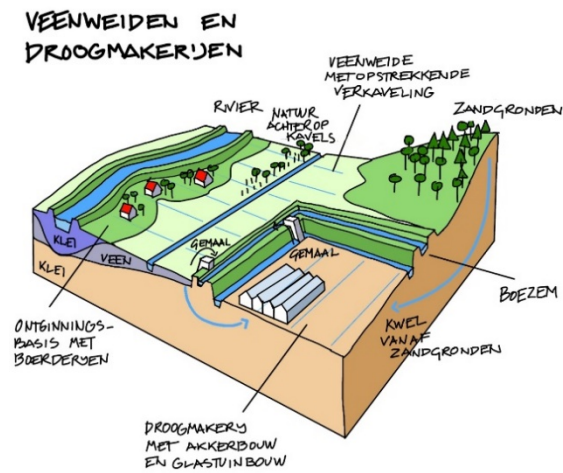
# 1 Inleiding

Door klimaatverandering en de grote vraag naar ruimte staat de waterbeschikbaarheid in veel delen van Nederland en Vlaanderen in toenemende mate onder druk. In verschillende regio's zal moeten worden gewerkt aan maatregelen om ook in de toekomst voldoende water te verzekeren. De *waterbeschikbaarheid* in een regio kan worden gekenmerkt als de balans tussen hoeveel water er aanwezig is - de som van alle (duurzaam) beschikbare bronnen - en in hoeverre deze in kwantiteit en kwaliteit kunnen voorzien in de waterafhankelijke functies in het gebied. Bij waterafhankelijke functies gaat het om functies die letterlijk water onttrekken, zoals drinkwaterwinning, maar ook ruimtelijke functies zoals landbouw en natuur. Om voor alle functies in een landschap voldoende waterbeschikbaarheid te garanderen, nu en op de lange termijn, is een integraal begrip nodig van het regionale watersysteem. De verschillende functies maken immers gebruik van dezelfde watervoorraden, en veranderingen in één waterstroom werken door op andere delen van het systeem. De vragen die bij het werken aan regionale waterbeschikbaarheid beantwoord moeten worden zijn:

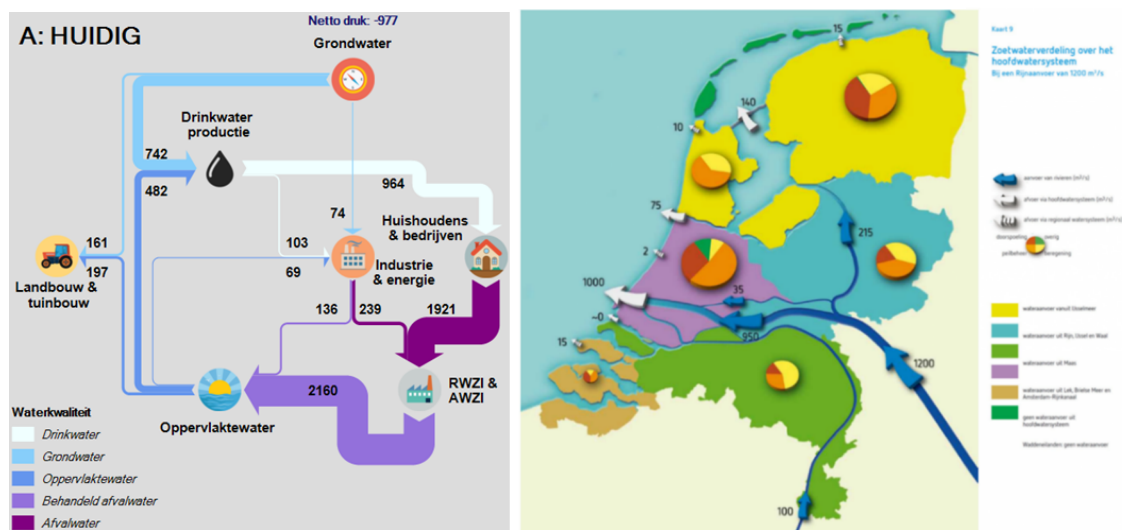
- Hoe steekt het watersysteem op dit moment in elkaar? Wat zijn de grootste waterstromen, bronnen en functies?
- Hoe zijn de beschikbare bronnen en watervragen verdeeld over de tijd en in de ruimte?
- Zijn er op dit moment al knelpunten in de watervoorziening?
- Hoe zal het watersysteem er in de toekomst uitzien, onder druk van klimaatverandering, verandering in inrichting en andere ontwikkelingen? Waar ontstaan dan knelpunten?
- Wat voor maatregelen zijn mogelijk om de waterbeschikbaarheid te verbeteren, en hoe werken deze door op het gehele systeem?

Het volledige regionale watersysteem, met een reeks aan op elkaar inwerkende natuurlijke en antropogene deelsystemen, is vaak een complex geheel dat moeilijk te overzien is. Bij waterbeschikbaarheidsvraagstukken is het dan ook vaak waardevol om een visueel overzicht te hebben van het watersysteem, waarin watervraag en – aanbod, voorraden en stromen op een samenvattende manier te zien zijn – zowel de natuurlijke als de antropogene stromen ('waterketen'). Zo'n overzicht maakt duidelijk welke waterbronnen en -stromen een grote rol spelen in het systeem of nog onzeker zijn, en helpt daarmee om verdere onderzoeksstappen richting te geven. Ook kan een objectief, kwantitatief overzicht van het systeem waardevol zijn als een 'gedeeld beeld van de werkelijkheid' als basis voor overleg tussen stakeholders.

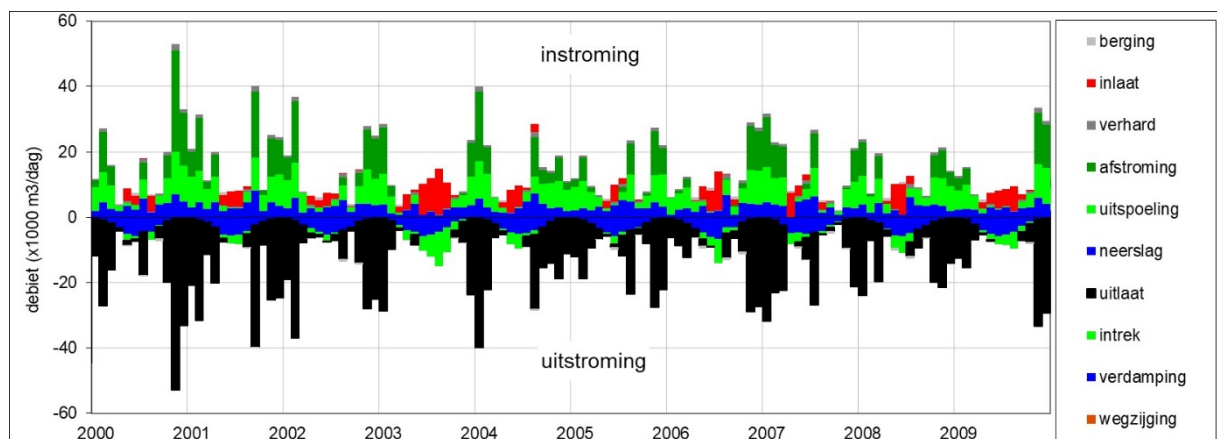
Visuele watersysteemoverzichten bestaan in verschillende vormen. Voorbeelden zijn kwalitatieve visualisaties (Figuur 1.1); kwantitatieve figuren zoals cirkeldiagrammen en stroom- en Sankey-diagrammen (Figuur 1.2), tijdreeksfiguren (Figuur 1.3); en meer generieke visualisaties van waterbeschikbaarheidsindicatoren (Figuur 1.4). Ook kan een interactief model of database worden gebruikt waarmee gebruikers zelf verschillende van dit soort visualisaties kunnen maken (Schütze et al., 2019).



Figuur 1.1: Kwalitatief systeemoverzicht (Dauvellier et al., 2013).

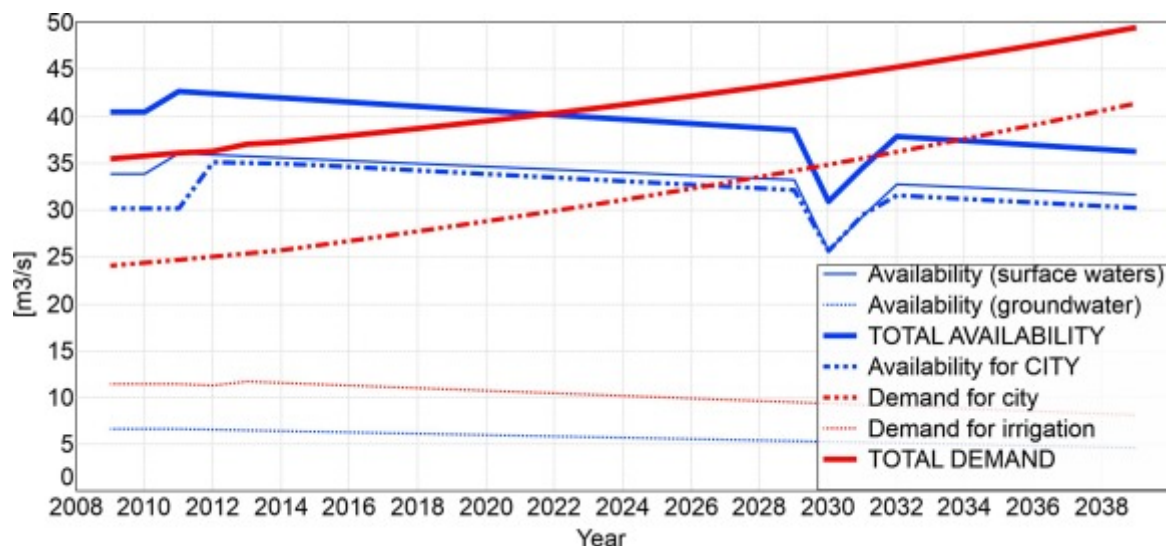


Figuur 1.2: Sankey-stroomdiagram van het menselijk watersysteem in Nederland (Pronk et al., 2020) en stroomdiagram van de hoofd-zoetwaterverdeling (Delsman et al., 2018).



Figuur 1.3: In- en uitgaande stromen in een polder-stroomgebied (Mandemakers et al., 2019).





Figuur 1.4: Generieke visualisatie van waterbeschikbaarheid in een stroomgebied in Peru (Schütze et al., 2019).

Al deze visualisaties bevatten soortgelijke informatie: welke waterbronnen, -vragers en -stromen zijn er en hoe groot zijn ze? Dit kan bekeken zijn als totaal of over de tijd, abstract of in de ruimte gesitueerd, apart gevisualiseerd of als totale indicator, en vaak voor verschillende scenario's. Dit type conceptualisaties kan worden gemaakt op alle schaal- en detailniveaus. Ze zijn vaak gericht op puur kwantitatieve waterstromen en -voorraden, maar het kan ook waardevol zijn om aspecten van kwaliteit (zoals in de Sankey in Figuur 1.2), ruimte en tijdsvariatie mee te nemen.

## Doel van dit overzicht

In dit document geven we een overzicht van beschikbare methodes en benodigde stappen voor het maken van een *watersysteemoverzicht* op regionaal niveau - de schaal van provincies tot individuele waterwinnings- of projectgebieden. Onder 'watersysteemoverzicht' verstaan we een kwantitatief visueel overzicht van watervraag en -aanbod, voorraden en stromen in de regio, waarin zowel het (semi)natuurlijke als het antropogene watersysteem zijn meegenomen. We richten ons op de kwantitatieve waterbeschikbaarheid omdat dit meestal de basis vormt voor het vraagstuk, maar bespreken ook andere relevante dimensies zoals waterkwaliteit.

Deze watersysteemoverzichten zijn vaak een eerste stap in een onderzoek of in planvorming voor een gebied. Ze dienen hierin om het systeem beter te begrijpen, kennisvragen te definiëren, voor communicatie, en als ondersteuning in managementbeslissingen of beleid. Specifieke doelen omvatten:

- Een globaal inzicht in welke stromen, watervragers en -voorraden er zijn, wat de onderlinge afhankelijkheden zijn, en ook welke kennis juist ontbreekt.
- Een eerste inzicht in huidige of mogelijke toekomstige knelpunten in de waterbeschikbaarheid.
- Met verschillende stakeholders of projectpartners een gezamenlijk beeld verkrijgen van hoe het watersysteem eruit ziet. Dit betekent dat het overzicht meestal ook in nauwe samenwerking met hen wordt gemaakt.
- Een eerste inzicht in potentiële oplossingen om de waterbeschikbaarheid te verbeteren en hoe deze doorwerken door het hele systeem, mogelijk op basis van verkenningen met stakeholders. De werkelijke effecten van concrete maatregelen op verschillende functies moeten natuurlijk altijd nader onderzocht worden, maar de integrale overzichten kunnen nieuwe oplossingsrichtingen naar voren brengen en een eerste schifting in opties opleveren.

In recent onderzoek (Krajenbrink et al., 2021) is gewerkt aan een methode voor conceptuele watersysteemanalyses gericht op waterhergebruik, gebaseerd op ervaringen bij KWR. In dit onderzoek wordt

deze methode uitgebreid naar de bredere context van watersysteemvisualisaties voor waterbeschikbaarheid. In hoofdstuk 0 verkennen we bestaande onderzoeksvelden die zich bezig houden met watersysteemoverzichten. In hoofdstuk 3 wordt een generiek stappenplan ontwikkeld voor het maken van een watersysteemoverzicht voor een specifiek gebied. In hoofdstuk 0 gaan we in op onderdelen die nog minder verkend zijn: manieren om waterkwaliteit, watervorraden, en betrouwbaarheid van gegevens in de analyses mee te nemen. Daarnaast bekijken we hoe de toepassing specifiek voor drinkwaterwinningen en –gebieden eruit kan zien. In hoofdstuk 5 worden enkele conclusies gegeven.

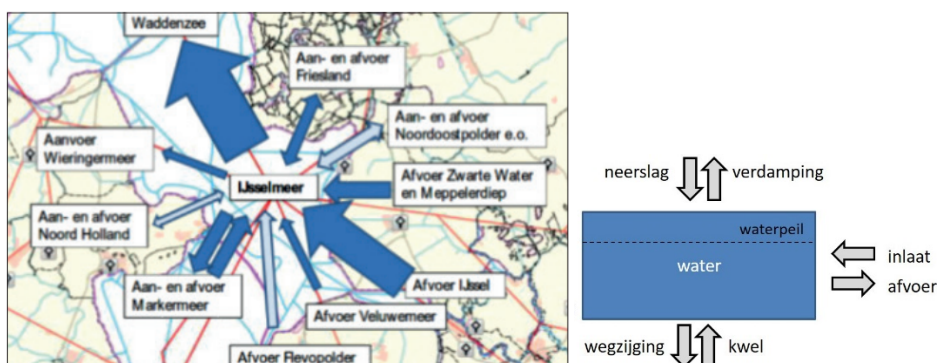
## 2 Bestaande concepten voor kwantitatief watersysteemonderzoek

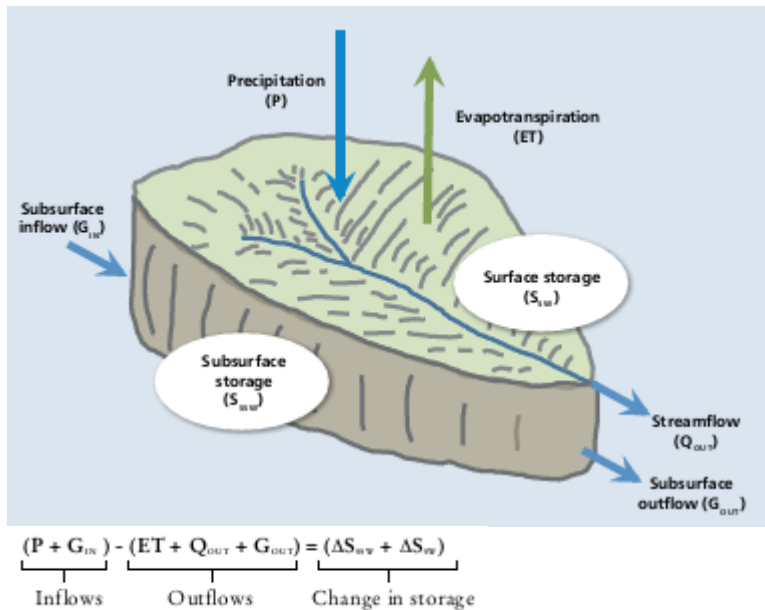
Binnen verschillende onderzoeksvelden in hydrologie en waterbeheer wordt gebruik gemaakt van kwantitatieve watersysteemoverzichten. Hier beschrijven we enkele onderzoeksvelden die sterk raken aan de hierboven geïntroduceerde watersysteemoverzichten. Dit zijn onderzoeksvelden die in de internationale (wetenschappelijke) literatuur gevestigd zijn en waar onderzoek en methodes omheen zijn gebouwd, maar die met elkaar overlappen. Ook geven we een overzicht van een aantal voorbeeldtoepassingen (Tabel 1). Concepten en methodes uit deze onderzoeksvelden zijn bruikbaar als input voor de generieke methode (hoofdstuk 3) en mogelijke toevoegingen daarop (hoofdstuk 0).

### 2.1 Kwantitatieve hydrologie – de waterbalans

Het opstellen van een waterbalans vormt de basis van veel (fysisch-)hydrologische analyses. Zo kan een balans worden opgesteld van gemeten in- en uitgaande waterstromen en waterpeilen van een waterlichaam zoals het IJsselmeer, om op basis hiervan bijvoorbeeld de verdamping te schatten of de beschikbaarheid van inlaatwater te bepalen (Figuur 2.1). Het opstellen van een waterbalans voor een bepaald afgebakend volume of gebied ligt ook aan de basis van veel hydrologische formules en modellen. Veel hydrologische modellen houden een waterbalans bij, op niveau van een stroomgebied (bijv. modellen als WALRUS of HBV; Brauer et al. (2014); Seibert (2005)) of individuele modelgridcellen (ruimtelijke modellen zoals Modflow; Harbaugh (2005)), en berekenen hieruit de dynamiek van afvoeren en grondwaterstanden (Figuur 2.1).

Een hydrologisch model voor een bepaald gebied bevat daarmee in zichzelf al een watersysteemoverzicht: het omvat alle waterstromen, -voorraden en afhankelijkheden die in het model zijn ingebouwd. In veel modeltools zijn dan ook opties beschikbaar om waterbalansoverzichten te maken, zoals in iMod (Vermeulen et al., 2020). De meeste hydrologische modellen omvatten echter niet het volledige watersysteem, en richten zich bijvoorbeeld alleen op het semi-natuurlijke grondwater- of oppervlaktewatersysteem. Er zijn modellen die een stap verder gaan en het grondwater, oppervlaktewater en antropogene systeem proberen te integreren. Het Nationaal WaterModel (Mens et al., 2020) omvat bijvoorbeeld zowel het grond- als het oppervlaktewatersysteem, en houdt rekening met onder andere verdelingsregels voor oppervlaktewater en de watervraag voor irrigatie. Op basis hiervan zijn in de Knelpuntenanalyses binnen het DPZW de waterbalansen voor deelgebieden van Nederland verder geanalyseerd, met name gericht op het hoofdwatersysteem (Mens et al., 2020). Dit type modellen wordt echter al snel complex en is daarmee niet eenvoudig om in hun geheel te interpreteren.

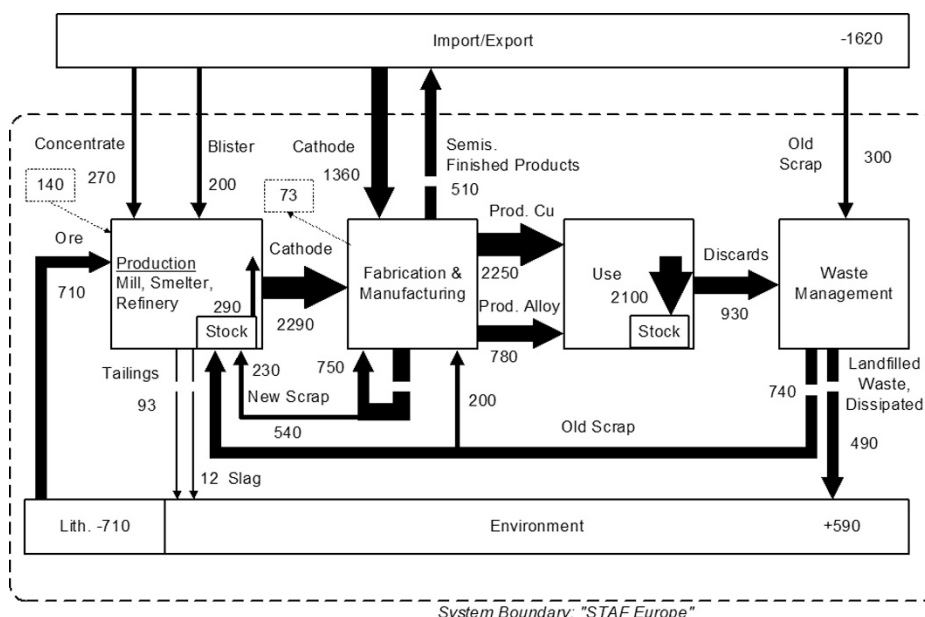




Figuur 2.1: Boven: Waterbalans termen voor een oppervlaktewaterlichaam (Buitelaar et al., 2015; Mandemakers et al., 2019); Onder: Waterbalans termen voor een stroomgebied (Batchelor et al., 2016).

## 2.2 Material flow analysis

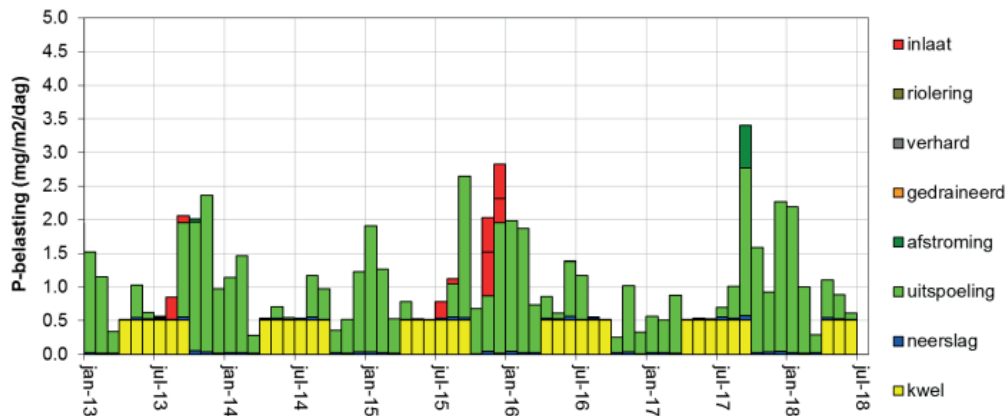
Material flow analysis is een begrip dat voortkomt uit de industriële ecologie, een onderzoeksgebied dat energie- en grondstofstromen in industriële systemen onderzoekt. Het gebied richt zich vooral op de efficiëntie en duurzaamheid van grondstoffengebruik. Material flow analysis (in het Nederlands meestal “stofstromenanalyse”) is een methode om de voorraden en stromen van een bepaalde stof of materiaal door een afgebakend systeem te kwantificeren en in beeld te brengen (Graedel, 2019). Dit systeem kan een landelijke economie zijn, maar ook een individuele fabriek of een ecosysteem. Alle belangrijke stromen worden meegenomen, op basis van een massabalans in iedere stap. Dit soort analyses is vooral toegepast op ruwe grondstoffen zoals metalen (Figuur 2.2), maar ook biomassa en energie (Krenn et al., 2015). Doel is om inzicht te krijgen in de duurzaamheid van grondstoffengebruik, efficiëntie van gebruik en hergebruik. De resultaten worden meestal gevisualiseerd in Sankey-diagrammen. Ook binnen dit onderzoeksveld zijn tools ontwikkeld om materiaalstromen te analyseren en visualisaties te maken (Cencic en Rechberger, 2008).



Figuur 2.2: Stroomanalyse van koper op Europese schaal (Graedel, 2019).



Behalve in industriële systemen worden ‘stofstromanalyses’ ook veel toegepast in ecologie- en milieustudies, om de routes van vervuilende stoffen in ecosystemen in kaart te brengen op basis van gemeten waterstromen en concentraties (Rozemeijer et al., 2018). Tools waarmee dit kan worden gedaan zijn onder andere de waterbalanstool van STOWA (Tanis et al., 2019; zie Figuur 2.3) en WEAP (SEI, 2021).

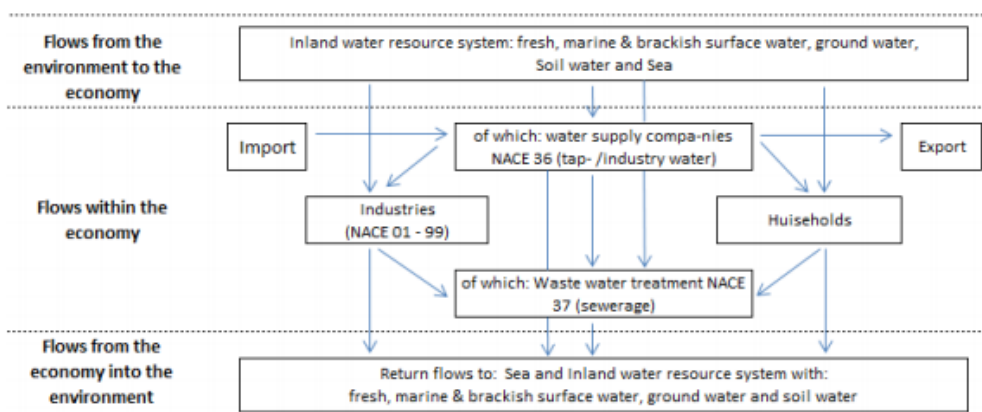


Figuur 2.3: Fosforbelasting naar een polder vanuit verschillende bronnen, zoals geschat met de STOWA-waterbalanstool (Tanis et al., 2019).

## 2.3 Water accounting

In het concept van Water Accounting wordt een economische denkwijze toegepast op het waterbeheer. Water Accounting is “the systematic study of the current status and trends in water supply, demand, accessibility and use in domains that have been specified.” (Batchelor et al., 2016). Behalve een kwantificering van waterbronnen en –onttrekkingen wordt vaak de stap gezet naar het in beeld brengen van de economische productiviteit van watergebruik en waterafhankelijke ecosystemendiensten. Daarbij worden veelal productiviteits- en duurzaamheidsindicatoren berekend, zoals voor de antropogene druk op waterbronnen, de efficiëntie van het watergebruik, de afhankelijkheid van bepaalde waterbronnen en het gebruik ten opzichte van de duurzame aanvulling (o.a. Batchelor et al., 2016; Karimi, 2014). Dit soort analyses wordt vaak uitgevoerd in samenwerking met stakeholders en is bedoeld als directe input voor waterbeheer en –beleid; Batchelor et al. (2016) geeft een uitgebreide beschrijving van de methodes.

Verschiedende organisaties hebben standaardmethodes opgesteld om dit soort water accounts te maken, waaronder het WA+-framework van de FAO (Batchelor et al., 2016; Karimi, 2014) en het SEEA-Water framework vanuit de VN (UN, n.d.). De onderdelen van de SEEA water account zijn weergegeven in Figuur 2.4. Het eindresultaat zijn standaardtabellen van de verschillende waterstromen in verschillende economische sectoren, die vervolgens tussen landen of regio’s vergeleken kunnen worden. SEEA-type water accounts zijn opgesteld voor verschillende landen, waaronder Nederland (Graveland et al., 2017).



Figuur 2.4: Onderdelen van het SEEA Water Accounting framework (Graveland et al., 2017).

De WA+ water accounting methode van de FAO werkt met visuele sheets van de ‘resource base’, ‘withdrawals’ en ‘productivity’ met samenvattende indicatoren (Figuur 2.4, Figuur I-8). De methode is meestal toegepast op de schaal van grote stroomgebieden, met een sterke focus op irrigatie en verdamping door landbouw en natuur; en op economische en ecologische diensten geleverd door het water. Er is een bijbehorende openbare database en een model (WaPOR) die beide sterk leunen op satellietdata (Karimi, 2014).

*Table 3.3: WA+ indicators for the Indus basin based on the situation in 2007*

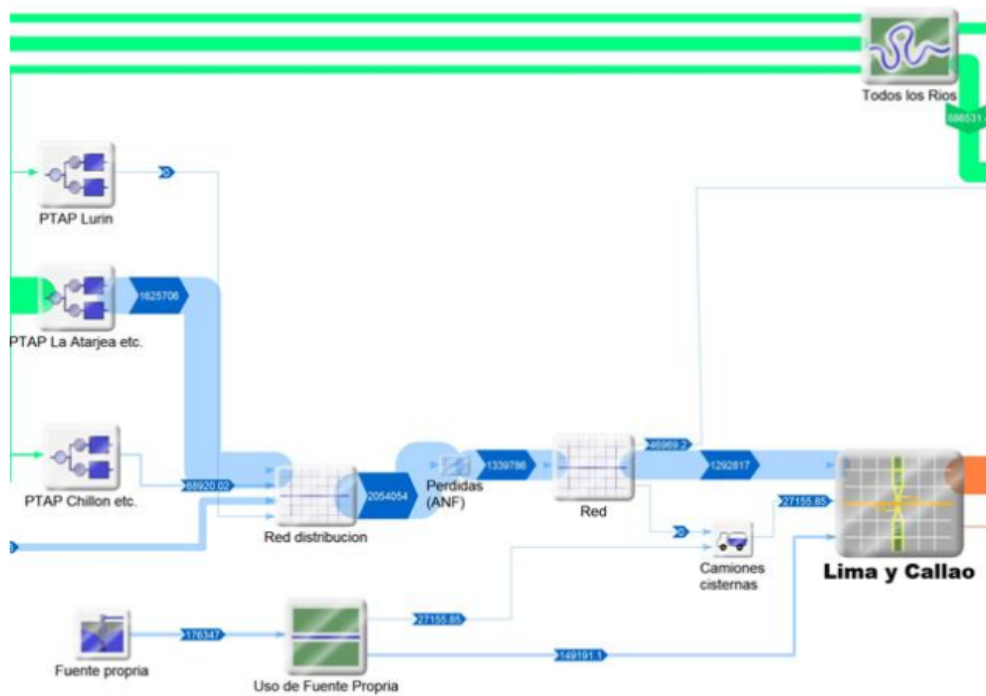
Indicators	Value	Unit	Remarks
<i>Resource base sheet</i>			
Exploitable water fraction	0.34		Plenty of renewable water resources
Storage change fraction	-0.23	-	Highly unsustainable practices
Available water fraction	0.93	-	Low amount assigned to reserved flow
Basin closure fraction	0.95	-	Almost closed to new development
Reserved flow fraction	0.58	-	Downstream requirements are met
<i>Evapotranspiration sheet</i>			
T fraction	0.46	-	Low canopy water depletion
Beneficial fraction	0.50	-	Low benefits from water depletion
Managed fraction	0.61	-	Many ET processes can be regulated
Agri. ET fraction	0.59	-	Agriculture is a major water consumer
Irr. ET fraction	0.85	-	Agriculture relies on irrigation water
<i>Productivity sheet</i>			
Land productivity <sub>crops</sub>	5020	kg/ha/yr	Very low crop yield
Land productivity <sub>pastures</sub>	177.4	kg/ha/yr	Extremely low grass yield
Water productivity <sub>crops rainfed</sub>	0.35	kg/m <sup>3</sup>	Rainfed crops not efficient with water
Water productivity <sub>crops irrigated</sub>	0.77	kg/m <sup>3</sup>	Irrigated crops not efficient with water
Food Irr. Dependency	0.90	-	Food security relies on irrigation
<i>Withdrawals sheet</i>			
GW withdrawal fraction	0.40	-	Reliance on groundwater is significant
CE (Classical irrigation efficiency)	0.84	-	Basin as a whole is an efficient system
Recoverable fraction	0.20	-	Recycling situation is normal

*Figuur 2.5: Samenvattende indicatoren voor de verschillende onderdelen van de WA+ Water Accounting methode voor het Indus-stroomgebied (Karimi, 2014).*

## 2.4 Geïntegreerde watersysteemmodellen en decision support tools

Het onderzoeksveld van water resource management richt zich meer op het antropogene deel van het watersysteem. Binnen dit onderzoeksgebied zijn methodes en modellen ontwikkeld waarin (natuurlijke) waterbronnen en het antropogene watersysteem geïntegreerd worden bekeken (‘water resource models’), waarbij vaak ook de waterkwaliteit wordt meegenomen. Voorbeelden van modellen zijn WEAP en Aquator (SEI, 2021; Hydro-Logic, 2021). Het natuurlijke watersysteem is hierin vaak versimpeld weergegeven.

Binnen het onderzoeksgebied van water governance wordt ook breder gewerkt aan watersysteemvisualisaties en (model)tools om besluitvorming en stakeholderdiscussies rond waterbeschikbaarheid te ondersteunen (Otinpong et al., 2017; Forni et al., 2016). Een voorbeeld is het LiWa-project (Schütze et al., 2019), een Duits-Peruaanse samenwerking gericht op de toekomstige watervoorziening van Lima en het bovenstroomse gebied. De natuurlijke en antropogene waterbalansstromen en de effecten van verschillende toekomstscenario’s zijn doorgerekend met een hydrologisch model; vervolgens is een interactieve tool ontwikkeld waarmee stakeholders verschillende oplossingsrichtingen konden uitproberen en de uitkomsten visualiseren (Schütze et al., 2019). Figuur 2.6 geeft een voorbeeld van deze “LiWatool”.



Figuur 2.6: Voorbeeld van een watersysteemopzet voor het stroomgebied rond Lima, Peru in het 'LiWaTool'-model (Schütze, n.d.).

Een nog verder gaande stap is het gebruik van serious games. Op dit moment wordt in Groningen gewerkt aan een serious game om stakeholders inzicht te geven en het gesprek aan te laten gaan over vraagstukken rondom de (toekomstige) zoetwatervoorziening in Groningen. Een ander voorbeeld uit Nederland is het werk van o.a. Van der Wal et al. (2016). Zij ontwikkelden een game waarin deelnemers een fictief stuk Nederlandse rivier moeten beheren; de effecten van de maatregelen die ze kiezen worden doorgerekend met een metamodel en de resulterende 'performance scores' teruggegeven aan de spelers.

## 2.5 Voorbeelden van toepassingen

Tabel 1 geeft enkele voorbeelden van toepassingen van de hiervoor genoemde benaderingen voor watersysteemanalyse. Deze voorbeelden kunnen inspiratie bieden bij het analyseren van het watersysteem van een nieuw gebied en vraagstuk.

Tabel 1: Enkele voorbeelden van toepassingen van een watersysteemoverzicht en -visualisatie.

Onderzoek	Doel	Data en modellen	Scenario's	Schaal	Kwaliteit & voorraden	Uitkomst
Verkenkend onderzoek waterhergebruik (Pronk et al., 2021)	Inzicht in antropogene druk op het watersysteem in huidige situatie en in toekomst; inzicht in mogelijkheden voor waterhergebruik	Uitvoer uit het LHM, vrij beschikbare data en data van organisaties	Huidig gemiddeld jaar en deltasceario STOOM	Nationaal; hoog- en laag-Nederland, Vlaanderen	Grove categorieën als kleuren meegenomen; voorraden niet meegenomen	Sankey-diagrammen
Physical water flow accounts with Supply and Use and water asset / water balance assessment NL (Graveland et al., 2017)	Opstellen SEEA water account voor Nederland (zie par. 2.3)	Vrij beschikbare en afgeschermdde databases; satellietdata	Huidige situatie	Nationaal; KRW-stroomgebieden	Kwaliteit beperkt meegenomen; voorraden uit studie Graveland & Baas 2012	Water account – tabellen en figuren van individuele stromen
RWZI als Waterfabriek voor een robuuste watervoorziening (Krajenbrink et al., 2021)	Regionale kansen en risico's van hergebruik RWZI-water in kaart brengen	Vrij beschikbare data en data van organisaties; WEAP	Huidige situatie gemiddeld en droog jaar en hergebruik-scenario's	Regionaal (rond AWZI en RWZI's, landbouw, drinkwaterwinning)	Grove categorieën als kleuren meegenomen; voorraden niet meegenomen	Sankey-diagrammen
Hergebruik industrieel restwater Bavaria (Brakkee et al., 2021)	Effect van subirrigatie op waterbalans in kaart brengen	Grondwatermodel Aa en Maas; data van organisaties; opschaling van veldmetingen	Gemiddelde situatie met en zonder subirrigatie	Lokaal (perceel) tot regionaal (gemeente)	Kwaliteit niet meegenomen	Sankey-diagrammen en grafieken vraag, aanbod en stromen
Draagkracht grondwater Noord-Brabant (Verhagen et al., 2017) en vervolg: Een verkenning naar de	Inzicht in verhouding onttrekking en aanvulling en gevoeligheid grondwatersysteem;	Brabantmodel	Huidige situatie, verschillende scenario's wateronttrekking en	Provincie en kenmerkende subgebieden	Kwaliteit niet meegenomen; grondwaterstanden en basisafvoer als	Simpele waterbalansen; effecten op grondwaterstanden



Watervraag van de Noord-Brabantse Natuur (Stuurman et al., 2020).	inzicht in de watervraag van natuur		klimaatverandering (KNMI-14), verschillende scenario's natuurherstel		voorraadindicatoren; kwantificatie benodigde grondwateraanvulling voor systeemherstel	en beekafvoeren; inschatting watervraag natuur
Water accounting in the Nile basin (FAO en IHE-Delft, 2020)/ algemeen WA+ methode (Karimi, 2014)	Inzicht in beschikbare en duurzaam winbare watervoorraden	WA+ methode, satellietdata en nationale datasets	Huidige situatie	Internationaal; stroomgebied	Niet meegenomen	Tabel-visualisatie van bronnen en gebruik; visualisatie waterproductiviteit en performance-indicatoren
Integrated modelling of a megacity water system – The application of a transdisciplinary approach to the Lima metropolitan area (Karimi, 2014)	Toekomstige problemen in watervoorziening in beeld brengen en gezamenlijke acties opzetten	Stakeholderoverleg; data van organisaties en satellietdata; HBV-model; simulator voor verkenning maatregelen 'LiWaTool' gebaseerd op SIMBA#	Huidige situatie en scenario's klimaatverandering en sociaaleconomische ontwikkeling	Regionaal, stroomgebied	Niet meegenomen	Tool voor visualiseren systeem en effecten scenario's, incl Sankeys; Performance criteria, common decision making
Water- en stoffenbalansen Groot Wilnis-Vinkeveen en Wilnis-Veldzijde (Mandemakers et al., 2019)	Inzicht in waterbeschikbaarheid en ecologische factoren	Waterbalanstool STOWA; regionaal grondwatermodel; openbaar beschikbare data; data van organisatie	Huidige situatie	Lokaal (polder)	Kwaliteit meegenomen via verblijftijd en o.a. fosforbalansen systeem en aandeel typen water in oppervlaktewater	Tijdreeksen van waterstromen en stofbalansen, verblijftijden
Lumbricus stofstromenanalyse; routes van nutriënten uit metingen (Rozemeijer et al., 2018)	Inzicht in aandeel verschillende bronnen aan water- en nutriëntstromen	Grondwatermodel + metingen afvoeren & chemie	Natte en droge situatie	Stroomgebied & substroomgebied	Voorraden impliciet meegenomen in menganalyse; kwaliteit meegenomen	Tabellen en cirkeldiagrammen van water- en stofaandelen in verschillende situaties

### 3 Een algemene methode voor watersysteemoverzichten

De literatuurverkenning in het voorgaande hoofdstuk geeft aan dat er in het bestaande hydrologie- en waterbeheeronderzoek op verschillende manieren wordt gewerkt met watersysteemoverzichten en waterbalansen, en dat er hierin veel verschillende mogelijkheden zijn. Binnen deze algemene context proberen we hier een concrete methode te beschrijven, die toegepast kan worden voor het maken van een kwantitatief watersysteemoverzicht voor een Nederlands of Vlaams doelgebied, met een objectief kwantitatief beeld van de belangrijkste waterstromen. Dit type kwantitatief overzicht kan voor veel studies rond waterbeschikbaarheid in Nederlandse en Vlaamse setting nuttig zijn, en daarom is het praktisch hiervoor een methode paraat te hebben. De methode beschreven in Krajenbrink et al. (2021) voor conceptuele watersysteemanalyses, gericht op waterhergebruik, wordt hier uitgebreid naar algemene kwantitatieve watersysteemvisualisaties voor waterbeschikbaarheid. De bredere context uit hoofdstuk 2 biedt vervolgens opties om aan deze kwantitatieve overzichten elementen toe te voegen in de richting van bijvoorbeeld beheermaatregelen en waterkwaliteit.

Wat voor type watersysteemoverzicht voor een bepaald gebied nuttig is, hangt af van de vraag die in de studie wordt gesteld. Zo kan de focus liggen op het in beeld brengen van de (potentiële) knelpunten in de huidige situatie of een toekomstscenario; of op het verkennen van oplossingen. Daarnaast bepaalt de ruimtelijke schaal van de studie en het benodigde detail welk type analyse zinvol is. Een watersysteemoverzicht is vaak onderdeel van een groter onderzoek- of planningsproject. Het overzicht kan een rol spelen in de verkenning, maar ook in meer gedetailleerde fases. Vaak zal in een onderzoek of project van grof naar fijn worden gewerkt, waarin ieder niveau input geeft voor het volgende (Batchelor et al., 2016; Krajenbrink et al., 2021). Voor ieder niveau zijn verschillende typen analyses en tools geschikt: zie Tabel 2.

Tabel 2: Verschillende detailniveaus voor watersysteemoverzichten en bijbehorende methodes.

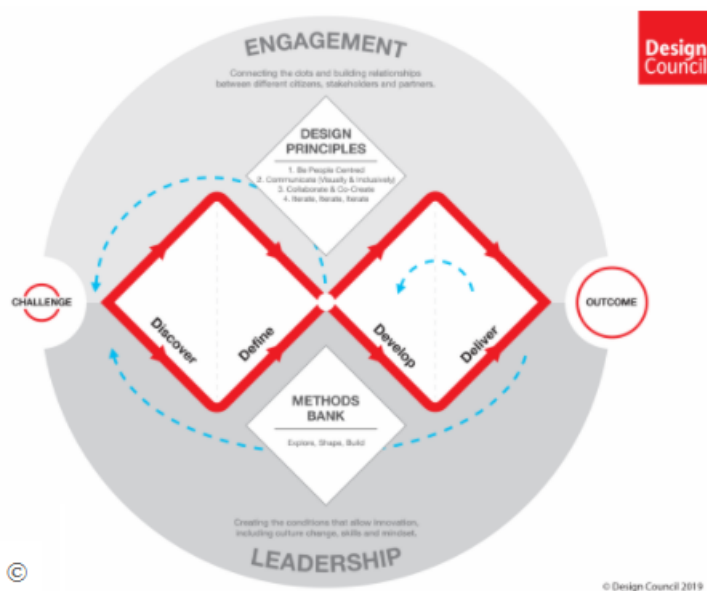
	Doel	Vaak gebruikte tijd- en ruimteschaal*	Methode/model	Visualisatie
Grof	Watersysteem, knelpunten en kansen globaal verkennen (beleid)	Regionaal of nationaal, jaar- of maandschaal	Openbaar beschikbare data en schattingen, overleg met gebiedsexperts	Kwalitatieve schets, infographic, taart- of balkdiagram, Sankey-diagram
↓	Knelpunten en kansen, mogelijke maatregelen in meer detail (beleid/management)	Kleinere regio, groep onttrekkingen, stroomgebied; maand- of dagschaal	Meetdata en schattingen gebiedsbeheerders, conceptueel hydrologisch model, procesgebaseerd hydrologisch model	Sankey-diagram, tijdreeksen van stromen en voorraden
Fijn	Lokale effecten van maatregelen (management/ operationeel)	Kleine regio, individuele winning of onttrekking; dagschaal	Procesgebaseerd hydrologisch model, meetdata gebiedsbeheerders, nieuwe metingen	Tijdreeksen van stromen en voorraden, kaarten

*\*Vaak zullen grovere analyses op grotere ruimtelijke schaal worden uitgevoerd, terwijl op kleinere schaal meer detail nodig zal zijn in de data en in de tijd. Dit is echter niet altijd het geval; ook voor kleinere gebieden kunnen grove analyses worden gemaakt en op grote schaal gedetailleerde visualisaties.*

Het maken van een watersysteemanalyse kan in vier hoofdstappen worden onderverdeeld (gebaseerd op Krajenbrink et al. (2021) en Batchelor et al. (2016)):

1. Conceptueel (kwalitatief) model en afbakening
2. Dataverzameling en modellering
3. Analyseren van scenario's en maatregelen
4. Visualisatie en interpretatie.

Meestal wordt aangeraden om in iteraties te werken, waarbij wordt begonnen met een versimpeld systeem, en vervolgens detail toe te voegen waar dat nodig is. Daarbij is het in het hele proces waardevol om met gebiedsexperts of stakeholders samen te werken. Dit zorgt ervoor dat de analyse aansluit bij de praktijk, dat deze toegespitst is op de belangrijkste onderdelen en schalen, en dat werkelijk een gedeeld beeld van de werkelijkheid wordt gecreëerd dat als basis kan dienen voor (gezamenlijke) discussies en beslissingen. Een mogelijk raamwerk is het 'double diamond'-framework, ontwikkeld door de Britse Design Council (Design Design-Council, 2021). Het framework geeft aan hoe in een eerste stadium van een onderzoeks- of ontwerpproces het probleem wordt verkend en vervolgens gedefinieerd met stakeholders (Figuur 3.1). De resultaten van het onderzoeks- of ontwerpproces (in dit geval de watersysteemvisualisaties) worden samen met de stakeholders verkend, waarna mogelijke oplossingen worden gedefinieerd. In het proces kan één of meerdere keren worden teruggekeerd naar een eerdere fase, om op basis van de resultaten aanpassingen te maken of een tweede meer gedetailleerde iteratie uit te voeren. Ook Batchelor et al. (2016) geven een beschrijving van hoe stakeholders kunnen worden betrokken in het proces van de watersysteemanalyse.



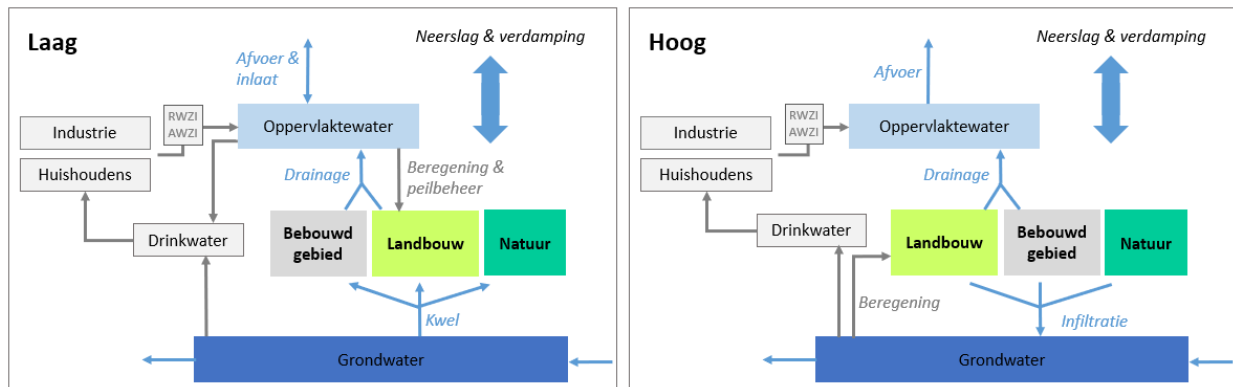
Figuur 3.1: 'Double Diamond'-model voor innovatief ontwerp (Design Design-Council, 2021)

### 3.1 Stap 1: Conceptueel model en afbakening

#### 1a: Conceptueel model

De eerste stap bestaat uit het opstellen van een eerste kwalitatieve schets van het watersysteem. Het gaat hierbij om een overzicht van de (grootste) watervragers, watervoorraden en waterstromen in het onderzoeksgebied, en hoe die met elkaar in verbinding staan, zonder deze nog te kwantificeren (Spijker et al., 2009). Daarbij gaat het

zowel om (beïnvloede) natuurlijke waterstromen, zoals infiltratie, drainage en verdamping, als om antropogene waterstromen, zoals drinkwaterwinning en -gebruik, beregening en effluent. Figuur 3.2 geeft voor laag- en hoog-Nederland hoe een basaal conceptueel model eruit kan zien. Welke onderdelen voor een specifieke studie worden meegenomen hangt echter af van de gebiedskenmerken en van het doel van de analyse: in sommige gevallen is het bijvoorbeeld zinnig om alleen op de antropogene waterstromen te richten (Pronk et al., 2020) of is het nodig onderscheid te maken tussen verschillende typen natuur of landbouw.



Figuur 3.2: Voorbeeld van kwalitatieve conceptuele modellen voor gebieden in laag- en hoog-Nederland.

In de eerste fase moeten, als basis voor het verdere onderzoek, de volgende vragen worden beantwoord:

- Welke watervragen en –stromen zijn van belang om mee te nemen?
- Welke vraagstukken spelen op dit moment of worden verwacht in de toekomst? Dit kunnen vraagstukken zijn zoals watertekorten, waterkwaliteitsproblemen, verdroging van natuurgebieden enzovoort.
- Aan welke criteria moet het watersysteem voldoen? Dit zijn kenmerken waaraan het watersysteem moet voldoen om als ‘goed functionerend’ beschouwd te worden. Dit kunnen kleinschalige, concrete criteria zijn zoals een minimaal debiet in een beek, voldoende kwel in kwelafhankelijke natuur, of het minimaliseren van nat- en droogteschade aan landbouw. Ook kunnen het bredere criteria zijn zoals een zo circulair mogelijk systeem of een goede balans tussen grondwateraanvulling en -onttrekking.

Deze vragen kunnen vaak worden beantwoord door algemene, direct beschikbare gebiedsinformatie te verzamelen; en door te overleggen met verschillende gebiedsexperts en stakeholders.

### 1b: Afbakening en doelstelling

Ook de afbakening van de watersysteemanalyse moet duidelijk worden aan het begin van de studie. Daarbij gaat het om:

- Conceptuele afbakening: welke onderdelen van het systeem worden meegenomen; wordt alleen naar kwantitatieve stromen gekeken of zijn ook kwaliteit, voorraden, ruimtelijke aspecten etc. van belang? Ook moet bepaald worden hoe systeemonderdelen precies worden afgebakend. In sommige gevallen is het bijvoorbeeld nuttig om twee of meer lagen in het grondwatersysteem te onderscheiden, in andere gevallen zal het als één voorraad worden beschouwd.
- Ruimtelijke afbakening: Waar ligt de grens van het studiegebied? De begrenzing kan een hydrologisch afgebakend gebied zijn, zoals een stroomgebied of een polder; of een administratieve eenheid die aansluit bij de schaal waarop beslissingen worden genomen, zoals een waterschapsgebied of een gemeente. Als gefocust wordt op een bepaalde stakeholder, bron of onttrekking kan het onderzoeksgebied als het invloedsgebied hier omheen afgebakend worden. De schaal van beschikbare data is ook een overweging voor het bepalen van de begrenzing. In de praktijk zal hierbij soms overwogen moeten worden hoe systeemgrensoverschrijdende waterstromen weergegeven worden, omdat eventuele effecten van ingrepen hierdoor verhuld kunnen worden.



- Tijdschaal en periodes: geven jaartotalen voldoende inzicht, of moet op maandschaal of kleiner worden gekeken? Dit hangt af van de verwachte variatie in de bronnen, vraag en stromen. Meestal zal het waardevol zijn om tenminste onderscheid tussen zomer en winter te maken, maar in het geval van bijvoorbeeld wateroverlast bij regenbuien kan een veel kleinere tijdschaal gewenst zijn. Vervolgens moeten concrete periodes worden gekozen waarover de waterbalansstromen worden berekend en gevisualiseerd. Een beeld van een gemiddeld jaar geeft zicht op de belangrijke invloeden op watervoorraden op meerjarig niveau, zoals relevant voor grondwatervoorraden en verdroging. Een beeld van een gemiddelde zomerperiode of groeiseizoen en/of een droge zomer geeft zicht op oorzaken van droogteschade en watertekorten in droogteperiodes.
- Scenario's: welke scenario's worden in beeld gebracht? Naast de huidige situatie is het vaak nodig om (toekomst)scenario's te bekijken. Dit kunnen scenario's zijn van verwachte externe ontwikkelingen, zoals klimaatverandering. Ook kunnen het scenario's zijn waarin bepaalde oplossingen of maatregelen worden toegepast. Op scenario's wordt verder ingegaan onder stap 3.

## 3.2 Stap 2: Data en verwerking

### 2a: Benodigde data en bronnen voor de huidige situatie

Tabel 3 (gebaseerd op Krajenbrink et al. (2021)) geeft een lijst van de benodigde gegevens voor een compleet watersysteemoverzicht voor de huidige situatie in een willekeurig Nederlands gebied. In de praktijk zullen niet alle stromen gekwantificeerd hoeven worden, bijvoorbeeld omdat ze in het onderzoeksgebied niet voorkomen of van weinig belang zijn voor de onderzoeksvragen. In hoger gelegen gebieden met weinig oppervlaktewater zal bijvoorbeeld infiltratie dominant zijn, is geen inlaat mogelijk en zal vooral grondwater worden gebruikt voor beregening, drinkwater en industrie; in andere gebieden zal oppervlaktewater juist dominant zijn als bron. In stedelijk gebied moeten oppervlakkige afstroming en rioleringsstromen worden meegenomen, in landelijk gebied kunnen deze minder belangrijk zijn.

Afhankelijk van het benodigde detail zal meestal temporele en ook ruimtelijk verdeelde data nodig zijn.

Aandachtspunten bij het verzamelen van data zijn:

- Welke periode wordt gebruikt voor het kwantificeren van de 'huidige situatie' of referentie, en eventueel voor een nat of droog jaar? Overlapt de tijdschaal van de data uit de verschillende bronnen voldoende? In het ideale geval wordt voor alle databronnen dezelfde periode aangehouden. Ook is voor het in beeld brengen van een gemiddelde situatie een voldoende lange reeks nodig: voor een klimatologisch representatief beeld worden meestal minimale periodes van zo'n 10 tot 30 jaar aangeraden. Aangezien beschikbare datareeksen vaak (veel) korter zijn, moeten bijvoorbeeld gericht jaren met 'gemiddelde' weerscondities worden geselecteerd, of is verlenging en harmonisatie van data nodig (Bartholomeus et al., 2008).
- Wat voor tijdstappen zijn nodig? Zijn jaartotalen of –gemiddeldes genoeg, of zijn tijdreeksen nodig?
- Op wat voor ruimtelijke schaal is data beschikbaar? Komen de ruimtelijke eenheden overeen met het studiegebied of is op- of neerschaling nodig?
- Moet onderscheid gemaakt worden tussen verschillende deelgebieden, zoals verschillende landgebruikstypen (bijv. landbouw, natuur, stedelijk) of verschillende landschapstypen, binnen het interessegebied? In dat geval is ruimtelijke data nodig (bijv. gridded data). In sommige modellen zoals iMod is ook mogelijk om direct een waterbalans voor een afgebakend gebied en tijdstap te maken (Vermeulen et al., 2020).

Vaak zijn voor een bepaalde stroom geen gegevens beschikbaar, of niet op de schaal van het benodigde gebied of tijdsperiode. In dat geval moeten schattingen of extrapolaties worden gemaakt. De drinkwatervraag kan bijvoorbeeld worden geschat op basis van het aantal inwoners en het gemiddelde verbruik of stromen die bekend zijn over een groter gebied kunnen op basis van oppervlak worden neergeschaald naar een kleinere subregio. Daarnaast kunnen gebiedsexperts of studies uit soortgelijke gebieden schattingen bieden van de orde grootte van

bepaalde stromen of de verhoudingen, bijvoorbeeld het aandeel oppervlakkige afvoer. Van sommige stromen, zoals de berekening voor landbouw, is weinig data beschikbaar en zijn schattingen ook lastig te maken (zie Tabel 3). Voor dit soort stromen kan het nodig zijn om verschillende informatiebronnen te vergelijken. Door het combineren van meetdata, modelresultaten en schattingen uit verschillende bronnen varieert de betrouwbaarheid van de kwantificering sterk tussen de verschillende waterstromen. Deze onzekerheden zijn belangrijk om in de visualisatie mee te nemen. Het omgaan met onzekerheid wordt verder besproken onder 4.3.

Tabel 3: Mogelijk benodigde gegevens en bronnen voor een watersysteemvisualisatie. Overgenomen en aangevuld uit Krajenbrink et al. (2021).

Semi-natuurlijke stromen	Mogelijke informatiebronnen	Aandachtspunten
Neerslag	KNMI-stations of geïnterpoleerde grids,	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bij onderscheid tussen landgebruikstypen is van al deze ruimtelijke stromen ook ruimtelijke data nodig.</li> <li>In modellen wordt veelal via de referentieverdamping (gegeven door KNMI) en potentiële verdamping (veelal verkregen door de referentieverdamping te vermenigvuldigen met een gewasfactor) de actuele verdamping berekend (reductie van potentiële verdamping door tekort/teveel aan beschikbaar water).</li> <li>In modellen worden verschillende definities gebruikt voor 'grondwateraanvulling' (vaak neerslag min actuele verdamping en snelle afvoer) en 'kwel-infiltratie' (vaak de stroom over de onderkant van de eerste modellaag of over de eerste scheidende laag). Afhankelijk van de locatie zal een keuze moeten worden gemaakt van de diepte waarop de verticale stromen worden bekeken. In het eenvoudigste geval wordt het grondwater als één voorraad beschouwd en worden kwel-infiltratiestromen weggelaten.</li> </ul>
Actuele verdamping	KNMI-stations of grids (referentieverdamping) + modelschattingen, bodemvochtmodel o.b.v. satellietdata, grondwatermodel	
Kwel en infiltratie/ grondwateraanvulling	Grondwatermodel	
Drainagestromen: stromen (ondiep) van land naar oppervlaktewater	Grondwatermodel, afvoergegevens, schatting uit waterbalans	
Landgebruik	CBS bestand bodemgebruik, basisregistratie gewaspercelen, modelinvoer	
Oppervlaktewater: aan- en afvoer	Gegevens waterschap, Rijkswaterstaat; oppervlaktewatermodel	
Grondwater: aan- en afvoer	Grondwatermodel	Deze variabele is niet meetbaar, maar kan uit modelberekeningen gehaald worden. Hierbij moet opgemerkt worden dat voor grote modellen (zoals het LHM) deze uitvoer vaak niet wordt opgeslagen.
Beheersregels oppervlaktewater, berekening (bijv. minimumpeilen, maximum debiet)	Waterschap	Als in- en uitlaat van oppervlaktewater of berekening niet bekend zijn maar worden geschat uit modelberekeningen, kunnen hiervoor de beheersregels nodig zijn.
Berging in bodem-, grond en oppervlaktewater	Sluitpost balans; grond- en oppervlaktewaterpeilen van waterschap en/of model	Deze stroom is niet altijd nuttig om te visualiseren, maar dit kan wel inzichten opleveren, zie par. 4.2.
<b>Antropogene stromen</b>	<b>Mogelijke informatiebronnen</b>	<b>Aandachtspunten</b>

Grondwateronttrekkingen of externe aanvoer t.b.v. drinkwater	Drinkwaterbedrijf, GWO database	Onttrekkingen die drinkwater leveren voor het gebied kunnen buiten de systeemgrenzen vallen, of leveringsgebieden voor een onttrekking binnen het gebied kunnen buiten de systeemgrenzen vallen. Er moet een keuze worden gemaakt welke hiervan nuttig zijn om in een overzicht mee te nemen.
Grondwateronttrekkingen t.b.v. land- en tuinbouw	Gegevens en schattingen waterschap, LGR (meldingen/vergunningen) i.c.m. modelresultaten (bijvoorbeeld LHM)	De meeste waterschappen hebben geen compleet beeld van de beregeningsonttrekkingen. Modellen als het LHM en verwante regionale modellen berekenen de beregeningsvraag, maar bevatten vaak verouderde gegevens van potentiële beregeningslocaties en weinig informatie over beperkingen op beregening. Beide databronnen zijn dus onvolledig; combineren van databronnen is in veel gevallen aan te raden.
Grondwateronttrekkingen t.b.v. industrie	Waterschap, provincie of LGR/emissieregistratie (RIVM) (meldingen/vergunningen)	
Oppervlaktewateronttrekkingen t.b.v. drinkwater	Drinkwaterbedrijf	Onttrekkingen die drinkwater leveren voor het gebied kunnen buiten de systeemgrenzen vallen, of leveringsgebieden voor een onttrekking binnen het gebied kunnen buiten de systeemgrenzen vallen. Overweeg of deze onderdelen toch meegenomen moeten worden, of juist niet (terug naar stap 1b).
Oppervlaktewateronttrekkingen t.b.v. land- en tuinbouw	Waterschap (meldingen/vergunningen) i.c.m. modelresultaten (bijv. LHM)	Meldingen en vergunningen geven vaak geen compleet beeld, maar modellen ook niet. Combineren van databronnen is in veel gevallen aan te raden.
Oppervlaktewateronttrekkingen t.b.v. industrie	Waterschap of Rijkswaterstaat; emissieregistratie (meldingen/vergunningen)	
Drinkwatergebruik huishoudens en kleinzakelijk	Drinkwaterbedrijf	Leveringsgebieden en onttrekkingen hoeven niet samen te vallen met de systeemgrenzen; eventueel kan de begrenzing worden aangepast.
Drinkwatergebruik industrie	Drinkwaterbedrijf	
RWZI-influent, DWA en RWA	Waterschap	Het influent naar RWZI's bestaat deels uit afvalwater dat meestal een relatief constante stroom vormt, een deel regenwaterafvoer dat varieert met de neerslag, en een deel 'rioolvreemd' water dat zowel constant als variabel kan zijn. Het onderscheid tussen de 'basisafvoer' en de 'variabele afvoer' kan bekend zijn bij het waterschap of uit de data zelf worden afgeleid.
RWZI-effluent	Waterschap	
Industriële lozing oppervlaktewater	Waterschap en/of Rijkswaterstaat, emissieregistratie	

IAZI-effluent	Waterschap en/of Rijkswaterstaat of industriële partij; emissieregistratie (alleen grotere stromen)	Blijkt in de praktijk niet altijd bekend bij overheden. Het opvragen van dergelijke data bij industriële partijen blijkt niet altijd succesvol.
---------------	--	---

## 2b: Tools en modellen

Na het verzamelen van de beschikbare data zijn verwerkingsstappen nodig om te komen tot de benodigde getallen voor de uiteindelijke visualisatie. Daarbij kunnen verschillende tools worden gebruikt. Stappen die meestal nodig zijn omvatten:

- Data organiseren en aggregeren voor de benodigde periodes en gebieden. De organisatie en berekening van waterbalansstromen kan worden gedaan in data-analysetools en scriptingprogramma's zoals Excel, GIS, R en Python. Ook kan de data worden ondergebracht in een watersysteemmodel zoals WEAP.
- Onbekende stromen invullen:
  - Stromen schatten of op-/neerschalen: GIS, scriptingprogramma's zoals R en Python
  - (Hydrologisch) modelleren van (natuurlijke) waterstromen: waterbalanstool STOWA, WEAP, ruimtelijke en conceptuele grond- en oppervlaktewatermodellen
  - Modelleren van antropogene waterstromen: water resource-modellen zoals WEAP (waterverdeling)
- Inschatten van scenario's: watersysteemmodel, Excel, scriptingprogramma's.

Tabel 4 geeft een overzicht van verschillende tools en modellen met hun toepassingen. Natuurlijk zijn veel meer mogelijke tools beschikbaar.

Tabel 4: Voorbeelden van bruikbare modellen en tools voor watersysteemoverzichten.

Model/tool	Doel	Voordelen	Beperkingen	Voorbeelden
Data organiseren en aggregeren				
Excel	Data organiseren en aggregeren; eenvoudige berekeningen	Eenvoudig bewerken en delen	Foutgevoelig, bewerkingen zijn niet reproduceerbaar	
Scripts	Data organiseren en aggregeren; eenvoudige & complexere berekeningen	Dataverwerking en aannames op te slaan en reproduceerbaar; aanpassingen makkelijk door te voeren; automatisering voor verschillende scenario's of deelgebieden	Hydrologische berekeningen niet eenvoudig te maken	
WEAP (SEI, 2021)	Organiseren van data; berekening van waterbalansstromen verschillende periodes en deelsystemen	Eenvoudige en complexere modelopzet mogelijk met evt. verdelingsregels; scenario's eenvoudig te organiseren	Weinig flexibiliteit in typen ingevoerde en berekende gegevens; weinig geschikt voor kwel- en poldersystemen	Krajenbrink et al. (2021)
STAN	Ondersteunen en visualiseren van Material Flow Analyses	Automatisch genereren van Sankey-diagrammen; aanvulling ontbrekende		Cencic en Rechberger (2008)

		stromen; onzekerheidsanalyse		
Aanvullen van ontbrekende gegeven en inschatten van scenario's: focus antropogene stromen				
WEAP	Inschatting van ontbrekende antropogene en natuurlijke waterbalansstromen; berekening van scenario's	Zowel eenvoudige als complexere modellering antropogene en natuurlijk systeem mogelijk; scenario's eenvoudig te organiseren en visualiseren	Weinig flexibiliteit in typen ingevoerde en berekende gegevens; weinig geschikt voor kwel- en poldersystemen	Krajenbrink et al. (2021)
Overige water resource-modellen				o.a. UWOT (Rozos en Makropoulos, 2013), AQUATOR (Hydro-Logic, 2021)
STAN	Ondersteunen en visualiseren van Material Flow Analyses	Aanvulling ontbrekende stromen; onzekerheidsanalyse		Cencic en Rechberger (2008)
Aanvullen van ontbrekende gegeven en inschatten van scenario's: focus semi-natuurlijke stromen				
Waterbalanstool STOWA	Eenvoudig modelleren hydrologische stromen	Weinig data nodig, specifiek voor Nederlandse situatie; kunt waterkwaliteit meenemen	Grove schattingen; gericht op laag-Nederland /poldersystemen	Mandemakers et al. (2019)
Andere 'lumped' niet-ruimtelijke hydrologische modellen	Modelleren hydrologische stromen	Minder data nodig dan ruimtelijk model	Menselijk watersysteem vaak niet meegenomen; soms beperkt in type systeem en in het combineren van gemeten data en modellering	o.a. WALRUS (Brauer et al., 2014), HBV (Seibert, 2005), waterbalanstool STOWA, WEAP; Schütze et al. (2019)
Ruimtelijk hydrologisch model	Modelleren hydrologische stromen	Volledige gegevens van grond- of oppervlaktewaterstromen, voor gewenste (deel)gebieden en periodes	Veel gegevens nodig, tijd voor opzetten en runnen	o.a. iMod/Modflow (Vermeulen et al., 2020) of bestaande regionale modellen
WA+	Modelleren (landschappelijke) hydrologische stromen	Geschikt voor grote gebieden met weinig beschikbare data	Beperkt tot grove tijd- en ruimteschaal; alleen landschappelijke stromen (neerslag, verdamping, grondwateraanvulling	Karimi (2014)

### 3.3 Stap 3: Scenario's

Naast de huidige situatie van het watersysteem is het vaak nodig om scenario's in beeld te brengen. Scenario's kunnen worden gebruikt om te onderzoeken hoe het watersysteem functioneert in een toekomstige situatie of onder verhoogde druk (externe ontwikkelingen). Ook kunnen potentiële maatregelen worden onderzocht die het watersysteem zouden kunnen verbeteren (gewenste scenario's).

Externe ontwikkelingen omvatten onder andere klimaatverandering en sociaaleconomische ontwikkeling. Ook kan specifiek een scenario worden opgesteld waarin het systeem onder druk staat, zoals in geval van een ernstige droogte. Voor Nederland worden vaak de KNMI-scenario's (alleen klimaatverandering) of de Deltascenario's (klimaatverandering en sociaaleconomische ontwikkeling) gebruikt (Attema et al., 2014; Wolters et al., 2018). Voordeel is dat er invoerdata beschikbaar is en resultaten goed met andere studies vergeleken kunnen worden. Nadeel is dat de huidige scenario's mogelijk nog niet voldoende extreme klimaatsituaties laten zien: zo blijkt uit recente analyses (Philip et al., 2020) dat klimaatverandering op dit moment al leidt tot meer extreme droogtesituaties zoals in 2018; het is te verwachten dat deze trend in de toekomst verder doorzet. Ook kunnen de landelijke sociaaleconomische ontwikkelingen aangenomen in de Deltascenario's minder representatief zijn voor het specifieke onderzoeksgebied. Met gebiedsexperts of stakeholders kan worden bekeken welke scenario's nuttig zijn om te onderzoeken en kunnen eventueel gebiedsspecifieke toekomstscenario's worden opgesteld. Er bestaan verschillende methodes om met stakeholders scenario's te ontwikkelen, zie o.a. Schütze et al. (2019).

Door middel van scenario's kan ook het effect van één of meerdere maatregelen op het watersysteem worden onderzocht. Wanneer het doel is om de effecten van een specifieke maatregel op het watersysteem te begrijpen (Krajenbrink et al., 2021; Brakkee et al., 2021) kan voor die specifieke ingreep een scenario worden opgesteld dat gericht kan worden doorgerekend. In veel gevallen zal echter nog niet één concrete maatregel in beeld zijn. In dat geval moet juist op basis van de uitwerking van de huidige situatie en externe scenario's worden gezocht naar potentieel zinvolle maatregelen. De watersysteemvisualisatie kan hierbij helpen: deze geeft aan welke stromen belangrijk zijn, en waar dus een substantieel effect van maatregelen te verwachten is; en laat zien waar mogelijkheden zouden kunnen liggen voor alternatieve inzet van waterbronnen (Van der Wal et al., 2016; Krajenbrink et al., 2021; Schütze et al., 2019). Hierbij is wel gebieds- en expertkennis nodig, omdat de doorwerking van ingrepen in het watersysteem met waterbalansdiagrammen alleen niet volledig zichtbaar gemaakt kan worden. Wanneer enkele potentiële ingrepen in beeld zijn kunnen deze in een gericht (model)onderzoek verder in beeld worden gebracht.

### 3.4 Stap 4: Visualisatie en analyse

De dataverzameling en -verwerking levert een set aan informatie op, die vervolgens gevisualiseerd en geanalyseerd kan worden. De informatie die gevisualiseerd moet worden, omvat meestal:

- Topologie van waterstromen: welke stromen zijn er en wat is waaraan verbonden;
- Omvang van waterstromen;
- Ruimtelijke oriëntatie: ligging of variatie van stromen in het landschap;
- Temporele variatie;
- Eventueel de kwaliteit van waterstromen of andere aanvullende kenmerken.

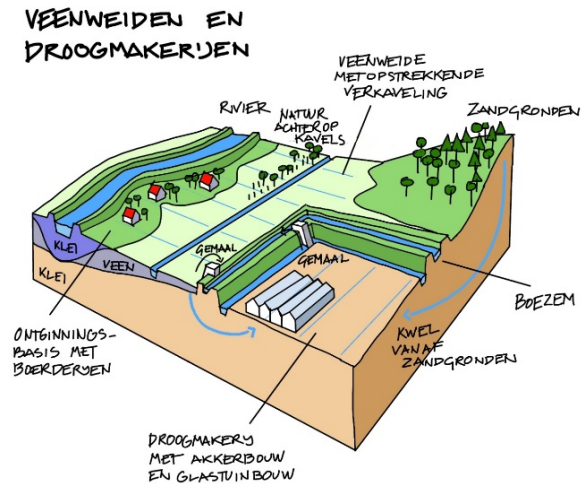
In bijlage 1 worden voorbeelden gegeven van verschillende typen visualisaties. We bespreken hier de belangrijkste typen aan de hand van deze voorbeelden.

#### Kwalitatieve visualisatie

- *Topologie van waterstromen*
- *Ruimtelijke oriëntatie*

➤ *Landschapskenmerken en -functies*

Dit kan een eenvoudig pijlendiagram zijn dat de bronnen en functies in een landschap weergeeft (zie stap 1a). Ook wordt vaak een meer aantrekkelijke visuele weergave van het systeem gemaakt (Figuur 3.3, bijlage I-I). Hierin kunnen naast de waterstromen en gebruiksfuncties ook de ruimtelijke inbedding en kenmerken van het landschap gevisualiseerd worden.



Figuur 3.3: Kwalitatief systeemoverzicht voor een Nederlands landschapstype (Dauvellier et al., 2013).

- Tools: pen en papier of digitale tools voor het maken van figuren en flowcharts, zoals Inkscape, Lucidchart, Xmind, Visio etc.
- Doel: eerste overzicht van belangrijke systeemonderdelen en afhankelijkheden; communiceren van systeemeigenschappen en fantasie stimuleren / inspireren

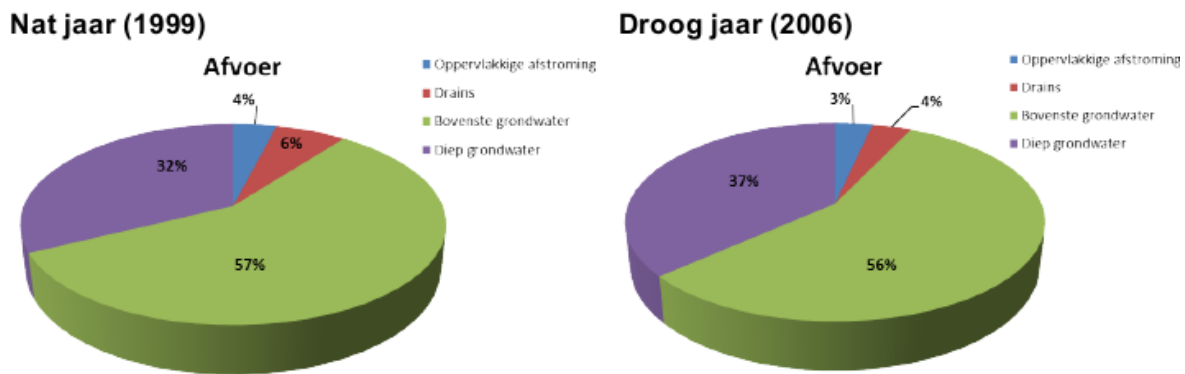
### Cirkel- en staafdiagrammen

- *Omvang van waterstromen*
- *Verhouding tussen waterstromen*
- *Afgeleide variabelen en indicatoren: watervraag en -aanbod, afhankelijkheid*

Dit is de weergave van stromen en/of voorraden in een specifieke tijdstap en scenario in cirkel- of staafdiagrammen. Hiermee kan duidelijk de grootte van verschillende waterstromen of -voorraden vergeleken worden. Behalve de waterstromen zelf kunnen afgeleide of geaggregeerde variabelen worden weergegeven, zoals de watervraag van verschillende sectoren/functies (Figuur I-6) of het aanbod uit verschillende bronnen; ook kan voor een specifiek gebruik of stroom van water het aandeel van verschillende bronnen worden weergegeven (afhankelijkheid) (Figuur 3.4); of voor een specifieke bron de bestemmingen van het water.

- Tools: WEAP, Excel, algemene datavisualisatietools, waaronder scripttalen, waarmee ook interactieve grafieken kunnen worden gemaakt.
- Doel: kwantitatief overzicht van onderdelen van het watersysteem



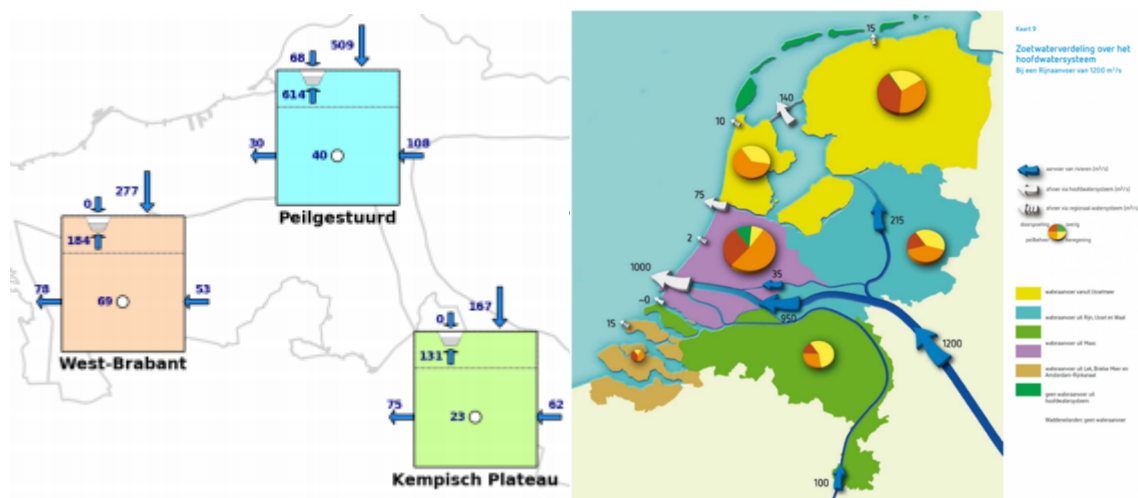


Figuur 3.4: Herkomst van water in het Vechtstroomgebied op basis van een stofstromenanalyse (Rozemeijer et al., 2018).

### Waterbalans- en stroomdiagrammen

- Topologie van waterstromen
- Omvang van waterstromen
- Evt. ruimtelijke oriëntatie, landschapkenmerken, kwaliteit

De stromen in een specifieke tijdstap en scenario worden hierbij samengevat in een (kwantitatief) stroomdiagram: hierin zijn de ‘nodes’ (gebruikers en bronnen) en ‘links’ (waterstromen) in het watersysteem weergegeven, met de groottes van stromen als getallen. Hiermee kan tot op zekere hoogte ook de ruimtelijke oriëntatie van de stromen worden weergegeven, zoals gedaan voor het Nederlandse hoofdwatersysteem in Figuur 3.5. In de achtergrond kunnen ook landschapkenmerken en -functies versimpeld worden weergegeven (Figuur 3.3). Ook zou de kwaliteit of andere toegevoegde variabelen met kleuren kunnen worden weergegeven.



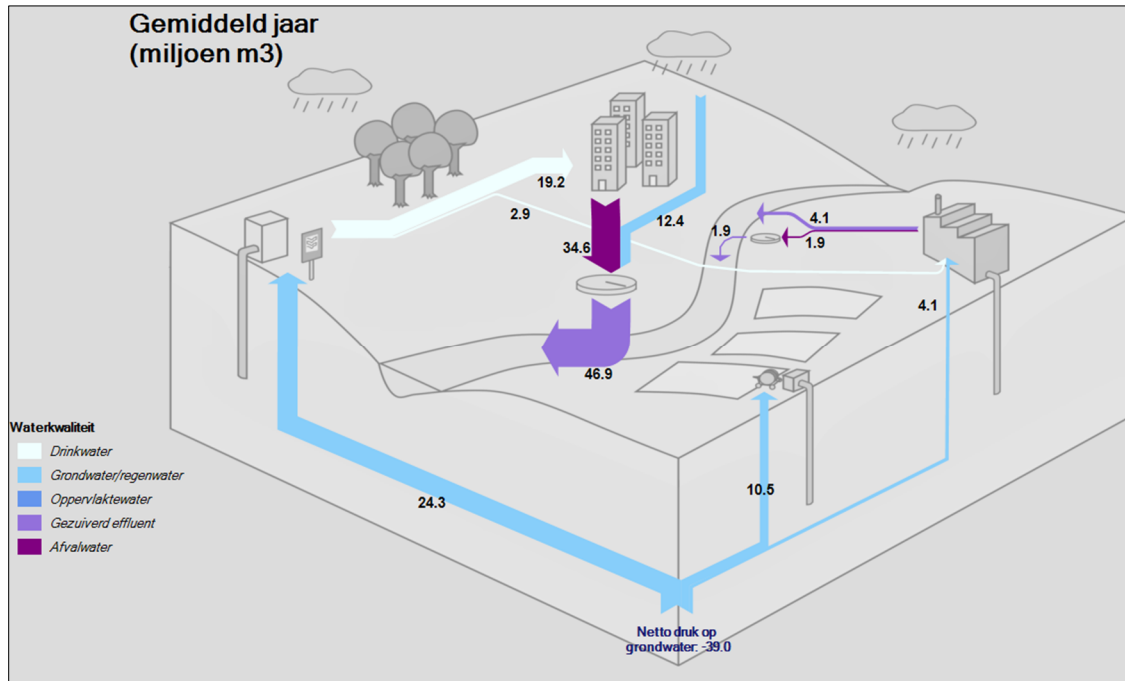
Figuur 3.5: Versimpelde waterbalansen ( $m^3/jaar$ ) voor deelgebieden van Noord-Brabant (Verhagen et al., 2017) en stroomdiagram van de hoofd-zoetwaterverdeling (Delsman et al., 2018).

- Tools: Digitale tools voor het maken van figuren en flowcharts, zoals Inkscape, Lucidchart, etc.; ook bijvoorbeeld de ‘water balance tool’ in iMod.
- Doel: kwantitatief overzicht van het watersysteem en de verbindingen hierin.

### Sankey-stroomdiagrammen

- Topologie van waterstromen
- Omvang van waterstromen
- Verhouding tussen waterstromen
- Evt. ruimtelijke oriëntatie, landschapkenmerken, kwaliteit

In een Sankey-diagram voor een specifieke tijdstap en scenario worden de 'nodes' in het systeem (bronnen en gebruikers) en de 'links' (stromen) weergegeven, waarbij de breedte van getekende pijlen overeenkomt met de grootte van een stroom. Ten opzichte van de eenvoudige stroomdiagrammen geeft dit een direct visueel overzicht van de grootte van stromen. In de visualisatie kunnen de landschapskenmerken en ruimtelijke inpassing op een versimpelde manier worden weergegeven (Figuur 3.6). Met de kleur van de pijlen kunnen toegevoegde variabelen zoals de waterkwaliteit of de onzekerheid worden gevisualiseerd.



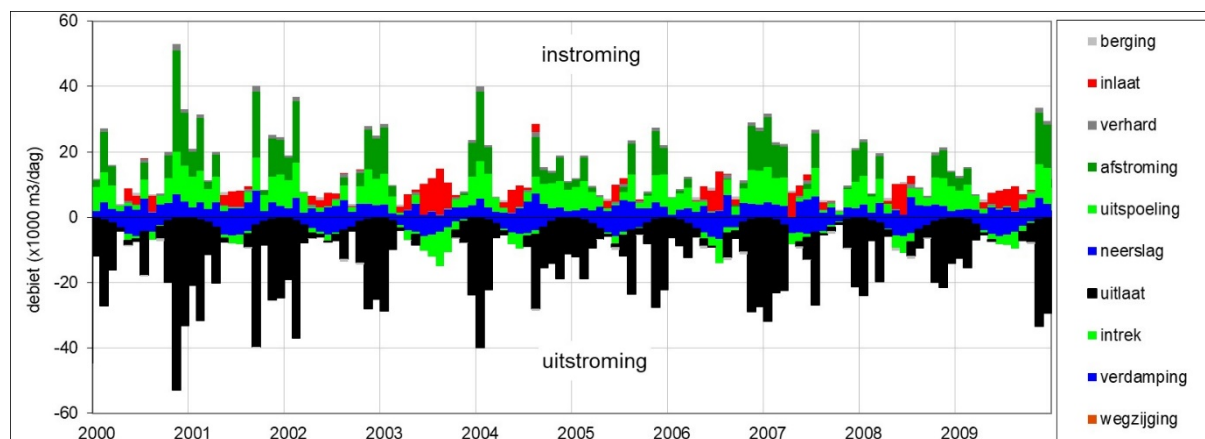
Figuur 3.6: Sankey-diagram van antropogene waterstromen in het Aarle-Rixtel-casusgebied vanuit het Waterfabriek-onderzoek (Krajenbrink et al., 2021).

- Tools: e!Sankey, STAN, Excel, programmeertalen. R-packages voor Sankey-diagrammen zijn o.a. NetworkD3, plotly, iGraph en PantaRhei. Vaak is nog wel enig handmatig werk nodig om de Sankey-diagrammen er visueel goed uit te laten zien.
- Doel: kwantitatief, visueel overzicht van het watersysteem en de verbindingen hierin.

### Tijdreeksgrafieken

- Omvang van waterstromen
- Verhouding tussen waterstromen
- Temporele variatie
- Evt. toegevoegde variabelen als kwaliteit

De variatie in verschillende stromen (of voorraden) over de tijd kan in grafieken worden weergegeven. Door stromen het systeem in als positief te definiëren en stromen het systeem uit als negatief geeft zo'n figuur direct een versimpelde waterbalans weer (zie Figuur 3.7). Behalve de waterstromen zelf kan bijvoorbeeld de watervraag van verschillende sectoren/functionies worden weergegeven, of het aanbod uit verschillende bronnen; ook kan voor een specifiek gebruik of stroom van water het aandeel van verschillende bronnen worden weergegeven (afhankelijkheid); of voor een specifieke bron de bestemmingen van het water.



Figuur 3.7: In- en uitgaande stromen in een polder-stroomgebied (Mandemakers et al., 2019).

- Tools: standaard datavisualisatietools, zoals Excel en scripttalen. Hiermee kunnen ook interactieve visualisaties worden gemaakt.
- Doel: meer gedetailleerd inzicht in de verschillende waterstromen, afhankelijkheden en waterbeschikbaarheid over de tijd.

### Watersysteemindicatoren

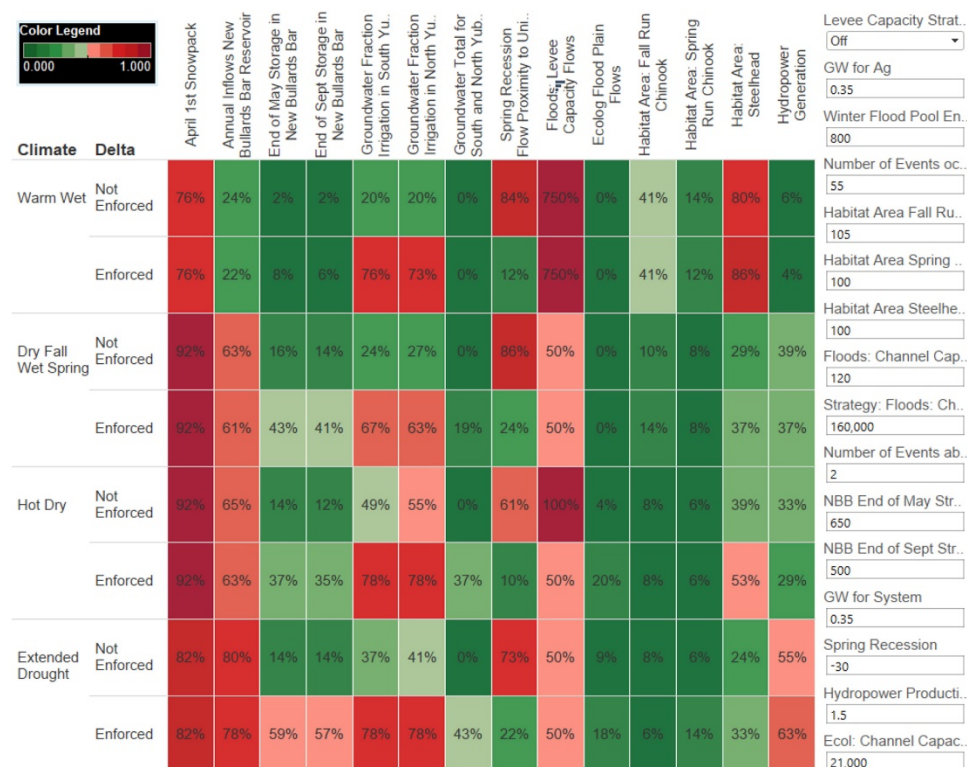
- *Samenvatten van resultaten*
- *Vergelijken van scenario's*
- *Voldoende of onvoldoende functioneren van het watersysteem*

De waterbeschikbaarheid en duurzaamheid van het watersysteem in een bepaalde tijdstap en scenario kunnen worden vertaald in indicatoren. Deze geven een samenvatting van hoe goed het watersysteem of een deel daarvan functioneert in één getal. Met één of meerdere van zulke indicatoren kunnen vervolgens scenario's worden vergeleken of bijvoorbeeld de prestatie van het systeem over de tijd worden gevolgd. Enkele voorbeelden van enkelvoudige indicatoren zijn:

- Aanbod/vraag-verhouding of in/uit-verhouding voor een deelsysteem of functie
- Antropogene druk op een bepaalde bron
- Afhankelijkheid van kwetsbare of externe bronnen (zelfvoorzienendheid)
- Watervoorziening voor bepaalde kritische functies (op kritische momenten), bijvoorbeeld de rivierafvoer benodigd voor plant- en diersoorten of de opslag in een reservoir aan het eind van het natte seizoen.

Daarnaast kunnen samengestelde indexen gebruikt worden, die een score geven aan de waterbeschikbaarheid of duurzaamheid van het gehele systeem. Er bestaan bijvoorbeeld indexen voor de waterschaarste van grond en/of oppervlaktewater, de duurzaamheid van het grondwatergebruik in een regio en de circulariteit van het systeem. Wat voor duurzaamheidsindexen geschikt kunnen zijn voor de context van Nederlandse drinkwaterwinningen wordt onderzocht in een stageproject (Bouma, 2021) en Werkpakket 2.2 van het BTO-programma Droogte & Waterbeschikbaarheid.

Deze indicatoren en indices kunnen vervolgens als tijdreeksen worden weergegeven of als stoplichtdiagrammen voor verschillende periodes of scenario's (Figuur 3.8). Uitgebreidere (model)studies kunnen de meer hydrologische indicatoren nog uitbreiden naar bijvoorbeeld de kosten van waterbeheer, landbouwopbrengst, ecologisch functioneren etcetera.



Figuur 3.8: Visualisatie van verschillende systeemindicatoren voor verschillende scenario's (Forni et al., 2016).

### Animaties en interactieve visualisaties

Om complexe watersystemen te begrijpen of scenario's te vergelijken kunnen animaties en interactieve visualisaties waardevol zijn. Zo kan met animaties in stappen op deelsystemen of stromen worden ingezoomd of kunnen veranderingen over de tijd worden gevisualiseerd. Met interactieve visualisaties kan gebruikers de mogelijkheid worden gegeven om zelf gewenste stromen, deelgebieden of samenvattende indicatoren in meer detail te bekijken. In verschillende studies is dit verder doorgetrokken naar interactieve scenario's, waarin gebruikers zelf de invoervariabelen of de opzet van het systeem kunnen aanpassen en daarvan direct de consequenties kunnen zien (Forni et al., 2016; Otipong et al., 2017). Een nog interactievere vorm wordt bereikt door gebruik van serious games (zie paragraaf 2.4).

### Analyse

Op basis van de gekwantificeerde stromen en de visualisatie van het watersysteem wordt de situatie geanalyseerd. Dit kan door onderzoekers gebeuren maar ook in samenwerking met stakeholders. Vragen waar de analyse zich op zal richten zijn onder andere:

- Vergelijken van vraag en aanbod in huidige en toekomstige situatie
- In beeld brengen van functies met een grote druk op het systeem
- Identificeren van knelpunten
- Evalueren of het systeem voldoet in verschillende scenario's op basis van criteria en systeemindicatoren
- In beeld brengen van afhankelijkheden en kwetsbaarheden in het systeem
- Inschatten waar in het systeem maatregelen potentie hebben
- In beeld brengen van kennisleemten.

### 3.5 Stap 5: Aanpassing en verfijning

Zoals toegelicht aan het begin van hoofdstuk 3 (zie Figuur 3.1) is het vaak nuttig om in de onderzoeken rond watersysteemoverzichten in iteraties te werken; en dus zo mogelijk te beginnen met een versimpeld systeem, grove tijdschaal, en eenvoudige modellen en makkelijk beschikbare data. Op basis van deze eerste stap kan besloten worden om aanpassingen en verfijningen te maken, bijvoorbeeld:

- In te zoomen op deelgebieden
- Bepaalde onzekere of onbekende stromen nader te onderzoeken
- Watervragers en –bronnen in subcategorieën op te delen
- Deelperiodes uit te werken
- Bepaalde scenario's of maatregelen in meer detail te onderzoeken.

## 4 Toevoegingen op watersysteemvisualisaties

De hierboven uitgewerkte methode voor het maken van watersysteemvisualisaties geeft overzicht in de kwantitatieve waterstromen in een gebied en maakt het mogelijk deze te evalueren. Op deze basismethode zijn enkele toevoegingen te maken, die helpen om de waterbeschikbaarheid beter te begrijpen. Hiervoor is het vaak nodig om de waterkwaliteit van verschillende bronnen in beeld te hebben; om behalve stromen ook voorraden te begrijpen; en om inzicht te hebben in de onzekerheid van de gekwantificeerde waterstromen.

### 4.1 Waterkwaliteit in watersysteemvisualisaties

In de watersysteemvisualisaties zoals besproken in de voorbeelden in hoofdstuk 3 ligt vaak de nadruk op waterkwantiteit. Voor de waterbeschikbaarheid voor verschillende functies is echter ook de kwaliteit van het water van groot belang. Binnen een lopend onderzoeksproject binnen het programma WiCE worden de mogelijkheden om waterkwaliteit mee te nemen in waterbeschikbaarheidsstudies verder verkend. De resultaten van een eerste verkenning (Krajenbrink, 2021) zijn in deze paragraaf meegenomen.

In Sankey-diagrammen, cirkeldiagrammen en andere watersysteemvisualisaties kan de kwaliteit als kleuren of met symbolen worden meegenomen. Welke aspecten van kwaliteit belangrijk zijn hangt af van de situatie en het doel van de studie. Wanneer het doel is om waterhergebruiksopties te verkennen, zal de toepasbaarheid van waterbronnen voor verschillende doeleinden of de benodigde zuiveringsinspanning van belang zijn. In andere gevallen speelt de ecologische waterkwaliteit een grotere rol. Afhankelijk van welke aspecten belangrijk zijn, kunnen de verschillende waterstromen in een regio kwaliteitscategorieën of -scores toegekend krijgen. Zo kan een onderscheid worden gemaakt in drinkwater-, grondwater-, oppervlaktewater- en afvalwaterkwaliteit (zie Pronk et al., 2021, Figuur 3.6). Ook kan een score worden toegekend op basis van de belangrijkste vervuulende stoffen of functionele stofgroepen als nutriënten, bestrijdingsmiddelen of medicijnresten. Een mogelijkheid is het gebruik van waterkwaliteitsindices; er zijn bijvoorbeeld indices ontwikkeld die de benodigde zuiveringsinspanning kwantificeren of de ecologische waterkwaliteit.

#### Tools voor waterkwaliteit

- Een meer gedetailleerd beeld kan worden verkregen door de waterstromenanalyse te combineren met een stofstromenanalyse. Wanneer van bepaalde belangrijke stoffen de concentraties bekend zijn in de verschillende bronnen, kan door de waterstromenanalyse (mengverhoudingen) een inschatting worden verkregen van de waterkwaliteit in verschillende onderdelen van het systeem. Dit idee is toegepast in de Stowa-waterbalanstool (Mandemakers et al., 2019), in WEAP (SEI, 2021) en in verschillende waterbalans-stofstromenanalyses voor onder andere de Vecht (Rozemeijer et al., 2018).
- Ook met andere, meer geavanceerde modellen kunnen kwaliteitsparameters in een watersysteem in beeld worden gebracht of voorspeld voor scenario's. Voorbeelden van modellen zijn de KRW-verkenner (zie bijvoorbeeld Beard et al., 2019), WEAP, en kwaliteitsfunctionaliteiten in hydrologische modellen zoals Hydrus, iMod en SOBEK.

#### Data voor waterkwaliteit

Data van de kwaliteit van grond- en oppervlaktewater zijn beschikbaar uit verschillende bronnen. Enkele belangrijke bronnen zijn:

- KRW-meetdata en factsheets: Waterkwaliteitsportaal en waterschappen
- Overige landelijke en provinciale meetnetten grond- en oppervlaktewater:

- o Landelijk Meetnet Effecten Mestbeleid, RIVM
- o Landelijk en Provinciaal Meetnet Grondwaterkwaliteit (RIVM en provincies)
- o Landelijk meetnet gewasbeschermingsmiddelen en bestrijdingsmiddelenatlas (oppervlaktewater)
- o Overige data grond- en oppervlaktewaterkwaliteit: waterschappen en drinkwaterbedrijven, overige organisaties
- Kwaliteit van reststromen: o.a. gegevens uit de emissieregistratie (emissieregistratie.nl) en de Watson-database; algemene data van de 'gemiddelde' kwaliteit van bronnen (bijv. Roex et al., 2017 voor RWZI-effluent).

## 4.2 Watervoorraden in watersysteemvisualisaties

Bij het analyseren van waterbeschikbaarheid voor verschillende functies in een landschap zijn vaak niet alleen de stromen, maar ook de voorraden van water in verschillende onderdelen van het systeem van belang. Veel belangrijke functies in het landschap zijn immers niet direct van waterstromen, maar van voorraden afhankelijk, zoals voldoende hoge grondwaterstanden. Bovendien geeft inzicht in voorraden een idee van hoe kwetsbaar waterbronnen zijn voor het tijdelijk wegvallen van de aanvulling of een (tijdelijk) verhoogd gebruik (Clevers et al., 2019); waar eventueel mogelijkheden zijn voor het opvangen van (toekomstige) watertekorten; en welke bronnen mogelijk niet duurzaam worden gebruikt. Belangrijk hierbij is dat de voorraadveranderingen zeer klein kunnen zijn ten opzichte van de voorraad zelf, terwijl deze wel grote effecten hebben, zoals het geval is bij een kleine verandering in grondwaterstanden in landbouw- of natuurgebied. Bij het onderzoeken en visualiseren van de watervoorraden moet hiermee rekening worden gehouden.

De belangrijke watervoorraden in een gebied zijn meestal het grondwater en meren of andere oppervlaktewaterbekkens. Ook het bodemvocht is een belangrijke voorraad, die echter vooral op korte termijn relevant is. De watervoorraad in grond- of oppervlaktewater (of een andere voorraad) kan op twee manieren worden bekeken. Ten eerste kan over een bepaalde periode de *verandering* in voorraad in beeld worden gebracht. Dit geeft aan in hoeverre een bron duurzaam wordt gebruikt en op welke momenten opslag en verbruik plaatsvinden. Ten tweede kunnen *absolute* watervoorraden in beeld worden gebracht. Dit geeft inzicht in de werkelijk (duurzaam) beschikbare waterbuffer op een bepaald moment. De absolute voorraad en de voorraadveranderingen hangen met elkaar samen. Zo is van gebieden waar grondwater wordt onttrokken, maar ook waar bijvoorbeeld een verhoogde drainage is ten opzichte van de natuurlijke situatie, bekend dat vaak een nieuw evenwicht ontstaat in de waterbalans van het grondwater. Hierbij zijn onttrekking en afvoer wel in balans met de aanvulling, maar bij een lager evenwichtsniveau (Stuurman et al., 2020; Gleeson et al., 2020). Dit betekent dat de voorraad wel stabiel is, maar grondwaterafhankelijke natuur of landbouw en oppervlaktewateren onvoldoende gevoed worden (te weinig kwel en basisafvoer, te lage grondwaterstanden). Het is dus relevant om zowel een beeld te hebben van de veranderingen in voorraad, als van de absolute voorraad of de 'vullingsgraad' van het grondwater- of oppervlaktewatersysteem: dit bepaalt of voldoende water beschikbaar is om te voorzien in voorraad-afhankelijke functies in het landschap. Een teveel aan voorraad (hoge waterstanden) kan juist tot wateroverlast leiden.

### Voorraadveranderingen in grond- en oppervlaktewater

Veranderingen in de watervoorraden in grond- of oppervlaktewater kunnen in beeld worden gebracht door:

- Bijhouden van de netto in- en uitstroom ('bergingsstroom') voor verschillende reservoirs
- Analyse van trends in gemeten grondwaterstanden en oppervlaktewaterpeilen
- Modelberekeningen van voorraden

Op korte termijn, bijvoorbeeld op seizoensschaal, geven voorraadveranderingen aan waar en wanneer opslag wordt gevuld en verbruikt. Over de lange termijn laten voorraadveranderingen zien of een bron duurzaam wordt gebruikt of mogelijk wordt uitgeput. In veel landen ter wereld, en ook in Nederland, vindt een zekere 'uitputting'



van grondwater plaats, waarbij waterstanden over een lange termijn een dalende trend laten zien (Richey et al., 2015; Knotters en Jansen, 2005). Verschillende veelgebruikte duurzaamheidsindices voor grond- en oppervlaktewatergebruik zijn gebaseerd op dit netto voorraadgebruik, zoals de vaak gebruikte fysische stressindex Q/R (onttrekking/langjarige aanvulling) (Gleeson et al., 2020). Ook binnen de Kaderrichtlijn Water is de langjarige voorraadverandering een belangrijk onderdeel voor het bepalen van de kwantitatieve toestand van grondwaterlichamen; deze wordt bepaald aan de hand van trends in grondwaterstanden (Lukács, 2019). Dit raakt dus aan de duurzaamheidsindices zoals kort besproken in 3.4 en verder uitgewerkt in werkpakket 2.2 van dit project.

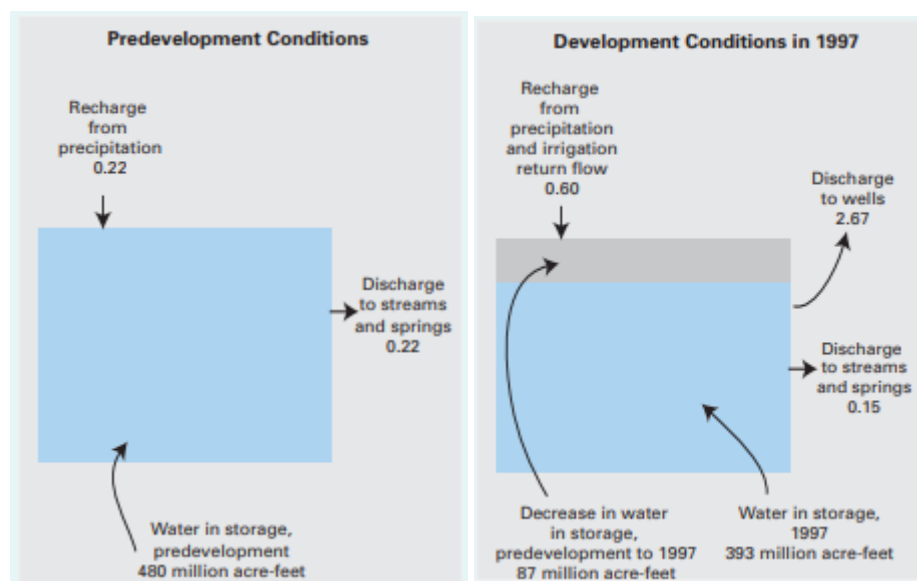
#### **Absolute voorraden: oppervlaktewater**

Voor oppervlaktewaterlichamen is het volume aan beschikbaar water redelijk eenduidig in te schatten uit waterstanden en waterdieptes. Het kan zinnig zijn om het totaalvolume te kwantificeren; ook kan of een beschikbaar volume worden gekwantificeerd boven een bepaald minimumniveau. Vaak is in (Nederlandse) bekkens en meren immers sprake van een vastgelegde bandbreedte in toegestane peilen, waartussen een bepaalde 'winbare waterschijf' bestaat. Voor bijvoorbeeld het IJsselmeer worden de waterniveaus en voorraadvolumes intensief gemonitord en beheerd (Klip, 2020). Clevers et al. (2019) hebben de voorraadvolumes geïnventariseerd van drinkwaterbekkens in Nederland en Vlaanderen. Ook zijn hierin 'overbruggingsperiodes' gekwantificeerd - de periode waarover de watervoorziening op peil kan blijven als de bron tijdelijk wegvalt. Ook in bijvoorbeeld de Waterbalanstool van STOWA worden op een versimpelde manier de watervoorraden en peilen in (polder)oppervlaktewater berekend op basis van de waterbalans (Mandemakers et al., 2019).

#### **Absolute voorraden: grondwater**

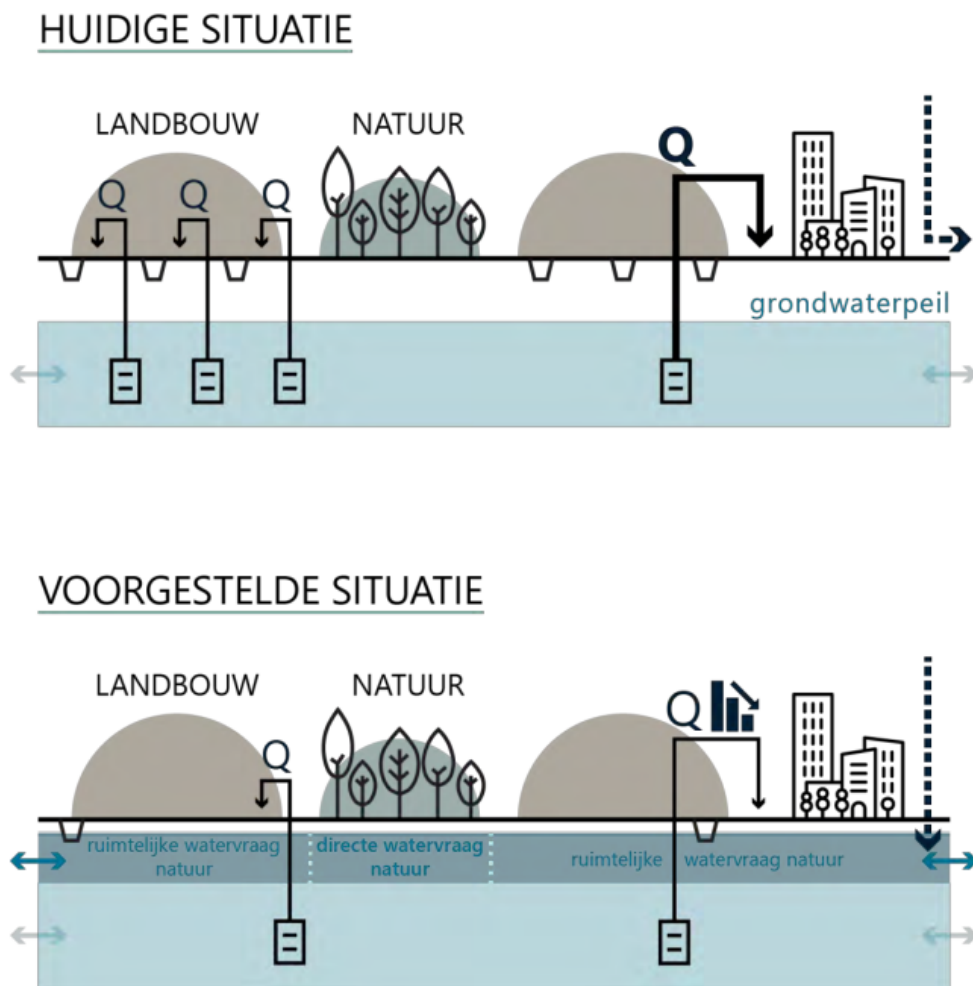
De absolute voorraad van grondwater in een bepaald systeem is een minder eenduidig begrip. Er bestaan verschillende methodes om de absolute voorraad in beeld te brengen.

- *Totaalvolume en (duurzaam) winbaar volume.* In de meest letterlijke zin kan het werkelijke volume aan grondwater in een aquifer worden geschat als de gemiddelde verzadigde diepte (grondwaterstand min aquiferbasis), vermenigvuldigd met het oppervlak van de aquifer. Zulke schattingen zijn gebruikt in een groot aantal (toegepaste) studies; zie Figuur 4.1 en I-10 en I-11. Dit is natuurlijk altijd een ruwe inschatting van een ordegrootte van de voorraad, die echter wel nuttig kan zijn. In de context van onttrekkingen wordt het grondwatervolume vaak omgerekend naar een 'winbaar volume' - een schatting van hoeveel van het water technisch winbaar is (MacDonald et al., 2012). Ook de absolute grondwatervoorraad is onderdeel van verschillende duurzaamheidsindicatoren voor grondwater (Gleeson et al., 2020).



Figuur 4.1: Ingeschatte absolute grondwatervoorraden in de High Plains-aquifer in het westen van de VS, voor en na start van de onttrekkingen (McGuire et al., 2003).

- *Dynamisch volume*. In plaats van het totaalvolume kan het volume boven een bepaald minimum-referentieniveau worden genomen, bijvoorbeeld de minimumstanden in de extreem droge jaren 1976 of 2018. Dit geeft aan hoeveel buffer er beschikbaar is ten opzichte van deze bekende droge situatie. Dit is te kwantificeren uit grondwaterstandsmetingen of –modellen als een volume of een gemiddeld waterstandsverschil. Ook kan op basis van gegevens van in- en uitgaande stromen een balans worden bijgehouden.
- De actuele ‘vullingsgraad’ van het systeem, en in hoeverre deze voldoende is om in grondwaterafhankelijke functies zoals natuur te voorzien, kan ook op een indirecte manier worden weergegeven. Zo wordt in de KRW-methode de kwantitatieve toestand van een grondwaterlichaam als onvoldoende beschouwd, wanneer grondwaterafhankelijke natuur of oppervlaktewater schade ondervinden door te lage grondwaterstanden, te weinig kwel of te weinig aanvulling uit grondwater. De toestand van grondwaterafhankelijke functies vormt hierin dus een indicatie of de grondwatervoorraad op een te laag (evenwichts)niveau ligt. Op een soortgelijke manier proberen Verhagen et al. (2017) de ‘draagkracht’ van het grondwatersysteem in beeld te brengen, op basis van de waterbalans, stijghoogtes, kwelaanvoer naar natuurgebieden en de basisafvoer van beken. De actuele watervoorraad in het watersysteem ten opzichte van een gespecificeerde wenselijke situatie kan ook naar waterhoogtes of volumes worden vertaald. Zo kan een lokaal of regionaal gewenst grond- of oppervlaktewaterniveau worden geschat of gemodelleerd, dat nodig is om in de waterbehoefte van natuur en andere behoeftes te voorzien. Vervolgens kan de actuele grondwaterstand of het volume worden berekend ten opzichte van dit gewenste niveau. Deze methode is toegepast door Stuurman et al. (2020) (Figuur 4.2).



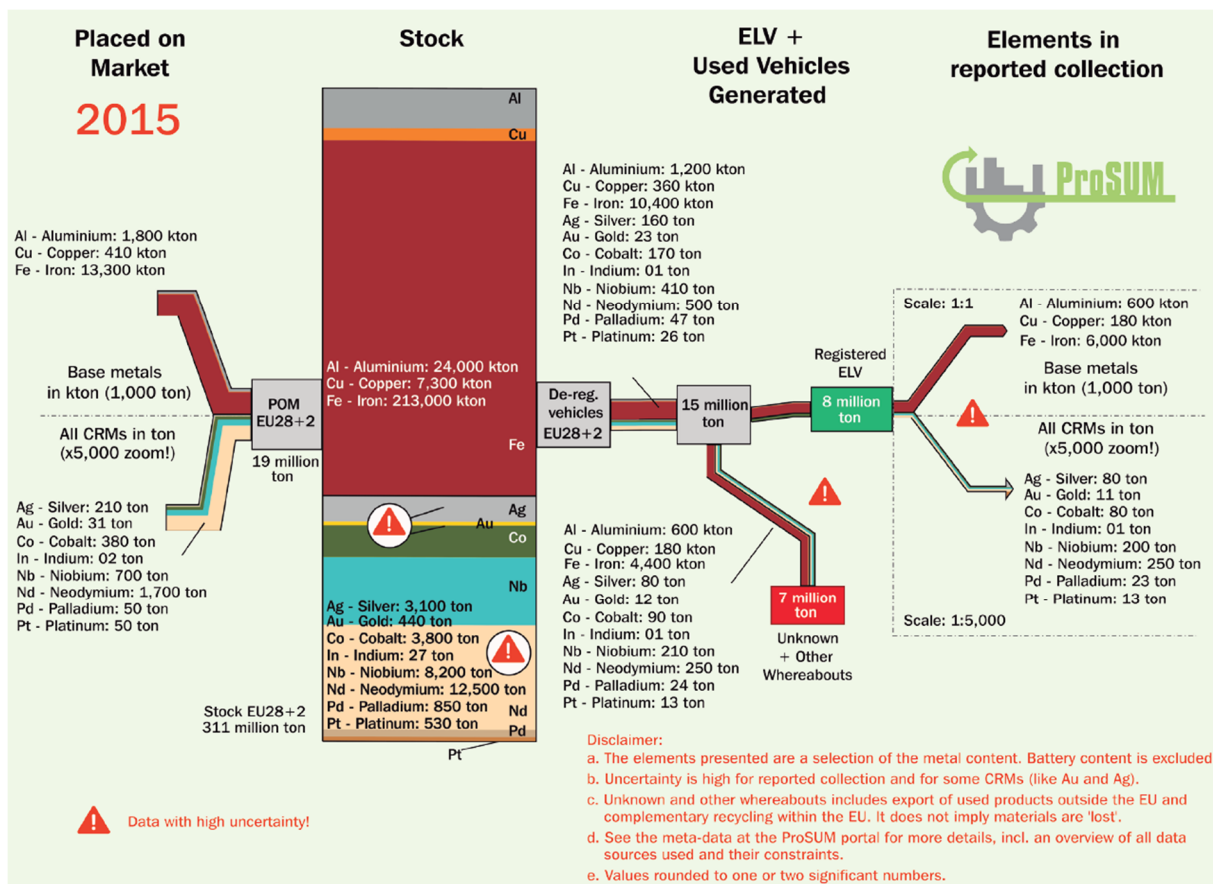
Figuur 4.2: Inschatting van de 'watervraag natuur' als benodigde waterstands/volumetoename voor het herstel van natuur (Stuurman et al., 2020).

#### Visualisatie

Watervoorraden kunnen in Sankey-diagrammen worden meegenomen in de grootte van de 'nodes' (zie Figuur 4.3 en I-9). Ook de bergingsstroom kan in Sankey-diagrammen worden meegenomen. In tijdreeksdiagrammen kunnen voorraden of de netto waterbalans worden weergegeven als som van alle in- en uitgaande stromen over de tijd.

Deze mogelijkheid is onderdeel van onder andere WEAP en de STOWA-waterbalanstool (zie Figuur I-18).

Indicatoren van vochttoestand/vullingsgraad, zoals waterstanden, kweldruk in natuur of waterstress zijn natuurlijk ook op allerlei manieren in kaarten en grafieken te visualiseren.

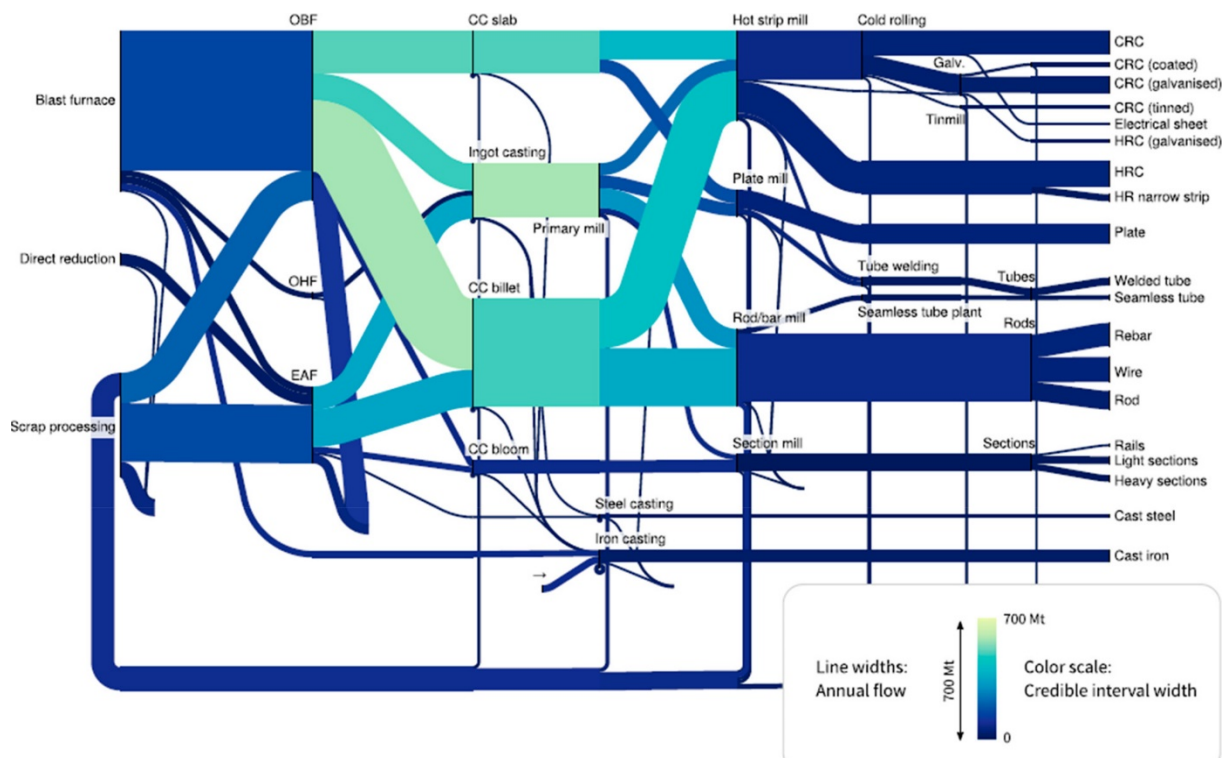


Figuur 4.3: Integratie van voorraden in een Sankey-diagram. In dit geval gaat het om voorraden van verschillende metalen in de EU (Huisman et al., 2017).

### 4.3 Onzekerheid in watersysteemvisualisaties

Bij het opstellen van een kwantitatief watersysteemoverzicht worden in de meeste gevallen gegevens gecombineerd uit verschillende bronnen met verschillende betrouwbaarheden. Vaak is een deel van de data afkomstig uit metingen, een deel uit modelberekeningen, en een deel uit ruwe schattingen. Sommige stromen zullen misschien überhaupt niet te kwantificeren zijn, maar moeten wel in het overzicht worden meegenomen. Het is dan ook waardevol om de onzekerheid in de kwantificering van de verschillende stromen te communiceren naar gebruikers van het uiteindelijke overzicht.

Dit kan op basis van bekende onzekerheden in de gebruikte invoerdata. De grootte van de onzekerheid in databronnen voor waterstromen is echter vaak onbekend. In dat geval kan op een niet-kwantitatieve manier de betrouwbaarheid worden aangegeven, door weer te geven welk deel van de data gemeten, gemodelleerd of geschat is; of op basis van de mate van conflicten tussen de bijgebrachte data, bijvoorbeeld niet-sluitende balansen of verschillen in schattingen uit verschillende databronnen. Binnen het material flow analysis - onderzoek (zie par. 2.2) is men al verder met onzekerheidsanalyses, en worden methodes ontwikkeld om onzekerheid te kwantificeren en communiceren (zie Figuur 4.4) (Meylan et al., 2017; Graedel, 2019).



Figuur 4.4: Sankey-diagram voor wereldwijde stromen van ijzer. De onzekerheid van de groottes van stromen is weergegeven met een kleurschaal (Graedel, 2019).

#### 4.4 Toepassing voor drinkwaterwinningen

Ook voor vraagstukken rond drinkwaterwinningen zijn watersysteemoverzichten een geschikte methode. Ze kunnen door drinkwaterbedrijven en hun partners worden gebruikt om de waterbeschikbaarheidssituatie rond drinkwaterwinningen of voor grotere regio's in beeld te brengen. Een watersysteemvisualisatie voor een gebied rond een drinkwaterwinning kan veel verschillende vormen aannemen, afhankelijk van de lokale uitdagingen. Toch zijn er enkele punten die vaak belangrijk zullen zijn bij watersysteemoverzichten voor drinkwatertoepassingen.

##### Doel van het overzicht

De besproken typen watersysteemoverzichten kunnen worden gebruikt om te verkennen of en hoe de drinkwaterbeschikbaarheid in een gebied in de toekomst onder druk kan komen te staan en hoe dit in relatie staat tot andere watervragende functies, om te bekijken wat voor typen oplossingen geschikt zouden kunnen zijn, of om de effecten van een specifieke ontwikkeling of ingreep te bekijken. Vaak zal bij het ontwikkelen van een watersysteemvisualisatie moeten worden samengewerkt met andere bodem- en watergebruikers in het gebied.

##### Conceptueel model en afbakening

De meest geschikte afbakening van het studiegebied hangt af van de focus van de studie. Als de focus ligt op de effecten van de winning kan het invloedsgebied van de winning als afbakening worden gekozen, dat vaak bekend is uit modelberekeningen (gebied waar de grondwaterstand significant wordt beïnvloed); als de focus ligt op de bronnen zal eerder het intrekgebied worden gekozen. Indien wordt samengewerkt met waterschappen of andere partijen kan het logischer zijn om een niveau te kiezen waarop beleid en (water)beheer plaatsvindt, zoals een stroomgebied. Ook kan naar de drinkwaterbeschikbaarheid over een grotere regio worden gekeken, waarbij bijvoorbeeld ook uitwisseling tussen subgebieden mee wordt genomen.

Bij het vaststellen van een schematisatie van het watersysteem (par. 3.1) is het belangrijk om de verschillende waterbronnen en -functies in de omgeving, die door de winning worden beïnvloed of juist zelf een invloed hebben, goed in beeld te hebben. Zowel de antropogene stromen als de ruimtelijke watervraag van landbouw en natuur

zullen moeten worden meegenomen in de visualisatie: hier liggen immers de effecten van een drinkwaterwinning. Het detailniveau hangt af van het type winning en de schaal. Voor grondwaterwinningen zal het nodig zijn om het grondwatersysteem in meer detail mee te nemen, bijvoorbeeld door meerdere dieptes te onderscheiden. Voor oppervlaktewaterwinningen zal dit juist het oppervlaktewatersysteem zijn.

### Scenario's

Voor het in beeld brengen van de drinkwaterbeschikbaarheid onder toekomstige externe veranderingen zijn klimaatscenario's bruikbaar, samen met verwachtingen van de toekomstige drinkwatervraag en watervraag vanuit landbouw en industrie. Hiervoor kunnen de Deltascenario's worden gebruikt, maar ook scenario's waarbij vanuit oplossingsrichtingen wordt gedacht, zoals een percentage aan waterbesparing. In de regio rond een winning of groep winningen kunnen ook specifieke ontwikkelingen spelen, zoals natuurontwikkeling, die belangrijk zijn om mee te nemen. Wat maatregelen betreft kan gericht worden op maatregelen die drinkwaterbedrijven zelf kunnen nemen, of op maatregelen die in het landschap worden genomen in samenwerking met bijvoorbeeld waterschappen. Binnen het project BTO-Waterbeschikbaarheid en droogte wordt gewerkt aan een overzicht van maatregelen voor vergroting van de (drink)waterbeschikbaarheid (Brakkee et al., 2022).

### Toevoegingen

Juist voor drinkwaterbedrijven zijn de waterkwaliteit en de duurzaam winbare watervoorraden zeer belangrijke aspecten van de waterbeschikbaarheid. Het is dan ook zinnig om de kwalitatieve toepasbaarheid van waterbronnen voor drinkwaterwinning mee te nemen in de visualisaties en analyse, bijvoorbeeld door classificering op basis van de belangrijkste probleemstoffen (par. 4.1). Voorraden en voorraadveranderingen zijn relevant voor grondwaterwinningen en oppervlaktewaterwinningen die van bekkens gebruik maken. Voor deze winningen kan het waardevol zijn om deze voorraden in beeld te brengen, eventueel op een indirecte manier (par. 4.2). Uitdaging daarbij is om de watervraag van natuur en omgeving goed in beeld te brengen. Juist voor drinkwatertoepassingen is het meenemen van waterkwaliteit en -voorraden in watersysteemvisualisaties dus een nuttig onderwerp om verder uit te bouwen.

## 5 Conclusies en toepassing

Dit rapport geeft een overzicht van beschikbare methodes voor het maken van kwantitatieve watersysteemvisualisaties als onderdeel van het werken aan waterbeschikbaarheid. Dit overzicht geeft een informatiebasis en een praktische richtlijn voor het maken van zulke visualisaties voor verschillende gebieden en vraagstukken. De brede verkenning van bestaande benaderingen voor watersysteemoverzichten uit de literatuur laat zien dat er vanuit verschillende onderzoeksgebieden relevante theoretische kaders en benaderingen zijn ontwikkeld, uiteenlopend van fysisch-hydrologische benaderingen, methodes uit waterbeheer- en beleid, en sociaaleconomische methodes. Onderdelen van deze al ontwikkelde onderzoekskaders kunnen inspiratie bieden voor toepassingen rond waterbeschikbaarheid.

Het generieke stappenplan biedt een algemene richtlijn voor het maken van kwantitatieve watersysteemvisualisaties. Dit stappenplan omvat het opzetten van het schematische overzicht, het verzamelen en verwerken van data, en het werken naar een nuttige visualisatie die bijdraagt aan het begrijpen van en communiceren over het waterbeschikbaarheidsvraagstuk. Daarbij geldt steeds dat de mogelijkheden breed zijn en dat ieder vraagstuk en gebied om zijn eigen, mogelijk creatieve aanpak vraagt, die bovendien vaak in de loop van het project aangepast zal moeten worden.

Het meenemen van waterkwaliteit, watervoorraden en onzekerheid zal in veel gevallen een waardevolle toevoeging zijn op de kwantitatieve waterstroomanalyses. Het zou zinvol zijn om deze toevoegingen in volgend onderzoek verder uit te testen. Ook in de methodes zelf zijn nog verdere verbeteringen mogelijk, met name waar het gaat om de beschikbaarheid van goed toegankelijke, betrouwbare data voor veel waterstromen; het standaardiseren van databronnen tussen verschillende waterbalansstudies; en het maken van visualisaties die bijdragen aan begrip in communicatie. De methodes zoals besproken in dit rapport staan dan ook open voor verdere aanvulling en verbetering.



## 6 Referenties

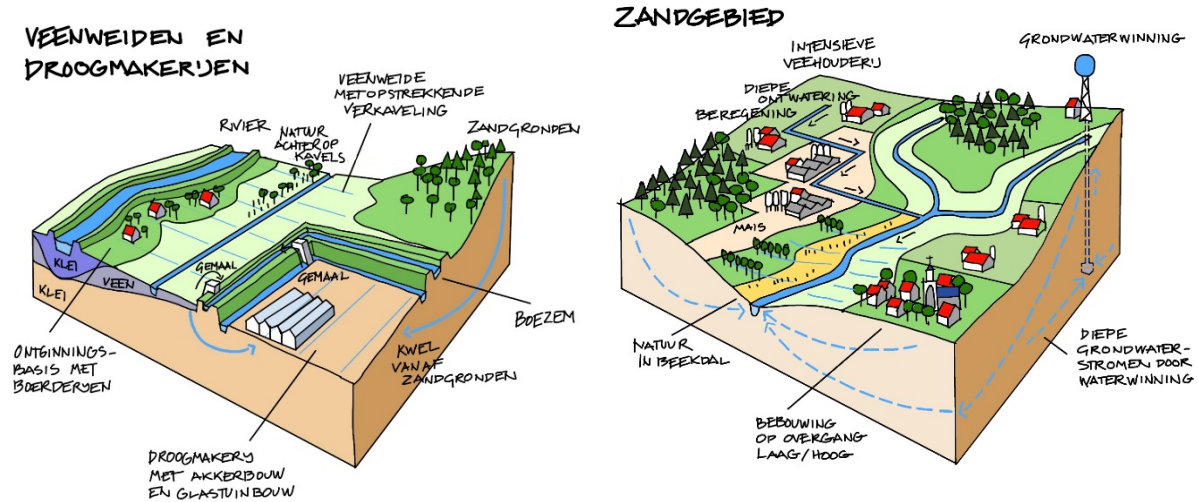
- Attema, J., Bakker, A., Beersma, J., Bessembinder, J., Boers, R., Brandsma, T., van den Brink, H., Drijfhout, S., Eskes, H., en Haarsma, R.: Knmi'14: Climate change scenarios for the 21st century—A Netherlands perspective, KNMI: De Bilt, The Netherlands, 2014.
- Bartholomeus, R. P., Witte, J. P. M., Van Bodegom, P. M., en Aerts, R.: The need of data harmonization to derive robust empirical relationships between soil conditions and vegetation, *Journal of Vegetation Science*, 19, 799-808, 2008.
- Batchelor, C., Hoogeveen, J., Faurès, J., en Peiser, L.: Water accounting and auditing - A sourcebook, FAO, Rome, FAO Water Reports 43, 2016.
- Beard, J. E., Bierkens, M. F. P., en Bartholomeus, R. P.: Following the water: Characterising de facto wastewater reuse in agriculture in the Netherlands, *Sustainability*, 11, 5936, 2019.
- Brakkee, E., van Rens, C., van Huijgevoort, R., en Bartholomeus, R. P.: Hergebruik industrieel restwater Bavaria: Inzicht in effecten van opschaling van subirrigatie voor de landbouwwatervoorziening, KWR, Nieuwegein, KWR 2021.022, 2021.
- Brauer, C. C., Teuling, A. J., Torfs, P. J. J. F., en Uijlenhoet, R.: The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): a lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater, *Geoscientific model development*, 7, 2313-2332, 2014.
- Buitelaar, R., Kollen, J., en Leerlooijer, C.: Operationeel waterbeheer IJsselmeergebied, Sweco, 2015.
- Cencic, O., en Rechberger, H.: Material flow analysis with software STAN, *EnvironInfo*, 2008, 440-447.
- Clevers, S., Dorland, E., van Vossen, J., Verschoor, A., en Emke, E.: Buffercapaciteit drinkwatervoorziening Nederland, KWR, Nieuwegein, BTO 2019.024 2019.
- Dauvellier, P., H., K., Koppenens, B., en Liefland, S.: Water als basis, <http://www.ruimtexmilieu.nl/wiki/oude-doos/water-als-basis>, access: 07-07, 2013.
- Delsman, J., Veraart, J., Snellen, B., en Oude Essink, G.: Deltafact Effectiviteit van waterinlaat, STOWA, 2018.
- Design-Council: What is the framework for innovation? Design Council's evolved Double Diamond, <https://www.designcouncil.org.uk/news-opinion/what-framework-innovation-design-councils-evolved-double-diamond>, 2021.
- FAO, en IHE-Delft: Water Accounting in the Nile River Basin, FAO & IHE Delft, Rome, <https://doi.org/10.4060/ca9895en>, 2020.
- Forni, L. G., Galaitsi, S. E., Mehta, V. K., Escobar, M. I., Purkey, D. R., Depsky, N. J., en Lima, N. A.: Exploring scientific information for policy making under deep uncertainty, *Environmental Modelling & Software*, 86, 232-247, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.021>, 2016.
- Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., en Perrone, D.: Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene, *Annual review of earth and planetary sciences*, 48, 431-463, 2020.
- Graedel, T. E.: Material Flow Analysis from Origin to Evolution, *Environmental Science & Technology*, 53, 12188-12196, [10.1021/acs.est.9b03413](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03413), 2019.
- Graveland, C., Baas, K., en Opperdoes, E.: Physical water flow accounts with Supply and Use and water asset / water balance assessment NL, CBS, Den Haag, 2017.
- Harbaugh, A.: MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—The Ground-Water Flow Process, US Geological Survey, Reston, Virginia, 2005.
- Huisman, J., Leroy, P., Tertre, F., Söderman, M. L., Chancerel, P., Cassard, D., Løvik, A. N., Wäger, P., Kushnir, D., en Rotter, S.: Prospecting secondary raw materials in the urban mine and mining wastes, PROSUM consortium, Brussel, 9789280890, 978-92-808-9061-7, 2017.
- Hydro-Logic: Water resources modelling with Aquator, <http://www.oxscisoft.com/aquator/water-resource-modelling.aspx>, access: 2021-09-27, 2021.

- Karimi, P.: Water Accounting Plus for Water Resources reporting and River Basin Planning, PhD, Technische Universiteit Delft, Delft, 2014.
- Klip, H.: Na drie zomers heeft flexibel peil in IJsselmeer waarde al bewezen, H2O-online, 2020.
- Knotters, M., en Jansen, P. C.: Honderd jaar verdroging in kaart, Stromingen, 11, 19-32, 2005.
- Krajenbrink, H. J., Stofberg, S. F., Bartholomeus, R. P., en Disselhoff, D.: RWZI als waterfabriek voor een robuuste watervoorziening, STOWA, Amersfoort, STOWA-2021-31, 2021.
- Krenn, C., Weichbold, T., Korp, G., Meixner, E., Stockner, H., Berger, D., Bernreiter, J., Bleicher, F., Geiger, G., en Fresner, J.: Qualitative and quantitative modelling to build a conceptual framework to identify energy saving options: case study of a wire producing company, Journal of Cleaner Production, 95, 212-222, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.052>, 2015.
- Lukács, S.: Protocol voor toestand- en trendbeoordeling van grondwaterlichamen KRW - Herzien 2019, Landelijke Werkgroep Grondwater, 2019.
- MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Dochartaigh, B. É. Ó., en Taylor, R. G.: Quantitative maps of groundwater resources in Africa, Environmental Research Letters, 7, 024009, 10.1088/1748-9326/7/2/024009, 2012.
- Mandemakers, J., Collombon, M., Ouboter, M., en Talsma, M.: Ecologische watersysteemanalyse: Waterbalans geeft inzicht, H2O-online, 2019, 7, 2019.
- McGuire, V., Johnson, M., Schieffer, R., Stanton, J., Sebree, S., en Verstraeten, I. M.: Water in storage and approaches to ground-water management, High Plains aquifer, 2000, US Geological Survey, Reston, Virginia, Circular 1243, 2003.
- Mens, M., Hunink, J., Delsman, J., Pouwels, J., en Schasfoort, F.: Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater, Fase II, Deltares, Delft, 2020.
- Meylan, G., Reck, B. K., Rechberger, H., Graedel, T. E., en Schwab, O.: Assessing the Reliability of Material Flow Analysis Results: The Cases of Rhenium, Gallium, and Germanium in the United States Economy, Environmental Science & Technology, 51, 11839-11847, 10.1021/acs.est.7b03086, 2017.
- Otinpong, B., Charters, S., McKinnon, A. E., en Gidlow, R. G.: Investigating the potential role of visualisation in natural resource decision-making, 2017.
- Philip, S. Y., Kew, S. F., van der Wiel, K., Wanders, N., en van Oldenborgh, G. J.: Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands., Environmental Research Letters, 15, 094081, 2020.
- Pronk, G. J., van Dooren, T. C. G. W., Stofberg, S. F., en Bartholomeus, R. P.: Waterhergebruik en de zoetwatervoorziening (Managementsamenvatting en dataoverzicht op dia's) KWR, Nieuwegein, BTO 2020.011, 2020.
- Pronk, G. J., Stofberg, S. F., Van Dooren, T. C. G. W., Dingemans, M. M. L., Frijns, J., Koeman-Stein, N. E., Smeets, P. W. M. H., en Bartholomeus, R. P.: Increasing Water System Robustness in the Netherlands: Potential of Cross-Sectoral Water Reuse, Water Resources Management, 35, 3721-3735, 2021.
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M.-H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., Swenson, S., en Rodell, M.: Quantifying renewable groundwater stress with GRACE, Water Resources Research, 51, 5217-5238, <https://doi.org/10.1002/2015WR017349>, 2015.
- RIVM: Emissieregistratie, <http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/misc/information.nl.aspx>.
- Roex, E., Stofberg, S. F., Cirkel, D. G., en Bartholomeus, R. P.: Deltafact Hergebruik van effluent, <https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/peilbeheer/hergebruik-van-effluent>, access: 07-07, 2017.
- Rozemeijer, J., van den Eertwegh, G., Roelofsen, F., van der Toorn, L., van der Scheer, J., Klein, J., Hooijboer, A., de Louw, P., van der Grift, B., en Worm, B.: Lumbricus stofstromenanalyse: routes van nutriënten uit metingen, Deltares, [Delft], 2018.
- Rozos, E., en Makropoulos, C.: Source to tap urban water cycle modelling, Environmental modelling & software, 41, 139-150, 2013.

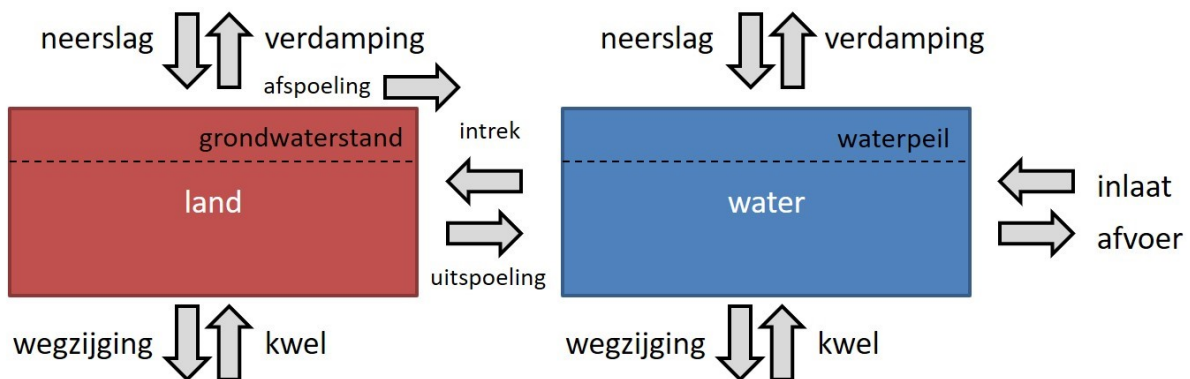
- Schütze, M., Seidel, J., Chamorro, A., en León, C.: Integrated modelling of a megacity water system – The application of a transdisciplinary approach to the Lima metropolitan area, *Journal of Hydrology*, 573, 983-993, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.045>, 2019.
- Schütze, M.: LiWa - Results - Macromodelling, <http://lima-water.de/en/pp3.html>, access: 07-07, n.d.
- SEI: WEAP features, <https://www.weap21.org/>, access: 07-07, 2021.
- Seibert, J.: HBV light version 2, User's manual, Stockholm University, Dept. of Physical Geography and Quaternary Geology, 2005.
- Spijker, J., Lieste, R., Zijp, M. C., en Nijs, A. C. M. d.: Conceptuele modellen voor de Kaderrichtlijn Water en de Grondwaterrichtlijn, RIVM, Bilthoven, RIVM-rapport 607300010/2009, 2009.
- Stuurman, R., Verhagen, F., van Wachtendonk, A., en Runhaar, H.: Een verkenning naar de Watervraag van de Noord-Brabantse Natuur, Deltares / Royal HaskoningDHV / Ecogroen, 11203929-002-BGS-0002, 2020.
- Tanis, H., Schep, S., en van Dijk, A.: Waterstromen in beeld: Handleiding bij de Excelrekening Waterbalans, STOWA, Amersfoort, 2019.
- UN: SEEA-Water, <https://seea.un.org/content/seea-water>, access: 2021-11-29, n.d.
- Van der Wal, M. M., de Kraker, J., Kroeze, C., Kirschner, P. A., en Valkering, P.: Can computer models be used for social learning? A serious game in water management, *Environmental Modelling & Software*, 75, 119-132, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.008>, 2016.
- Verhagen, F., van Steijn, T., Hunink, J., en Stuurman, R.: Draagkracht grondwater Noord-Brabant, RoyalHaskoningDHV / Deltares, Amersfoort, BF3125, 2017.
- Vermeulen, P. T. M., Roelofsen, F. J., Hunink, J., Janssen, G. M. C. M., Romero Verastegui, B., van Engelen, J., en Russcher, M.: iMod 5.2 user manual Deltares, Delft, 2020.
- Wolters, H. A., van den Born, G. J., Dammers, E., en Reinhard, S.: Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017, Deltares, Utrecht, 2018.

# I Bijlage: voorbeelden van visualisaties

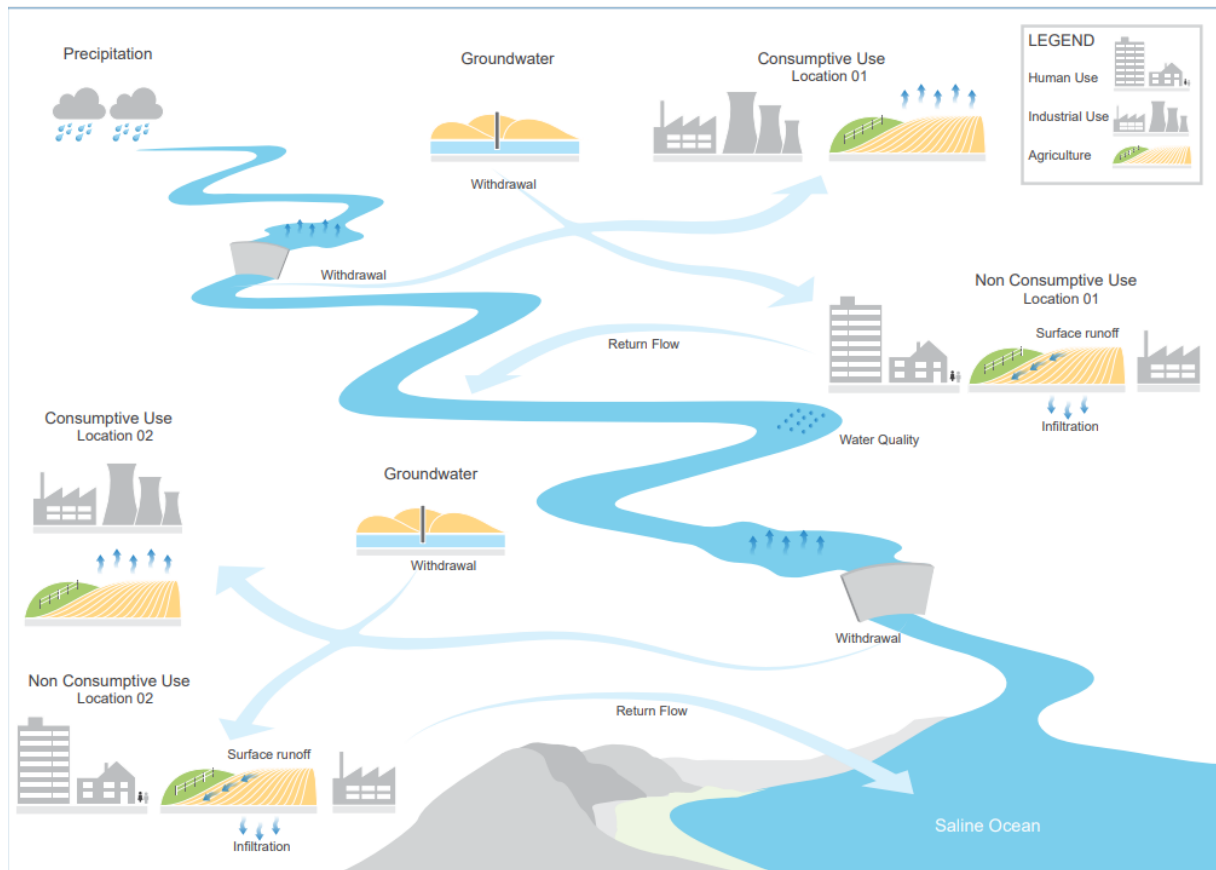
## I.1 Kwalitatieve visualisaties



Figuur I- 1: Kwalitatieve systeemoverzichten voor twee Nederlandse landschapstypen. Uit Dauvellier et al. (2013).

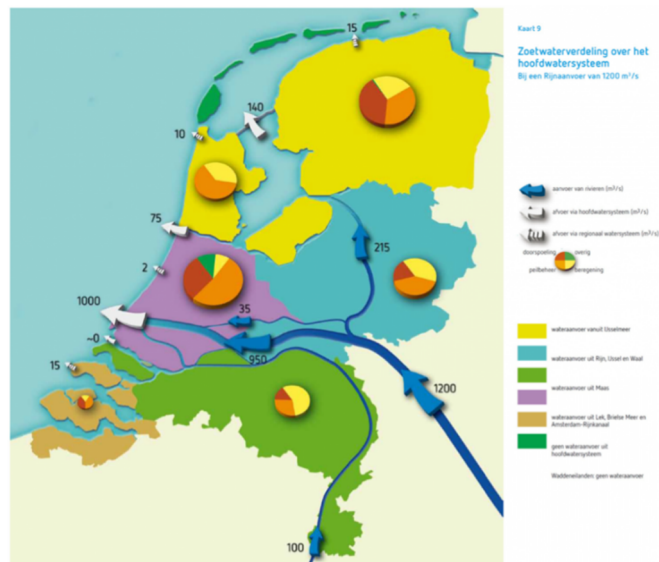


Figuur I- 2: Versimpeld watersysteem als basis van de Waterbalanstool (Mandemakers et al., 2019).

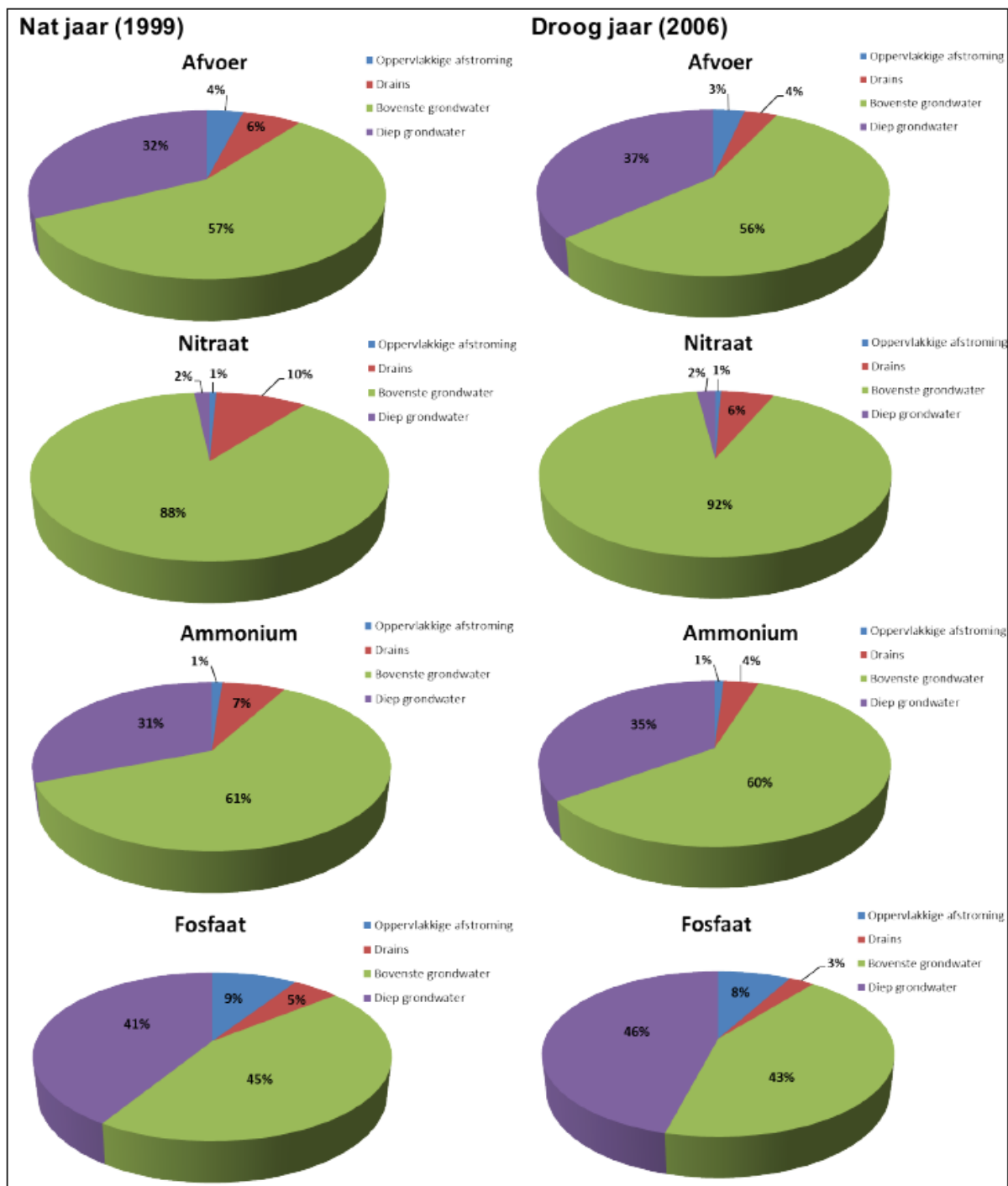


Figuur I- 3; Visualisatie van waterstromen en -gebruik in een typisch stroomgebied (Tindale and Sagris, 2013).

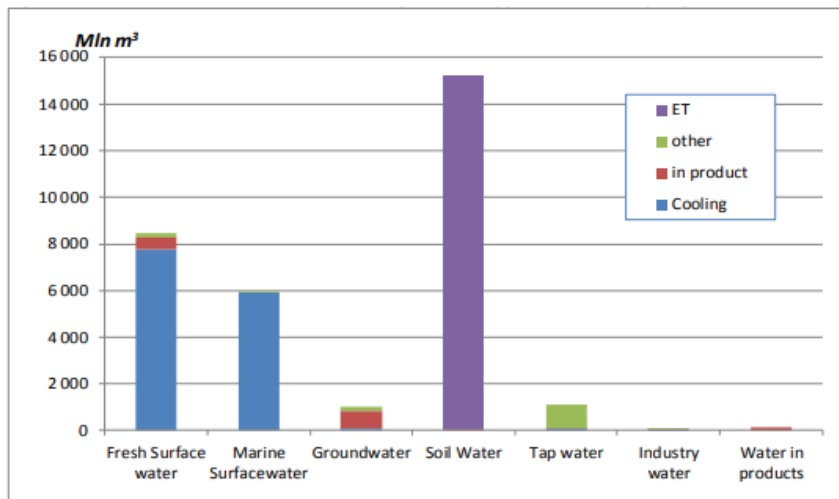
## I.II Cirkel- en staafdiagrammen



Figuur I- 4: Stroomdiagram van de hoofd-zoetwaterverdeling (Delsman et al., 2018).

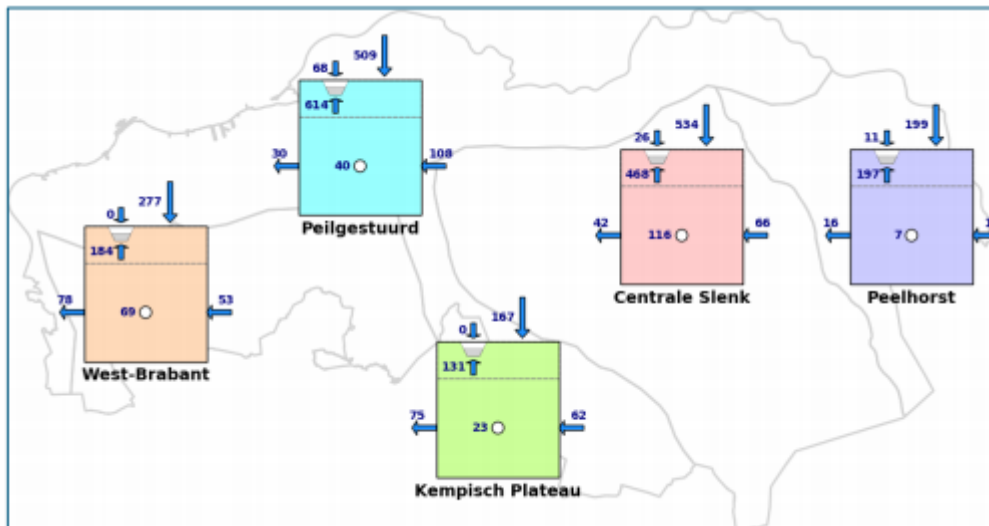


Figuur I- 5: Herkomst van water en nutriënten in het Vechtstroomgebied op basis van een stofstromenanalyse (Rozemeijer et al., 2018).



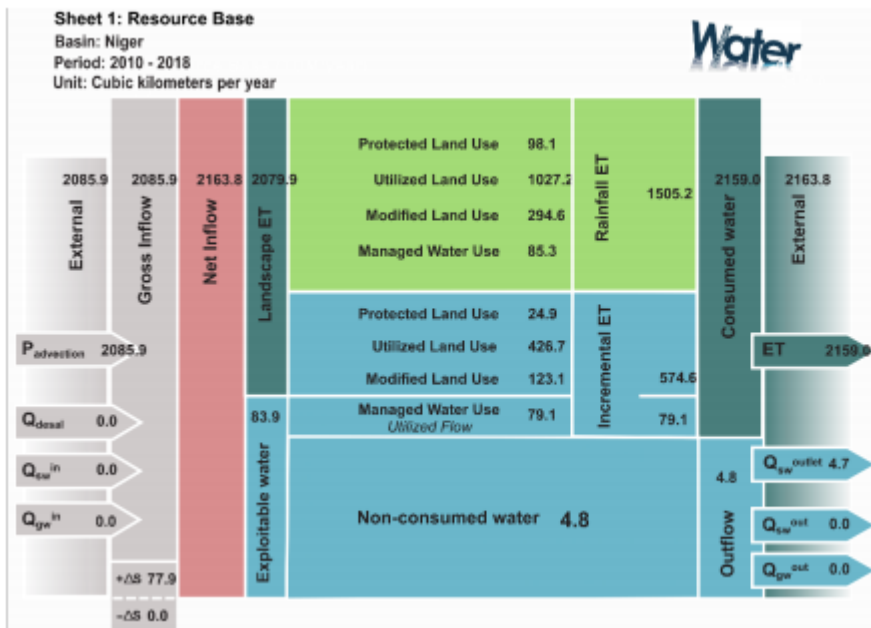
Figuur I- 6: Watergebruik per watertype in 2014 voor heel Nederland (Graveland et al., 2017).

### I.III Waterbalans- en stroomdiagrammen

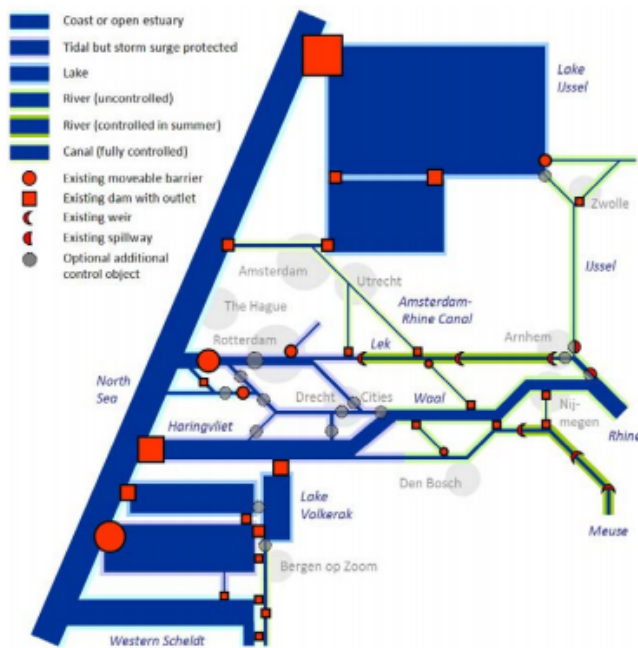


Figuur I- 7: Versimpelde waterbalansen (m³/jaar) voor vijf deelgebieden van Noord-Brabant (Verhagen et al., 2017).

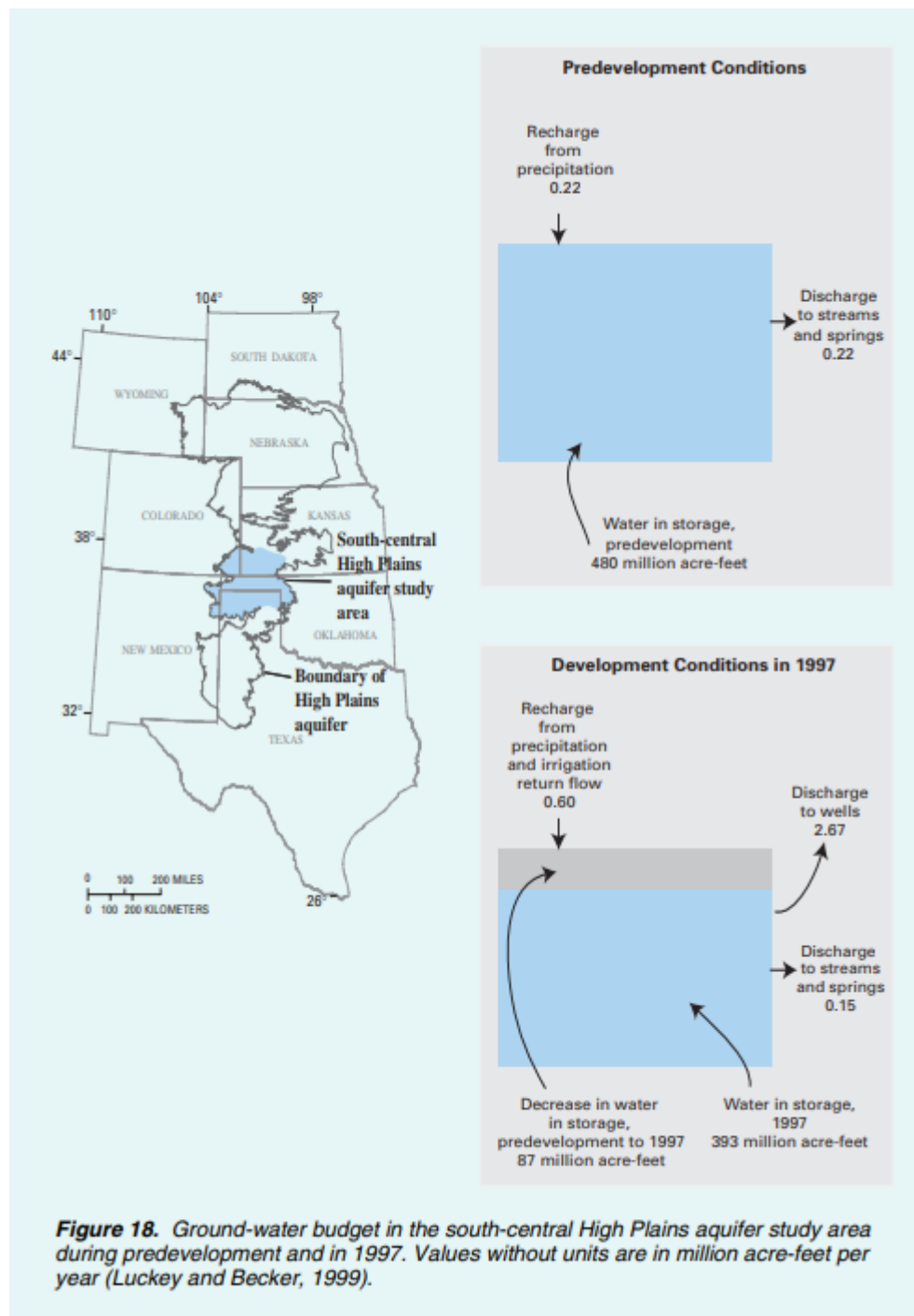




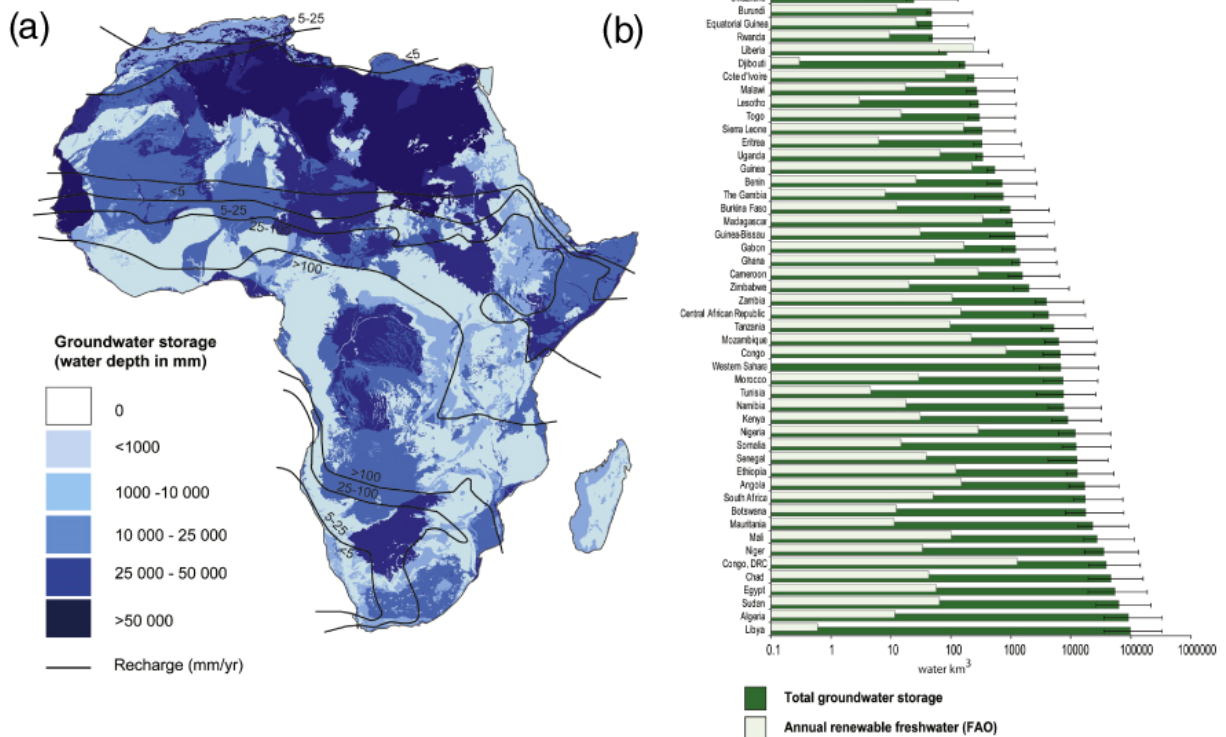
Figuur I- 8; 'Resource Base' Accounting sheet (in km<sup>3</sup>) voor het Niger-stroomgebied volgens de WA+-methode (Delft, 2020).



Figuur I- 9: Stromen en voorraden in het Rijn-Maas-oppevlaktewatersysteem in het SimDelta-model (Rijcken and Christopher, 2013). Reservoirs zijn ongeveer geschaald naar hun opslagcapaciteit.

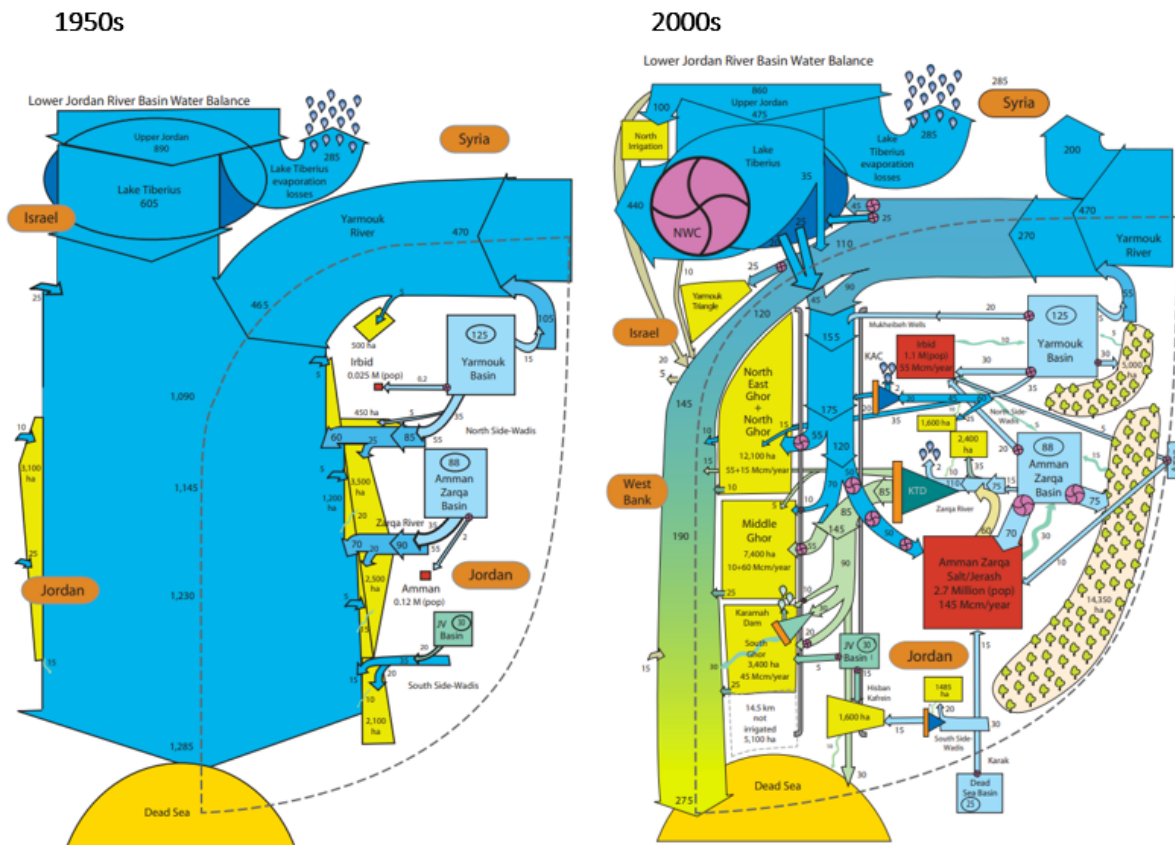


Figuur I- 10: Visualisatie van absolute grondwatervoorraden in de High Plains aquifer (McGuire et al., 2003).

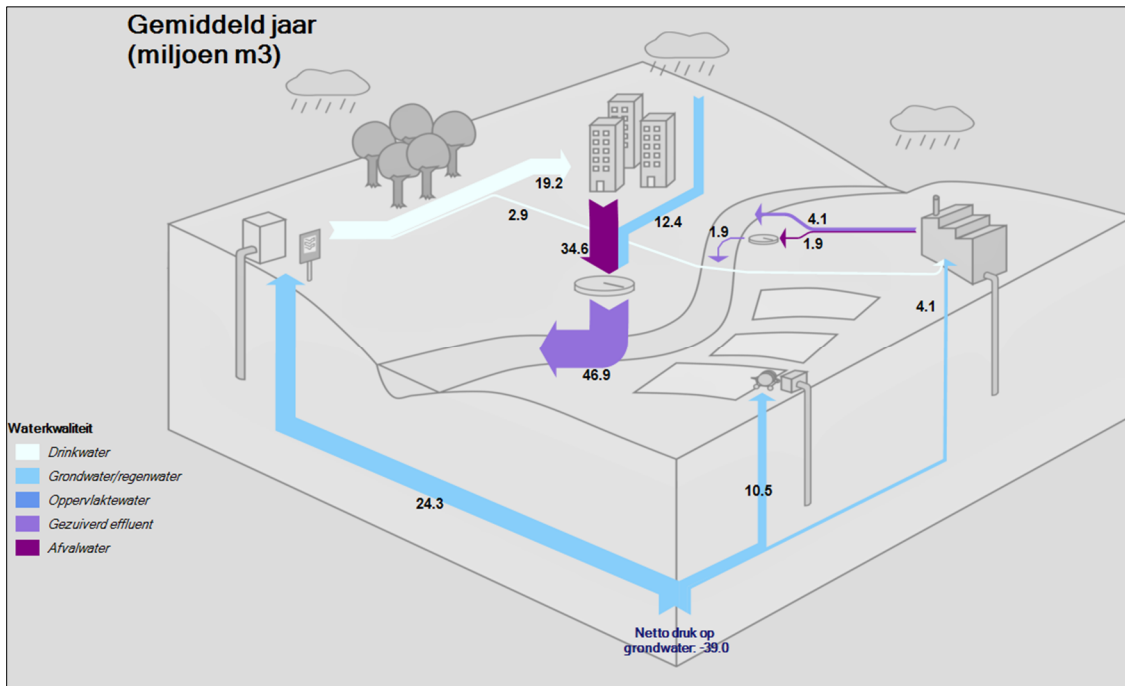


Figuur I- 11: Grondwatervoorraden in Afrika, geschat uit waterstanden en geologische informatie (MacDonald et al., 2012).

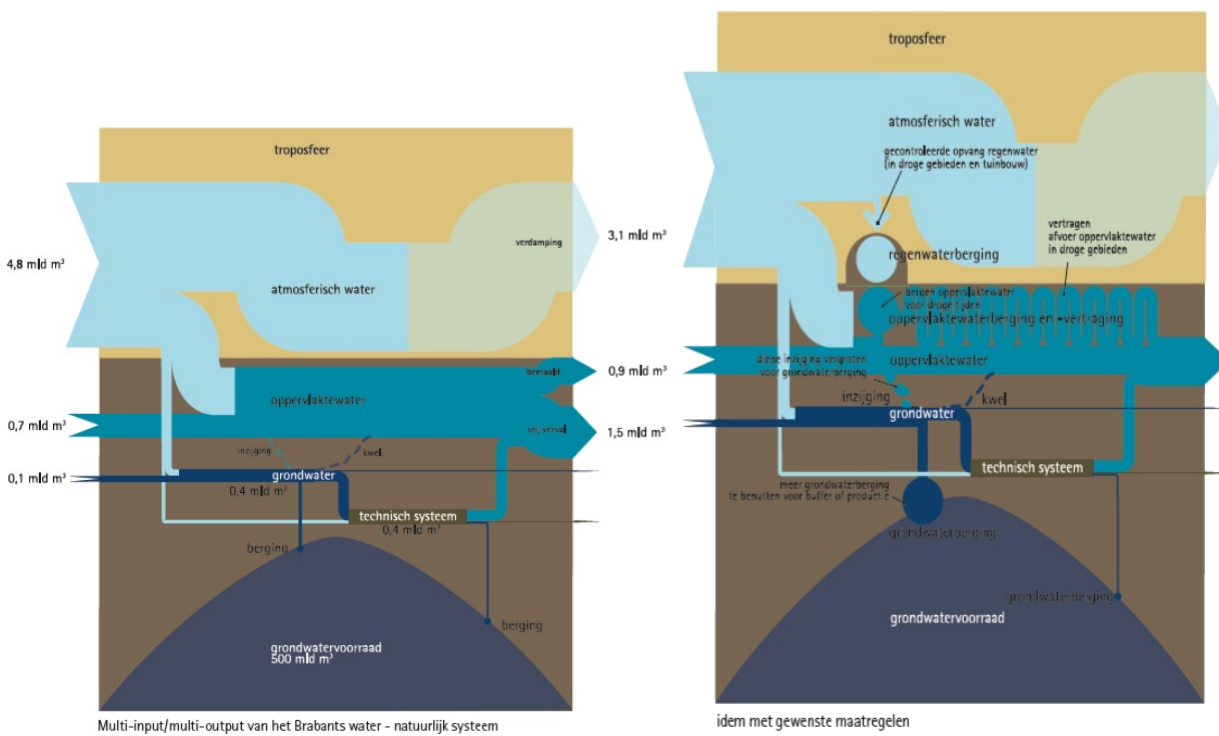
### I.IV Sankey-diagrammen en variaties



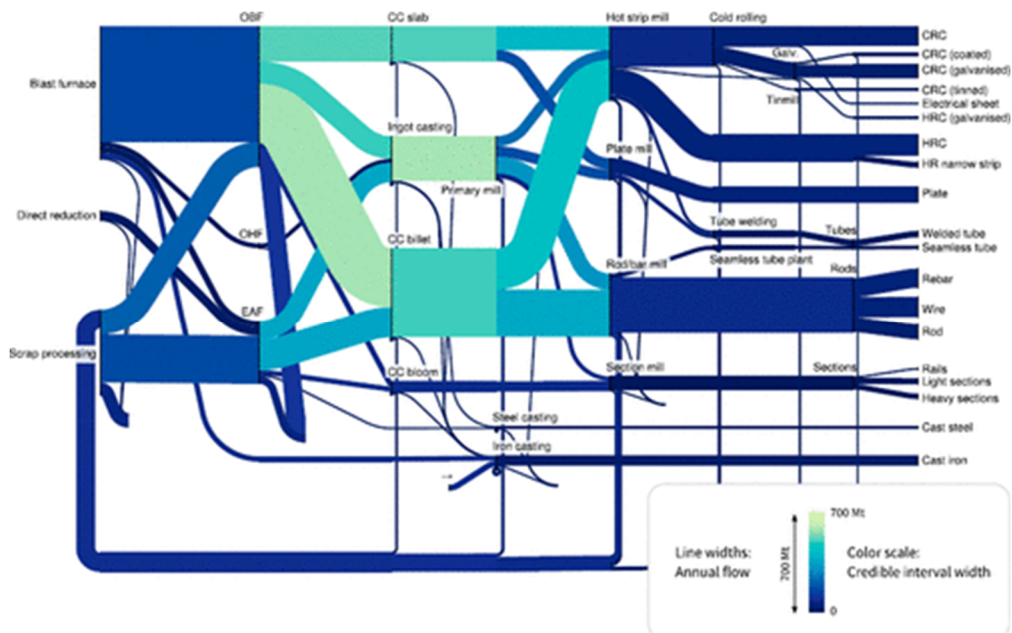
Figuur I- 12: Visualisatie van waterstromen in het stroomgebied van de Jordaan in de jaren 1950 (links) en na 2000 (rechts) (Courcier et al., 2005).



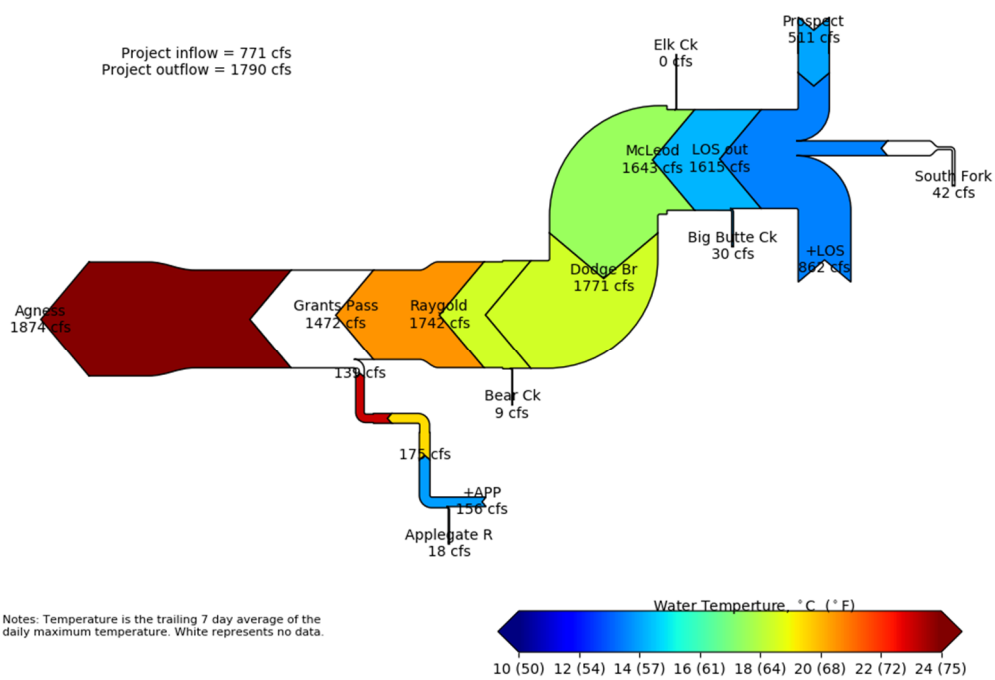
Figuur I- 13: Sankey-diagram van het watersysteem van een case study-gebied bij Aarle-Rixtel, Noord-Brabant (Krajenbrink et al., 2021).



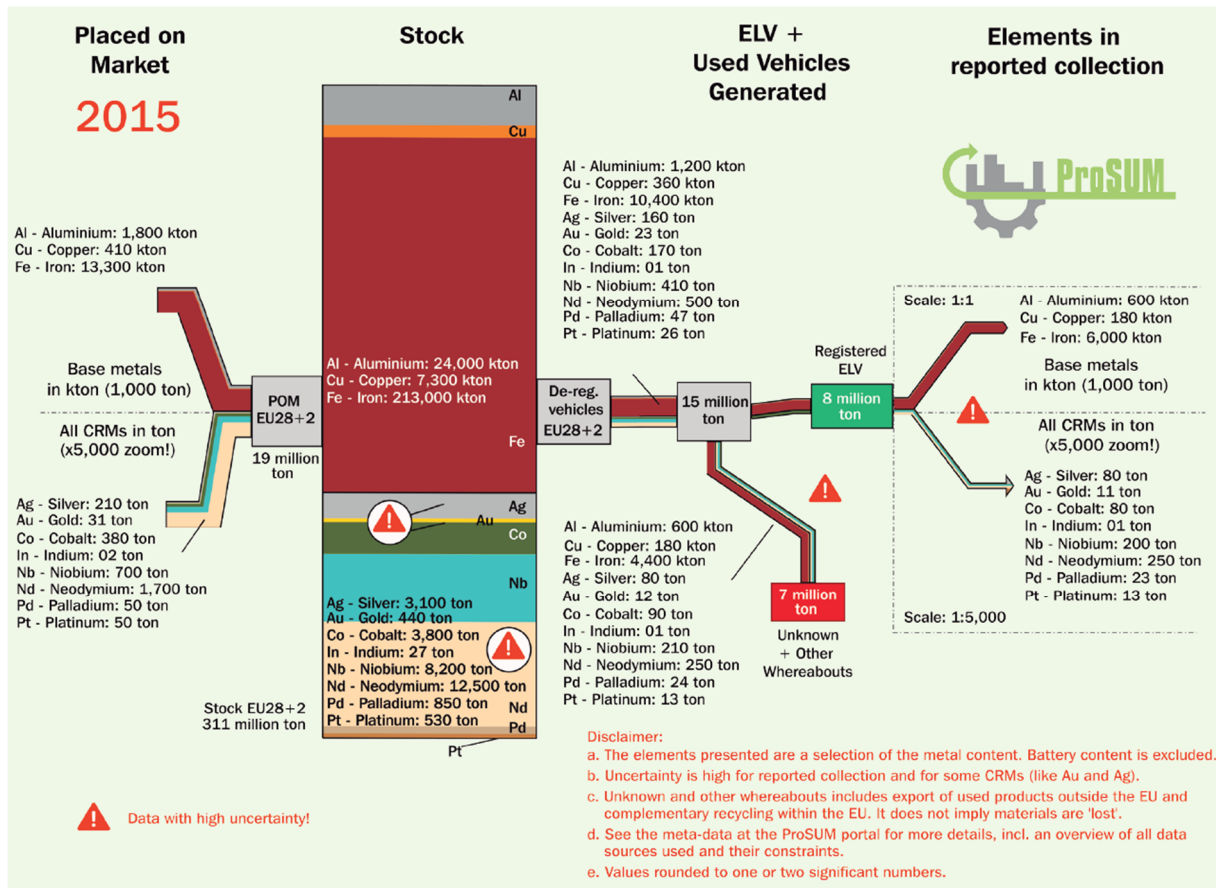
Figuur I- 14: Sankey-diagram van waterstromen in Noord-Brabant in een natuurlijke en toekomstige gewenste situatie. Van Sankey-Diagram (2011).



Figuur I- 15; Stroomdiagram met onzekerheid van data als variabele in de kleuren (Graedel, 2019).

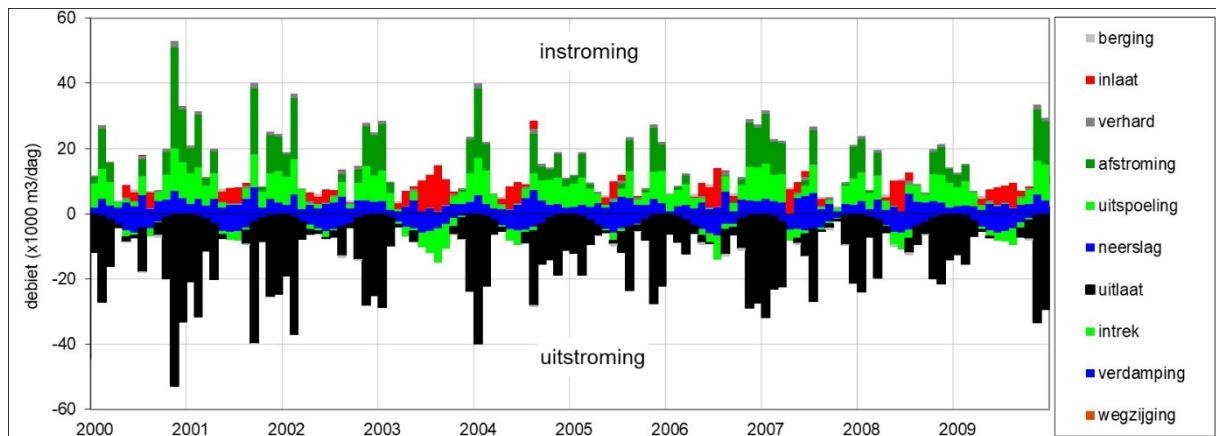


Figuur I- 16: Sankey-diagram van een riviersysteem met temperatuur als kleurschaal (USACE, 2021).



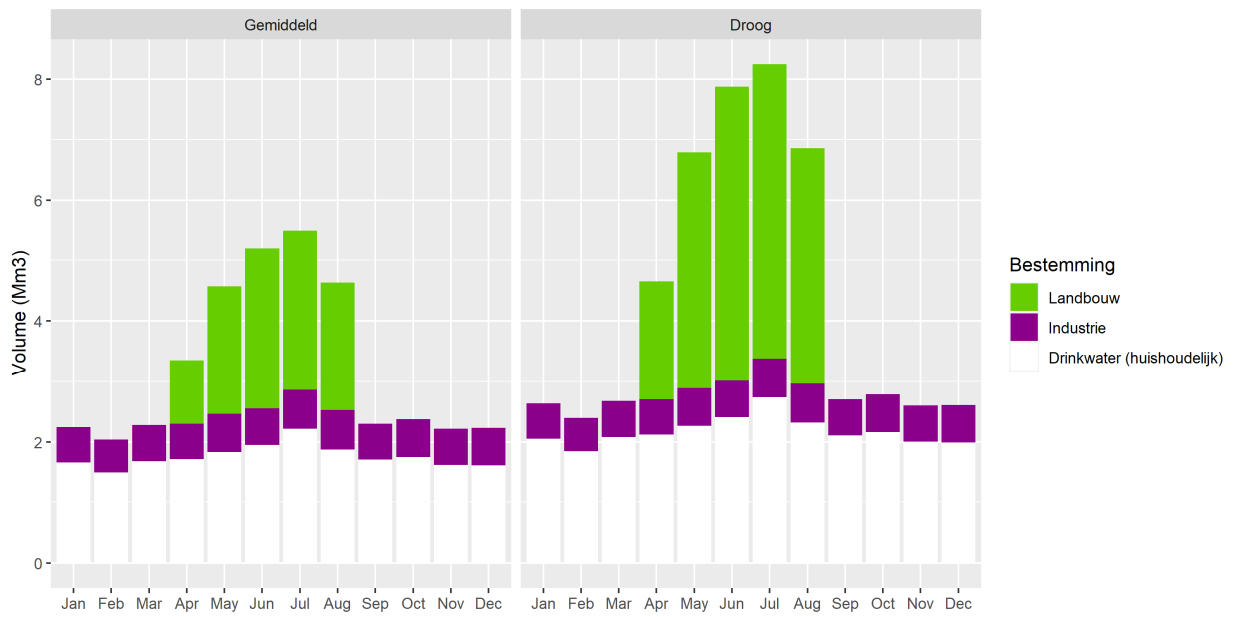
Figuur I- 17: Sankey-diagram van de Europese metalenmarkt, met ook voorraden gevisualiseerd (Huisman et al., 2017).

### I.V Tijdreeksen

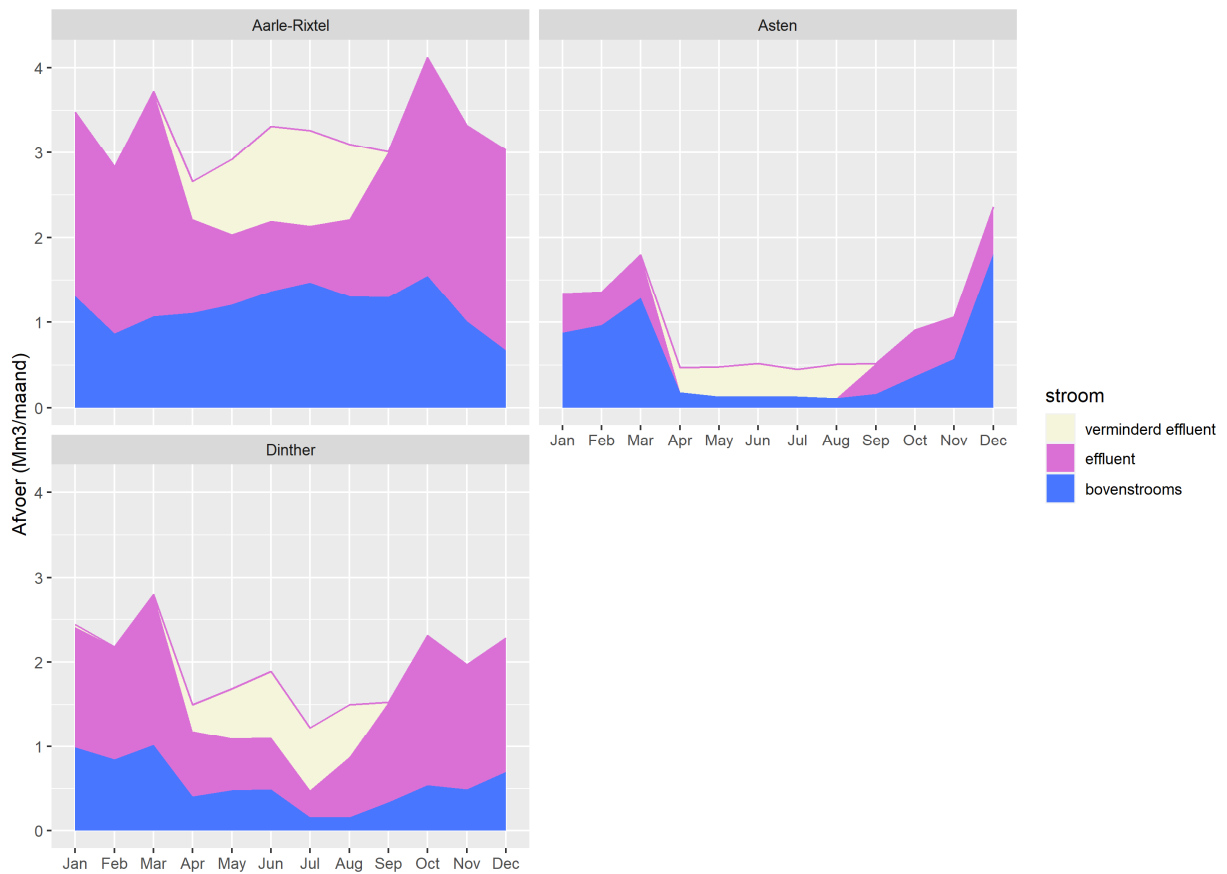


Figuur I- 18: In- en uitgaande stromen in een polder-stroomgebied (Mandemakers et al., 2019).



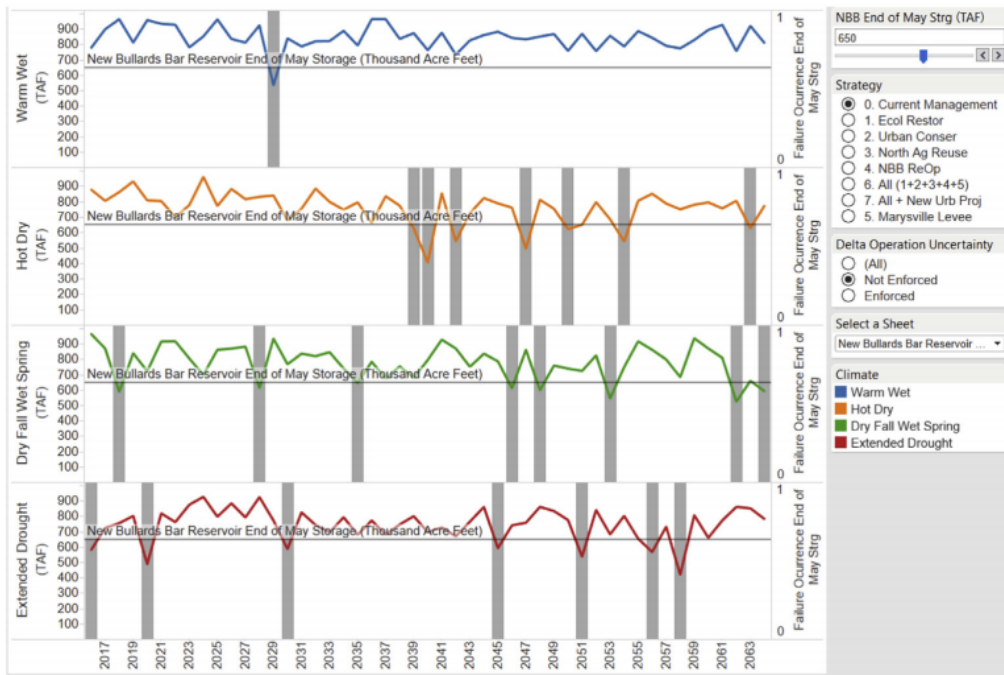


Figuur I- 19: Tijdsreeksfiguren van watervraag van verschillende sectoren in een normale (links) en droge situatie (rechts) voor een Brabants studiegebied, afkomstig uit een waterbalansstudie (Krajenbrink et al., 2021b).

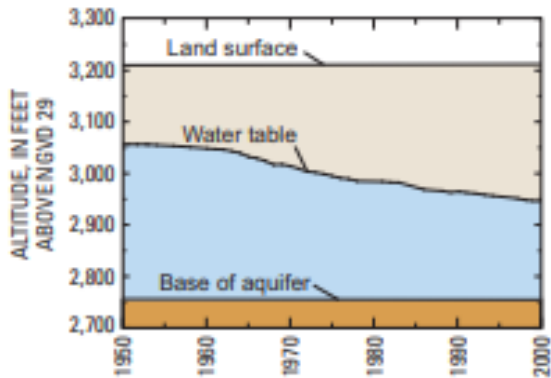


Figuur I- 20: Effect van het hergebruik van RWZI-effluent op beekafvoeren in een Brabantse situatie (Krajenbrink et al., 2021b).



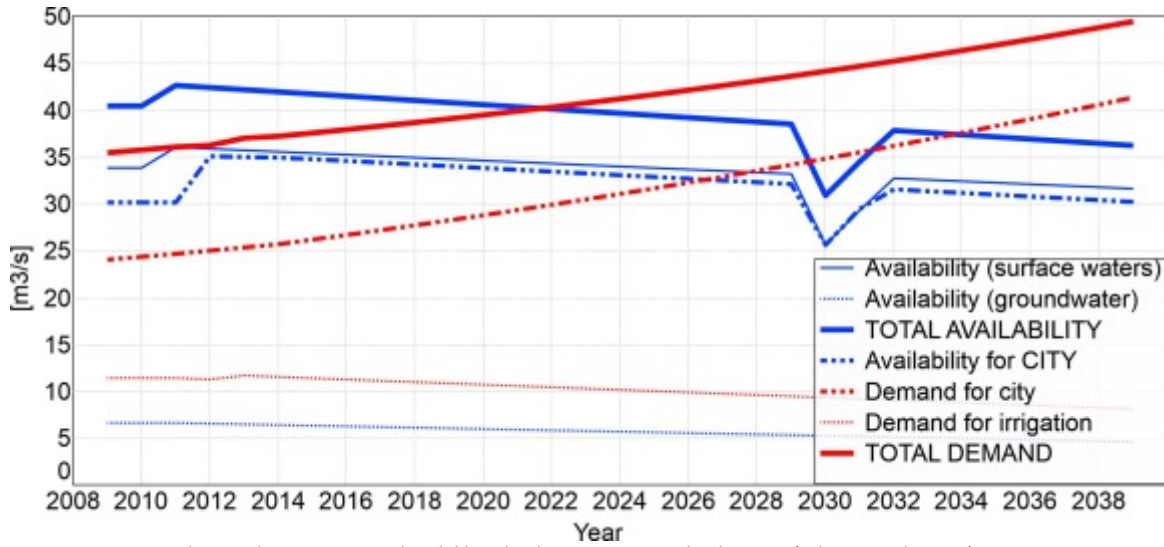


Figuur I- 21: Visualisatie van de voorraad in een reservoir in de lente als waterbeschikbaarheidsindicator onder verschillende scenario's; watertekorten als grijze balken (Forni et al., 2016).

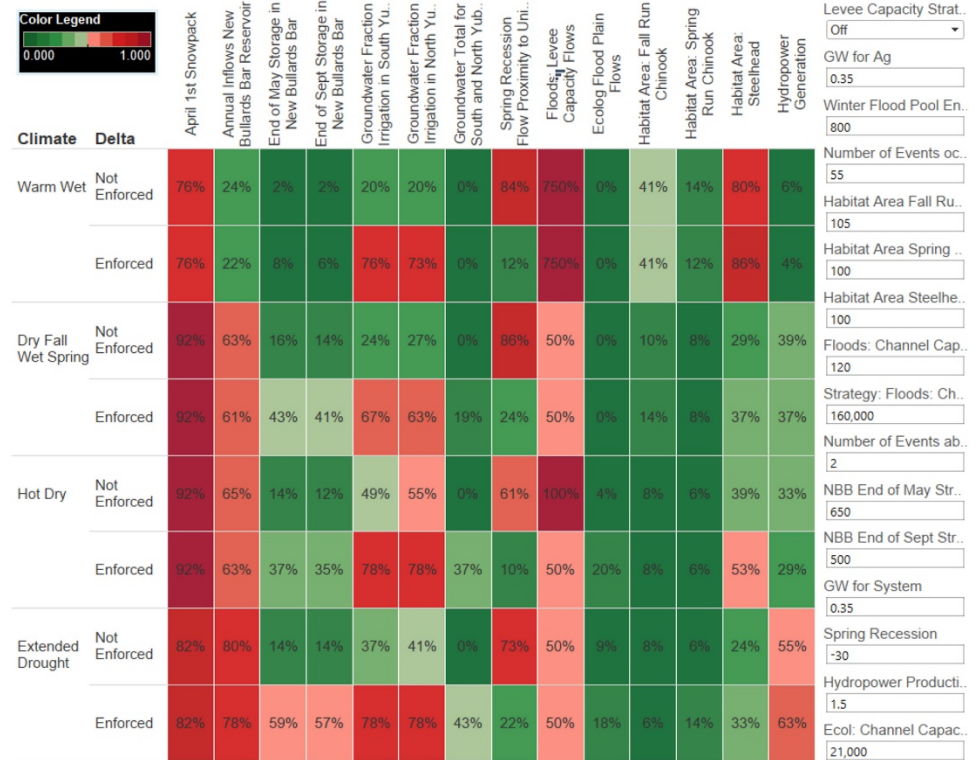


Figuur I- 22: Visualisatie van de grondwater voorraad en de uitputting hiervan in een aquifer in Texas (McGuire et al., 2003).

### I.VI Systemindicatoren



Figuur I- 23: Generieke visualisatie van waterbeschikbaarheid in een stroomgebied in Peru (Schütze et al., 2019).



Figuur I- 24: Visualisatie van verschillende systeemindicatoren voor verschillende scenario's (Forni et al., 2016).oncept