



KWR Waterwijs
KWRW 2026.032 | Juni 2026

**Water Matchmaker:
Ontwerpmethodiek voor
grensoverstijgende
waterverdeling**

Colofon

Water Matchmaker: Ontwerpmethodiek voor grensoverstijgende waterverdeling

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van KWR Waterwijs, het collectieve drinkwateronderzoeksprogramma van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

KWRW 2026.032 | Juni 2026

Projectnummer

404300-018

Projectmanager

Raül Glotzbach MSc.

Opdrachtgever

KWR Waterwijs – Verkennend Onderzoek

Auteurs

dr.ir. J. (Joeri) Willet, dr. M. (Maria) Lousada-Ferreira, dr.ir. H.J. (Henk) Krajenbrink, dr.ir. K.A. (Karel) van Laarhoven, I. (Ina) Vertommen MSc.

Kwaliteitsborgers

dr. P. (Peter) van Thienen, prof. dr. ir. R.P. (Ruud) Bartholomeus

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder deelnemers aan het KWR Waterwijs-programma.

Openbaarheid

Dit rapport is niet openbaar en mag alleen verspreid worden onder deelnemers aan het KWR Waterwijs-programma.

Keywords

waterverdeling, watervoorziening, watersysteem, transportnet, optimalisatie, streefstructuur

Jaar van publicatie
2026

Meer informatie
dr.ir. J. (Joeri) Willet
T 030 60 69 752
E Joeri.Willet@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR

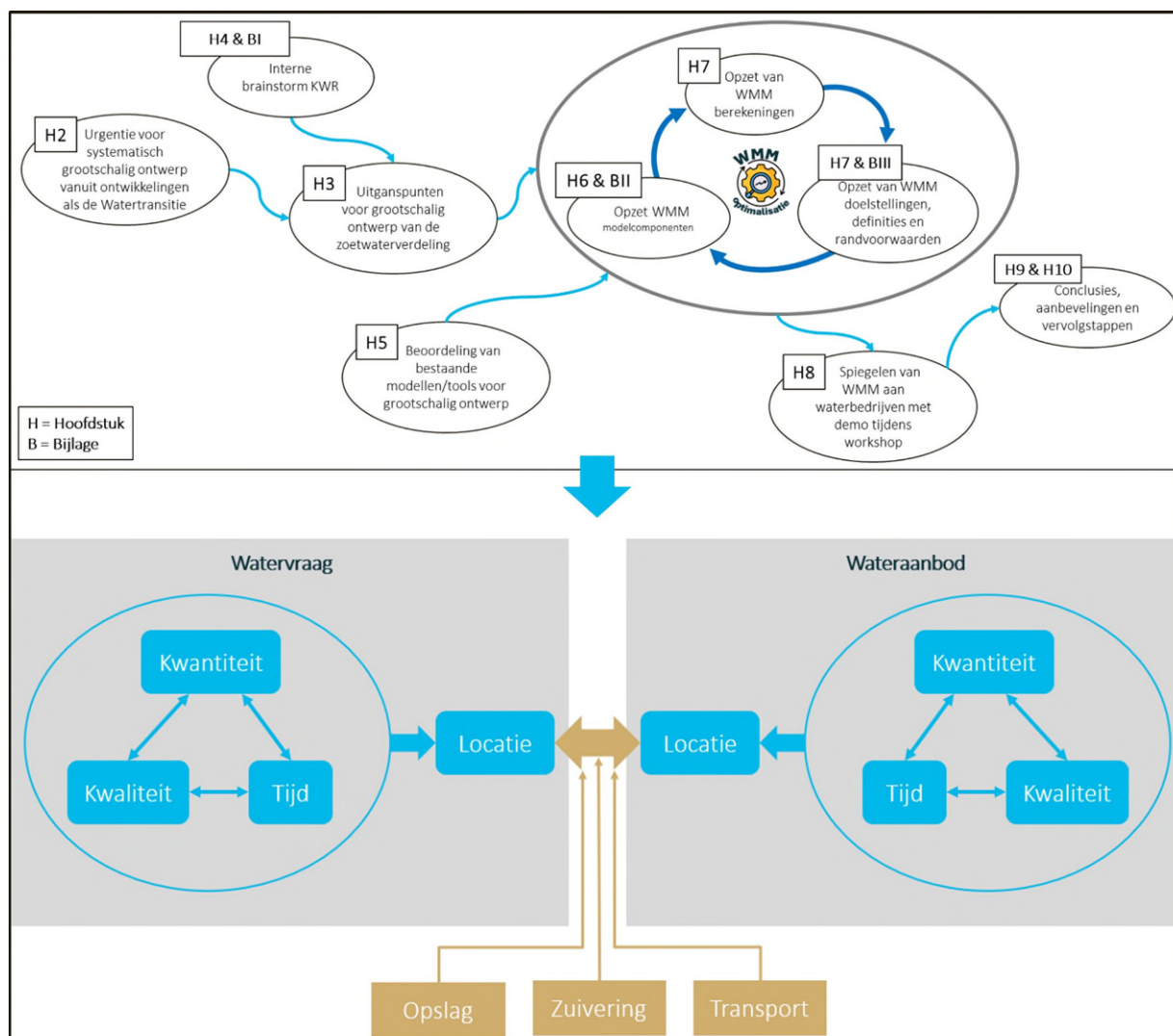
Juni 2026 ©

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

Samenvatting

Water Matchmaker: Ontwerpmethodiek voor grensoverstijgende waterverdeling

Auteurs dr.ir. Joeri Willet, dr. Maria Lousada-Ferreira, dr.ir. Henk Krajenbrink, dr.ir. Karel van Laarhoven, Ina Vertommen MSc.



Figuur 1. Opzet van de rapportage (boven) en conceptueel overzicht (onder) van WMM waarbij de onderdelen in bruin de infrastructurele ingrepen in het systeem zijn welke met WMM beschouwd worden.

Aanleiding: Het juiste water op het juiste moment op de juiste plek

Ons watersysteem staat onder druk. Oorzaken hiervan zijn onder meer klimaatverandering, bevolkingsgroei en concurrentie om zoetwaterbronnen door verschillende gebruikers. Het centrale probleem in de watertransitie is een mismatch tussen behoefte en beschikbaarheid, zowel in ruimte, tijd als kwaliteit. Terwijl sommige regio's in ons land voldoende water hebben, ervaren andere in periodes juist tekorten. Ook komt de beschikbaarheid van water

niet altijd overeen met de behoefte op dat moment. En de gevraagde waterkwaliteit is niet hetzelfde voor elke toepassing, net zomin als de kwaliteit van het water dat beschikbaar is. Om het watersysteem beter bestand te maken tegen deze veelomvattende vraagstukken, moeten we er anders mee omgaan. Dit vraagt om een watertransitie met slimme keuzes voor de (drink)waterinfrastructuur van ons land, zodat voldoende en schoon water beschikbaar blijft. Een flinke uitdaging, zo blijkt in de praktijk.

Aanpak: De waarde van grensoverstijgende samenwerking modelleren

De watersector zal de onbalans in zoetwaterverdeling op regionale of zelfs nationale schaal moeten aanvliegen, niet lokaal. Maar water verdelen over de institutionele grenzen heen is niet zomaar iets. Plotseling zijn er veel meer verschillende combinaties mogelijk, en elke combinatie kan grote gevolgen hebben. In dit onderzoek verkennen we een aanpak (Water Matchmaker) waarmee het mogelijk wordt om in samenhang tussen verschillende beschikbare waterbronnen en gebruiksbehoeften naar de toekomst te kijken, gericht op de benodigde infrastructuur. Daarnaast is Water Matchmaker ook bedoeld om inzichtelijk te maken wat er gebeurt wanneer er bij tegengestelde doelstellingen voor één ervan wordt gekozen. Kortom: wat zijn de consequenties van bepaalde keuzes voor het grote geheel? Dit betekent dat impliciete aannames voor oplossingsrichtingen expliciet moeten worden gemaakt, en daarmee concreet. Een objectieve, kwantitatieve aanpak zoals die van Water Matchmaker is hiervoor een krachtig hulpmiddel.

Resultaten: Water Matchmaker als raamwerk voor systeemoptimalisatie

De realisatie van een grensoverstijgende waterverdeling is gebaat bij rekenmodellen/tools ter ondersteuning van het beslisproces, en is waar dit onderzoek aan bijdraagt. Er is gekozen om een optimalisatieraamwerk, de Water Matchmaker (WMM), te ontwikkelen om de volgende vraag te kunnen beantwoorden: welke combinatie van beschikbare bronnen, zuivering, opslag en transport resulteert in de geoptimaliseerde (drink)waterverdeling. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat keuzes rondom deze infrastructuur noodzakelijk zijn voor een grensoverstijgende waterverdeling. Het ontwikkelde concept functioneert op basis van een grafenstructuur om de waterinfrastructuur tussen de bron en de gebruiker te representeren, gebruikt waterkwaliteitsklassen voor de zuiveringsconcepten, en wordt doorgerekend met een exacte combinatorische optimalisatie. Als invoer gebruikt WMM een inschatting van de watervraag en de waterbeschikbaarheid. De consequenties van watergebruik voor het natuurlijke watersysteem kunnen deel zijn van de invoer en worden bepaald op basis van de lokale hydrologie. Afhankelijk van de situatie kan WMM deze consequenties vervolgens gebruiken als harde randvoorwaarden of als variabele binnen de optimalisatie. Er is een synthetische democasus opgezet waarmee we aantonen dat het ontwikkelde model flexibel kan omgaan met de doelen en randvoorwaarden, en dat deze een duidelijke invloed hebben op de optimale systeemconfiguratie..

Vervolg: een stap richting de praktijk

Binnen dit onderzoek zijn de bouwstenen van WMM uitgewerkt en is de eerste stap gezet om hier een rekenmodel mee te ontwikkelen. Op technisch vlak moeten er nog een aantal aspecten worden uitgewerkt, zoals de mogelijke consequenties van opslag op waterkwaliteit. Dit wordt geïmplementeerd in het vervolgonderzoek. De uitgevoerde interviews en bijdragen tijdens de demo hebben aangetoond dat de noodzaak en urgentie voor een dergelijk rekenmodel leeft bij de drinkwaterbedrijven. De manier waarop eindgebruikers betrokken dienen te worden in het ontwerpproces, van het vergaren van de invoerdata tot de randvoorwaarden en de doelfuncties, is echter nog een blinde vlek. Voornamelijk de manier waarop de lokale hydrologische condities omgezet kunnen worden naar invoer voor WMM vergt verdere kennisontwikkeling. Op basis van een reële casus, waarbij alle belanghebbenden worden betrokken, zou ervaring opgedaan kunnen worden over de toepassing van WMM binnen een ontwerpproces.

Implementatie: strategische besluitvorming voor de Nederlands waterverdeling

Voor uiteindelijk implementatie van WMM zijn de volgende stappen noodzakelijk:

- doorontwikkeling van de rekenkern van WMM;

- het definiëren van de rol van WMM binnen een ontwerpproces door een kleinschalige reële casus te doorlopen;
- het opbouwen van de methodiek om effectief om te gaan met verschillende belangen en doelen binnen een tool als WMM;
- ervaring opdoen met de toepassing van WMM.

De eindgebruikers zijn de strategen, assetmanagers, en omgevingsmanagers van de drinkwaterbedrijven die een tool als WMM kunnen gebruiken om het gesprek aan te gaan met partijen als provincie, Rijkswaterstaat, en de waterschappen over de infrastructuur welke nodig is om watervraag en wateraanbod aan elkaar te kunnen blijven koppelen.

Maatschappelijke impact: voorbereiding op een onzekere toekomst

Het functioneren van het Nederlandse drinkwatersysteem kan niet los gezien worden van ontwikkelingen in andere sectoren. WMM biedt een gedeeld platform om de belangen van partijen systematisch in kaart te brengen en tegen elkaar af te wegen en te vertalen naar een passende inrichting van de waterverdeling. WMM werkt toe naar een gedeelde onderliggende rekenmethode, zodat het gesprek tussen eindgebruikers kan focussen op de doelen en benodigde invoergegevens.

Inhoud

Samenvatting	3
1 Inleiding	8
1.1 Aanleiding en doel	8
1.2 Aanpak en leeswijzer	9
2 Waarom een Water Matchmaker?	10
2.1 Grensoverstijgende aanpak nodig	10
2.2 Consequenties van keuzes concreet maken	10
2.3 Modelmatige en kwantitatieve aanpak	11
2.4 Tool voor ontwerpmogelijkheden	12
2.5 Uitdagingen	12
3 Vertrekpunten	14
3.1 ‘Aanbod’: de beschikbaarheid van water	14
3.2 Mismatch in ruimte: transport	15
3.3 Mismatch in tijd: opslag en buffering	16
3.4 Mismatch in kwaliteit: zuivering	17
4 Verkennende workshop	18
4.1 Bronnen	18
4.2 Gebruikers	18
4.3 Matches tussen bronnen en gebruikers	19
5 Concepten en modellen	21
5.1 Simulatiepakketten met beperkte optimalisatiecomponenten	22
5.1.1 RIBASIM	23
5.1.2 WEAP	23
5.1.3 UWOT	24
5.2 Systeemdynamische pakketten	24
5.2.1 Vensim	25
5.2.2 Watersysteemverkenner	25
5.3 Optimalisatiepakketten	25
5.3.1 Hydro-economische modellen	26
5.3.2 GONDWANA	26
5.3.3 Pywr	26
5.4 Synthese	27
6 Opzet van het WMM-raamwerk	28
6.1 Basiselementen en overkoepelende modelstructuur	28
6.1.1 Knopen	30
6.1.2 Takken	32
6.1.3 Waterbalans	32

6.2	Systeemcomponenten uit basiselementen	33
6.2.1	Transport	34
6.2.2	Waterkwaliteiten en zuivering	34
6.2.3	Opslag	38
6.3	Voorbeelden van (samengestelde) systeemelementen	40
6.4	WMM-demo op basis van modelstructuur en systeemcomponenten	42
7	Opzet van WMM-berekeningen	45
7.1	WMM: Fixed Charge Multi-Commodity Network Design Problem	47
7.2	Schematische formulering	48
7.3	Keuze van beoordelingscriteria	49
7.4	Wiskundige formulering WMM-demo	51
8	Uitkomsten WMM-demo	56
8.1	Situatie 1: gelijke kosten	56
8.2	Situatie 2: verandering in vaste kosten voor transport	58
8.3	Situatie 3: veranderingen in waterbeschikbaarheid	59
8.4	Bevindingen WMM-demo	60
9	Vervolgstappen en onderzoekopgave	61
9.1	Netwerkopgave	61
9.2	Oplossingsmethode	61
9.3	Doelfuncties en randvoorwaarden	61
9.4	Onzekerheid	62
9.5	Koppeling met GIS voor invoerdata	63
9.6	Waterkwaliteit	63
9.7	Waterbeschikbaarheid vooraf en achteraf	64
10	Conclusies en aanbevelingen	65
10.1	Conclusies	65
10.2	Aanbevelingen	66
11	Referenties	67
I	Workshop fase I	70
II	Vertrekpunten voor de implementatie van waterkwaliteit in Water Matchmaker	78
III	Voorbeeld WMM inclusief opslag en alternatieve kostenfuncties	83

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Drinkwaterbedrijven beheren en gebruiken een gevarieerde infrastructuur voor het winnen, zuiveren, transporteren en leveren van schoon water aan de burger en het bedrijfsleven. Deze infrastructuur is in een tijdsbestek van vele decennia opgebouwd om watergebruikers te voorzien van de juiste hoeveelheid water, met de juiste kwaliteit. Deze drinkwatervoorziening staat onder druk omdat het steeds uitdagender is om voldoende water voor drinkwater beschikbaar te krijgen. Oorzaken hiervan zijn onder meer klimaatverandering, vervuiling, bevolkingsgroei en verdeling van het benutten van zoetwaterbronnen door verschillende gebruikers. Huishoudens, landbouw, industrie, recreatie en – niet in de laatste plaats – de natuur, hebben allemaal water nodig.

De beschikbaarheid van water, voor drinkwaterproductie en ander gebruik, kan niet los worden gezien van de natuurlijke systemen die het water leveren en tegelijkertijd ook nodig hebben. De vraag en aanbod houden zich dus niet noodzakelijkerwijs aan de institutionele grenzen van bijvoorbeeld drinkwaterbedrijven en provincies. Alle drinkwaterbedrijven in Nederland ervaren meerdere knelpunten rondom de waterbeschikbaarheid (RIVM, 2023). Afhankelijk van de regio en de periode van het jaar is er voldoende water of treden er tekorten op. De gevraagde waterkwaliteit is ook niet overal hetzelfde, net zomin als de kwaliteit van het water dat beschikbaar is. Naast het ruimtelijke en temporele aspect van vraag en aanbod heeft waterbeschikbaarheid dus kwantitatieve en een kwalitatieve component. Waterkwantiteit en -kwaliteit zijn van belang bij de selectie van bronnen die voor de waterwinning en -distributie in aanmerking komen. Het benutten van alternatieve waterbronnen in plaats van de conventionele bronnen van grond- en oppervlaktewater zou daarom een deel van de oplossing kunnen zijn (Hofman-Caris et al., 2019; Krajenbrink et al., 2021). Oplossingen worden vooralsnog hoofdzakelijk gezocht binnen deze institutionele grenzen. Dit kan ertoe leiden dat men zich lokaal in bochten moet wringen om aan relatief moeilijk beschikbaar water te komen, met watertekorten als gevolg.

De noodzaak voor grensoverstijgende samenwerking op het gebied van essentiële infrastructuur werd in februari 2021 duidelijk geïllustreerd tijdens een grootschalige stroomstoringen in Texas. Vanwege een uitzonderlijke winterstorm steeg de vraag naar elektriciteit drastisch terwijl een groot deel van de elektriciteitsproductie uitviel. Het resultaat waren grootschalige stroomstoringen waardoor miljoenen huishoudens meerdere dagen geen stroom hadden, juist op het moment dat ze hiervan afhankelijk waren om hun woningen te verwarmen (Krauss et al., 2021). In een proces van deregulering en verhoogde marktwerking sinds de jaren negentig was ervoor gekozen om het elektriciteitsnetwerk van Texas niet te verbinden met het nationale netwerk om federale regulering te ontwijken. Hierdoor was er onvoldoende capaciteit aanwezig om Texas vanuit andere staten van stroom te voorzien (Krauss et al., 2021). Dit voorbeeld laat zien dat grensoverstijgende samenwerking, ook al kost dit extra geld en moeite, noodzakelijk kan zijn voor momenten dat de externe condities buiten de verwachte bandbreedtes vallen.

Door institutionele grenzen los te laten en problemen van vraag en aanbod op grotere schaal te beschouwen, zijn er mogelijk betere oplossingen te vinden, oplossingen die voor een regio of land als geheel beter uitpakken. Zo wordt bijvoorbeeld ook vanuit de rijksoverheid gevraagd om de introductie van een 'landelijk drinkwaternet', waarin op grotere afstanden en over bedrijfsgrenzen heen wordt samengewerkt. Eerder werd in het verkennende project 'GRROW' door verschillende generaties van collega's in de sector ook al de (figuurlijke) 'collectieve ringleiding Nederland' gesuggereerd als een mogelijk toekomstbeeld – oftewel: bedrijfsgrens overstijgende waterverdeling (van Aalderen et al., 2023). Ook in het Bedrijfsonderzoek 'Klimaat effecten op Winningen' wordt

aanbevolen om dit onderwerp te onderzoeken als mogelijke manier om de Nederlandse drinkwatervoorziening op strategisch niveau veerkrachtiger te maken.

Grensoverstijgende waterverdeling vereist dan wel de samenwerking en gezamenlijke inspanning van partijen over die institutionele grenzen heen, binnen de watersector en daarbuiten. Voor het aanmoedigen en faciliteren van een dergelijke samenwerking is een systematisch en eenduidig ontwerpfundament waardevol, en dat is waar het voorliggende onderzoek aan bijdraagt. Tegelijkertijd betekent het loslaten van institutionele grenzen een substantiële toename in het aantal mogelijke opties en combinaties van vraag en aanbod. Om deze vrijheid goed te benutten en om verschillende opties goed te kunnen vergelijken en op waarde te kunnen schatten is een modelmatige aanpak waardevol. Ook daar draagt dit onderzoek aan bij.

Het doel van dit project is om de eerste stappen te zetten richting een denkkader en een modelmatig raamwerk waarmee een ruimtelijke waterverdeling kan worden ontworpen en geoptimaliseerd op regionale en landelijke schaal, in termen van vraag, aanbod, kwaliteit en infrastructuur. Als uit deze verkenning blijkt dat hier behoefte aan is, kan dit raamwerk op termijn uitgroeien tot software waarmee men een toekomstbestendige waterverdeling kan ontwerpen op basis van een infrastructurele optimalisatie op interregionaal of nationaal niveau. De verwachting is dat het raamwerk daarmee kan dienen als een waardevol vertrekpunt en inhoudelijk fundament bij discussies over kansen en knelpunten in de grootschalige waterverdeling en de daarbij behorende waterinfrastructuur.

1.2 Aanpak en leeswijzer

In dit onderzoek verkennen we de zinnigheid en mogelijkheid van een denkkader en modelmatig raamwerk ter ondersteuning van grootschalige waterverdeling. Dit kader en raamwerk noemen we de Water Matchmaker (WMM). Deze verkenning wordt uiteengezet in een aantal stappen:

- In Hoofdstuk 2 beschrijven we uitgebreider wat het kader beoogt en waarom/
- In Hoofdstuk 3 worden de ruimtelijke, tijds-, en kwaliteitsaspecten van knelpunten in de waterverdeling verder toegelicht in algemene zin en gespecificeerd voor de Nederlandse situatie. Ze vormen vertrekpunten voor de opbouw van de WMMr.
- In Hoofdstuk 4 worden de uitkomsten toegelicht van een verkennende workshop die als doel had de kennis en expertise van de verschillende experts van KWR op dit onderwerp bij elkaar te brengen. De opgehaalde kennis doet dienst als een verzameling puzzelstukken voor het modelmatig raamwerk.
- In Hoofdstuk 5 wordt op basis van een literatuurstudie een overzicht gegeven van bestaande concepten, denkkaders en modelmatige raamwerken op het gebied van waterverdeling. Deze bieden inspiratie voor de WMM en tegelijkertijd wordt onderzocht wat de WMM toevoegt aan bestaande benaderingen.
- In Hoofdstuk 6 worden de vertrekpunten en de resultaten van de workshop en literatuurstudie gesynthetiseerd tot een opzet voor de WMM.
- In Hoofdstuk 7 wordt de optimalisatiemethode en de wiskundige formulering voor WMM beschreven.
- In Hoofdstuk 8 wordt een illustratief voorbeeld gegeven van de toepassing van WMM.
- In Hoofdstuk 9 wordt de balans opgemaakt in termen van mogelijke vervolgstappen om WMM verder te ontwikkelen en de onderzoeksvragen die daarbij nog open staan.
- In Hoofdstuk 10 volgen de conclusies en aanbevelingen.

2 Waarom een Water Matchmaker?

De noodzaak voor een aanpak als WMM wordt in dit hoofdstuk toegelicht doormiddel van een aangepaste versie van een vakbladartikel welke over Water Matchmaker gepubliceerd is (Vertommen et al., 2025).

2.1 Grensoverstijgende aanpak nodig

Uit Hoofdstuk 1 is duidelijk dat ons watersysteem onder druk staat. Het centrale probleem is een mismatch tussen vraag en aanbod, zowel in ruimte, tijd als kwaliteit. Het water in Nederland heeft daarom een goede bemiddeling nodig. Dit vraagt om een watertransitie met slimme keuzes voor de inrichting van ons land, zodat voldoende en schoon water beschikbaar blijft.

De watersector zal de onbalans in zoetwaterverdeling op regionale of zelfs nationale schaal moeten aanvliegen, niet lokaal. Want lokale oplossingen zijn vaak onvoldoende om overschotten en tekorten op elkaar af te stemmen, een teveel aan water te bergen en nieuwe mogelijkheden te ontwikkelen voor het aanvullen van tekorten. Maar over de institutionele grenzen heen ontwerpen is niet zomaar iets. Plotseling zijn er veel meer verschillende combinaties mogelijk, en elke combinatie kan grote gevolgen hebben.

In het voorliggende onderzoek wordt een slimme methode – Water Matchmaker – ontwikkeld om met een grensoverstijgende blik watervraag en -aanbod beter op elkaar af te kunnen stemmen, en de samenwerking die hiervoor nodig is te ondersteunen. Hierin houden we rekening met wat voor deze afstemming nodig is – zoals transportinfrastructuur en waterbehandeling – en scheppen we helderheid in de gevolgen van bepaalde keuzes. Water Matchmaker maakt het voor het eerst mogelijk om in samenhang tussen verschillende waterbronnen en gebruiksbehoeften naar de toekomst te kijken.

2.2 Consequenties van keuzes concreet maken

In de dynamische omgeving van het watersysteem vraagt een bovenregionale aanpak van de zoetwaterverdeling niet alleen om een goede afstemming tussen voorzieningsgebieden van drinkwaterbedrijven, maar ook om afstemming tussen regio's en provincies. Grensoverstijgend ontwerpen betekent dat rekening moet worden gehouden met de doelstellingen van beide kanten. Dat is niet makkelijk, want het komt regelmatig voor dat die doelstellingen heel divers, abstract en moeilijk vergelijkbaar zijn. Wat Water Matchmaker doet, is deze doelstellingen expliciet helpen formuleren zodat ze helder en overzichtelijk tegen elkaar kunnen worden afgezet. Daarnaast is Water Matchmaker ook bedoeld om inzichtelijk te maken wat er gebeurt wanneer bij tegengestelde doelstellingen voor één ervan wordt gekozen. Kortom: wat zijn de consequenties van bepaalde keuzes voor het grotere geheel? Dit betekent dat impliciete aannames voor oplossingsrichtingen expliciet moeten worden gemaakt, en daarmee concreet. Ontwerpdoeleinden kunnen redelijk abstract zijn, zoals 'de juiste waterkwaliteit voor een duurzamer gebruik van water'. Expliciet maken komt dan neer op het uitwerken wat de 'juiste' waterkwaliteit precies is, en vooral ook wat 'duurzaam' eigenlijk betekent. In de ogen van een ingenieur kan dat bijvoorbeeld iets heel anders zijn dan in de ogen van een ecooloog. Alleen wanneer deze punten voor iedereen helder zijn, krijgen besluitvormers zicht op de gevolgen van hun keuzes. Zij zien bijvoorbeeld niet alleen de economische kosten, maar doorgronden ook welke ecologische en maatschappelijke impact een bepaalde keuze heeft. Een objectieve, kwantitatieve aanpak zoals die van Water Matchmaker is hiervoor een krachtig middel.



Figuur 2. Voorbeelden van dilemma's die kunnen spelen bij het grensoverstijgende afstemmen van watervraag en -aanbod.

Kwantitatief inzicht kan bespreekbaar maken wat voorheen niet ter discussie stond omdat het te impliciet bleef. Tot nu toe is die kwantificering niet mogelijk geweest, omdat een modelstructuur voor het totaalplaatje ontbreekt. Water Matchmaker maakt ontwerpkeuzes voor de zoetwaterverdeling in Nederland tastbaar door dit voor het eerst in een kwantitatief systeem perspectief te plaatsen, los van institutionele grenzen die hier dwars doorheen lopen. Om vervolgens het startpunt te zijn van goed onderbouwde gesprekken tussen alle verschillende partijen aan tafel en te komen tot gedeelde uitgangspunten die kunnen leiden tot een optimale oplossing voor iedereen.

2.3 Modelmatige en kwantitatieve aanpak

Bij het ontwerpen van distributieleidingnetten, tot nu toe op het niveau van een voorzieningsgebied of stad, maken we bij KWR gebruik van een wiskundige techniek: numerieke optimalisatie. Deze wiskundige aanpak heeft meerdere voordelen. Het dwingt je om uitgangspunten en aannames ondubbelzinnig te formuleren, wat goed overeenkomt met de noodzaak van expliciete keuzes in de bredere watertransitie. Daarnaast maakt een wiskundige benadering automatisering mogelijk, waardoor veel scenario's en opties kunnen worden uitgetoetst en met elkaar vergeleken. Dit sluit goed aan op de noodzaak om in de watertransitie met veel verschillende componenten rekening te houden. Tot slot kan een wiskundige benadering met geoptimaliseerde oplossingen komen waar we als mens niet zo snel aan denken. Dat is een enorme meerwaarde. Omdat de wiskundige aanpak al eerder succesvol en effectief was, ontstond het idee om deze ook te gebruiken bij het ontwerpen van de zoetwaterverdeling in regionale en nationale samenhang.

De modelmatige aanpak van de Water Matchmaker doorloopt de volgende stappen:

- 1 Ontwerp een set van bouwstenen waarmee de zoetwaterverdeling kan worden beschreven. De set moet overzichtelijk genoeg zijn, maar tevens voldoende detaillering bieden voor de aanpak van verschillende relevante cases.
 - Voorbeelden van bouwstenen: bronnen (bijvoorbeeld grond-, oppervlakte-, regen-, of restwater), gebruikers (bijvoorbeeld huishoudens, landbouw, industrie of natuur), de link tussen beide (bijvoorbeeld drinkwaterleiding, kanaal of bodem), opslag en zuivering.

- 2 Plaats de bouwstenen in een softwaretool waarmee de gebruiker verschillende ontwerpen kan maken, rekening houdend met uiteenlopende belangen. Door expliciete doelstellingen mee te nemen, kan elk ontwerp op waarde worden geschat.
 - Bijvoorbeeld: minimaliseer de gevolgen van wateronttrekking voor de natuur; verdeel het water bij een tekort zodanig dat gebruikers zo goed mogelijk in hun behoeftes worden voorzien.
- 3 Combineer de softwaretool met een wiskundige techniek – numerieke optimalisatie – voor het automatisch vinden van het ‘beste ontwerp’ bij de gegeven ontwerpdoelstellingen, inclusief oplossingen wanneer deze doelstellingen met elkaar in conflict zijn.
 - Bijvoorbeeld: om droogteschade aan de natuur zo klein mogelijk te houden, zijn hogere investeringen nodig in transport- en zuiveringsinfrastructuur.

2.4 Tool voor ontwerp mogelijkheden

Water Matchmaker is een softwaretool waarmee gebruikers de zoetwaterverdeling in een gebied kunnen analyseren, inclusief de benodigde infrastructuur en de keuzes en gevolgen die hierbij mogelijk zijn. Ze laden een kaart van bijvoorbeeld een provincie, opgebouwd uit informatielagen zoals bodemgesteldheid en infrastructuur. Hierin plaatsen zij elementen zoals steden, waterbronnen en natuurgebieden. Door data in te voeren, zoals bevolkingsaantallen, het toegestane grondwatergebruik (een beleidskeuze) en de hoeveelheid neerslag, bouwen ze het watersysteem op. Ontwerpdoelstellingen, zoals het beperken van grondwateronttrekking, bepalen wat de tool zal verstaan onder een ‘optimale’ waterverdeling. Door vervolgens op ‘play’ te klikken, berekent het algoritme de ‘beste oplossing’ binnen de gekozen uitgangspunten. Dat wil zeggen: de optimale zoetwaterverdeling en de infrastructuur en technieken die daarbij horen. Dan volgt een iteratief proces waarbij het ontwerp door de gebruikers wordt aangescherpt tijdens het wijzigen of aanvullen van de eerder gemaakte uitgangspunten. Zonder een kant en klare uitkomst te bieden, maakt Water Matchmaker de consequenties van keuzes inzichtelijk, wat kan leiden tot andere keuzes. Hiermee is het een waardevol startpunt voor discussies tussen belanghebbenden waarin alle relevante factoren zijn meegenomen in het ontwerp van de waterinfrastructuur.

Het is de bedoeling dat eindgebruikers – drinkwaterbedrijven, waterschappen, provincies, beleidsmakers en iedereen die met water te maken heeft – hiermee hun ontwerpideeën expliciet en helder kunnen formuleren, net als de bijbehorende randvoorwaarden en wensen. Om de tool te kunnen toepassen, worden ten eerste vragen gesteld die aanzetten tot het overdenken en formuleren van de ontwerpdoelstellingen. Ten tweede moeten de benodigde onderliggende data worden verzameld en ingevoerd, zodat de uitgangspunten van het ontwerp met de bouwstenen in elkaar kan worden gezet. Op het beeld dat hieruit voortkomt worden computergestuurde algoritmes toegepast die leiden tot – soms onverwachte – consequenties van keuzes en nieuwe oplossingsrichtingen die de basis vormen voor het gesprek.

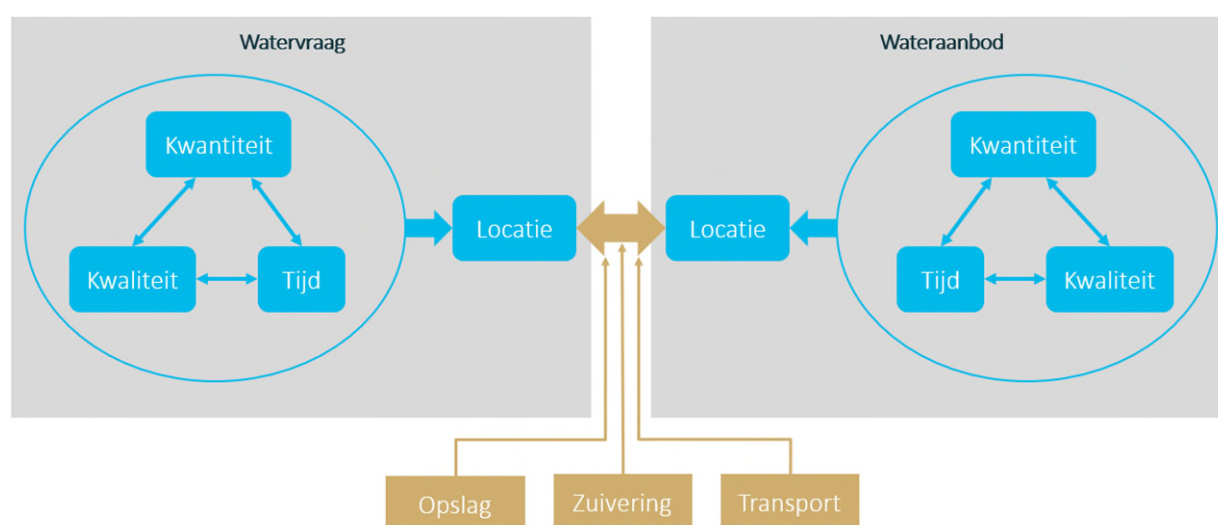
2.5 Uitdagingen

De kracht van Water Matchmaker is tegelijk een uitdaging. Het kwantitatief maken van alle aspecten van een gebalanceerde zoetwaterverdeling is immers heel lastig. Zo moeten we de waarden die we aan iets toekennen – bijvoorbeeld geld, welzijn, gezondheid, natuur – goed tegen elkaar kunnen afwegen, terwijl ze vaak in heel verschillende eenheden worden uitgedrukt. Het juiste water op de juiste plek krijgen is één, maar tegen welke prijs? Daarom gaat het niet alleen om iets kwantitatief maken, maar ook om wat we belangrijk vinden. Een andere uitdaging is het omvangrijke uitzoekwerk om de tool te vullen met de juiste data. Dit is nodig om voor elk scenario uit de juiste bron te kunnen putten en te komen tot ‘de beste oplossing’ die het startpunt vormt voor het gesprek. Denk bijvoorbeeld aan de consequenties van wateronttrekking op de natuur, die moeten worden gekwantificeerd. Tot slot noemen we de uitdaging van Water Matchmaker om op een ongebruikelijk grote schaal samen te werken. Voor drinkwaterbedrijven is het nog niet zo vanzelfsprekend om afhankelijk te zijn van de bronnen van een ander. Bovendien zijn er ook drinkwaterbedrijven die zich uitstrekken over meer dan één provincie. Hoe kijken de

provincies in zo'n geval naar een drinkwaterbedrijf dat bronnen van de ene provincie gebruikt voor de drinkwatervoorziening van de andere? Voor antwoorden op die vragen zullen we vanuit onze eigen disciplines naar het grote plaatje moeten durven kijken, elkaars taal leren spreken. Daarbij gaat Water Matchmaker juist helpen.

3 Vertrekpunten

De fysieke mogelijkheden voor een waterverdeling die institutionele grenzen overstijgt zijn afhankelijk van meerdere factoren. In het kader van dit onderzoek hanteren we op conceptueel niveau de *match* of *mismatch* tussen vraag en aanbod zoals weergegeven in Figuur 3. Bij een watervraag voor een bepaalde functie is er vraag naar een bepaalde hoeveelheid van water, met een bepaalde kwaliteit, op een bepaald moment (tijd) en op een bepaalde locatie (ruimte). Deze eigenschappen variëren per potentiële bron. Als deze eigenschappen niet één op één met elkaar overeenkomen voor een bepaalde combinatie van functie en bron, kan óf naar een andere combinatie worden gezocht, óf opslag, zuivering, en transport worden aangewend om toch via deze combinatie aan de watervraag te voldoen. Ontwerpen hoe om te gaan met de *mismatches* in kwantiteit, kwaliteit, plaats en tijd zal de centrale functie van de Water Matchmaker (in het vervolg afgekort tot WMM) zijn. In de rest van dit hoofdstuk gaan we nader in op die *mismatches* in het kader van de situatie in Nederland.



Figuur 3. Schematische weergave van de samenhang van watervraag en -aanbod. De onderdelen in blauw zijn aspecten van de systeembeschrijving die met WMM kan worden opgezet. De onderdelen in bruin zijn de infrastructurele ingrepen in het systeem die met WMM beschouwd worden.

3.1 ‘Aanbod’: de beschikbaarheid van water

Binnen ‘vraag en aanbod’ verwijst ‘aanbod’ naar die plaatsen waar (zoet) water uit de omgeving onttrokken kan worden. Van oudsher wordt hier vooral gekeken naar onttrekking uit de natuurlijke omgeving (grond- of oppervlaktewater), terwijl men bij onttrekking uit het menselijke systeem doorgaans spreekt van ‘alternatieve bronnen’ (denk aan industrieel restwater of RWZI-effluent).

Met name het natuurlijke systeem is geen simpele ‘bak met water gereed voor gebruik’; onttrekking van water heeft een breed scala aan consequenties, bijvoorbeeld voor natuur en landgebruik. Om negatieve gevolgen van onttrekking te beperken, zou op verschillende locaties de hoeveelheid onttrokken water moeten worden gereduceerd of de aanvulling worden vergroot. Minder onttrekken kan echter leiden tot tekorten in de reserves voor drinkwaterproductie van bijvoorbeeld de provincies Gelderland, Overijssel, Groningen, en het westelijke deel van Zuid-Holland (RIVM, 2023). Aansluitend is het een uitdaging om aanvullende bronnen en locaties aan te wijzen waar winningen en opslag duurzaam ingepast kunnen worden.

De duurzame (lokale) waterbeschikbaarheid van zoetwater in een bepaald gebied is af te leiden uit de balans tussen de neerslag en de optelsom van waterverliezen en van de verschillende soorten waterverbruik in dit gebied, in samenhang met de effecten van verschuivingen tussen posten in de balans op grondwaterstanden en gebruiksfuncties aan maaiveld (natuur, landbouw, infrastructuur). De manier waarop men dit gebied definieert heeft grote invloed op de uitkomst van deze berekening. Op de schaal van een compleet stroomgebied kan er een netto een positieve balans zijn (in m³ water), terwijl er op specifieke plekken in dat stroomgebied grondwaterstanden (in m t.o.v. maaiveld) dalen vanwege overmatig gebruik.

In de analyse kunnen we ons daarom niet beperken tot het analyseren van volumes water. Hoeveelheden dienen in samenhang beschouwd te worden met de relevante effecten op de omgeving, bijvoorbeeld via de invloed op grondwaterstanden of biodiversiteit.

Het vertrekpunt van WMM is om de (lokale) duurzame grenswaarden van onttrekking uit locaties binnen het geheel zoveel mogelijk expliciet te beschrijven, zodat verschillende ontwerpen mede op basis van deze effecten kunnen worden vergeleken en beoordeeld.

3.2 Mismatch in ruimte: transport

Als er een onbalans is in de watervraag en het wateraanbod in de ruimte (er is wel water beschikbaar maar niet op de juiste locatie), dan is transport de meest voor de hand liggende oplossing. In Nederland wordt dit in het geval van drinkwater opgelost met een wijdverbreid leidingnet. Drinkwatergebruikers in Nederland, van huishoudens tot industrie, ontvangen hun drinkwater via dit leidingnet. Nederland telt 225 locaties waar drinkwater gewonnen wordt (Vewin, 2022), terwijl er ongeveer 2200 bevolkingskernen zijn (CBS, 2024). Wanneer we de winlocaties en de bevolkingskernen naast elkaar leggen is duidelijk te zien dat deze over het algemeen niet overlappen (Figuur 4). Een netwerk van meer dan 120.000 km aan leidingen verbindt wateraanbod met watervraag.

Transport van water gebeurt niet uitsluitend via leidingnetten. Zo wordt het oppervlaktewatersysteem ingezet om in delen van Nederland water van elders aan te voeren in droge perioden. Voor beregening maken agrariërs in delen van het land gebruik van oppervlaktewater dat soms op enige afstand van de percelen uit waterlopen wordt onttrokken. In uitzonderlijke gevallen worden zelfs vrachtwagens worden ingezet om zoet water van grote afstand aan te voeren, bijvoorbeeld als geen (zoet) water in de omgeving beschikbaar is (bijvoorbeeld in delen van Zeeland).

Het vertrekpunt van WMM is om de geografische verdeling van watervraag en -aanbod als invoer te definiëren en om in een ontwerp verschillende typen van transport tussen verschillende locaties met watervraag en -aanbod te kunnen overwegen. De meest geschikte of efficiënte wijze van transport per combinatie volgt dan uit de samenhang van het geheel.

Het vertrekpunt van WMM is om de tijdsafhankelijkheid van watervraag en -aanbod als invoer te definiëren en om in een ontwerp verschillende typen van opslag en buffering van water te overwegen op de locaties waar deze mogelijk gerealiseerd kunnen worden.

3.4 Mismatch in kwaliteit: zuivering

Verschillende gebruiksfuncties vragen mogelijk om een verschillende kwaliteit in water. Voor de natuur bijvoorbeeld is het allereerst essentieel dat het gebruikte water geen schadelijke stoffen bevat. Voor drinkwater geldt dat ook, maar is het ook essentieel dat het water geen pathogenen bevat. Voor bijvoorbeeld koelwater is het voornamelijk van belang dat het water de technische installatie niet aantast.

Verschillende zoetwaterbronnen hebben vaak een verschillende waterkwaliteit. Grondwater in het oosten en zuiden van Nederland is vaak relatief zuiver, maar kan ook vervuild geraakt zijn door bijvoorbeeld industrie of landbouw. In het westen en noorden van Nederland is het grondwater brak tot zout, met uitzondering van enkele locaties in de duinen waar drinkwaterbedrijven zoetwater infiltreren bij wijze van natuurlijke zuiveringsstap. Oppervlaktewater in rivieren en meren is vaak zoet maar is ook relatief sterk vervuild door industrie. De waterkwaliteit van een bepaalde bron kan bovendien variëren in de tijd. De voornoemde bronnen zijn de conventionele bronnen vanuit het perspectief van de drinkwatervoorziening. Zoet water kan echter ook worden onttrokken uit zogenoemde alternatieve bronnen met ieder hun eigen waterkwaliteit, zoals brak oppervlaktewater, zeewater of restwater na menselijk gebruik (bijvoorbeeld RWZI-effluent of industrieel restwater).

Wanneer de kwaliteit van water niet voldoet aan de eisen van de gebruiker, dan kunnen (naast verbetering van de bronkwaliteit door het limiteren van de vervuilingdruk) verschillende zuiveringssystemen gebruikt worden om de benodigde kwaliteit te bereiken. Deze kunnen hoog-technisch zijn, maar er zijn ook zuiveringstappen die meer met het natuurlijke systeem verweven zijn die tot op zekere hoogte water kunnen zuiveren zonder menselijke toevoer van energie of chemische stoffen. Iedere zuiveringsstap heeft daarmee een andere capaciteit, andere benodigdheden, en een andere impact op de omgeving. Zuiveringstappen kunnen worden gecombineerd tot een waterbehandelingssysteem. Een waterbehandelingssysteem kan op verschillende plaatsen in het waterdistributiesysteem worden geplaatst: dicht bij de bron (bijvoorbeeld het waterwingebied), langs het distributiesysteem (bijvoorbeeld dicht bij een waterbuffer) of bij de eindgebruiker.

Ruwweg kan gesteld worden: hoe groter de verandering die moet worden bewerkstelligd bij het zuiveren van water, hoe hoger de impact en kosten. Het is daarom zinnig om watervraag en -aanbod dusdanig aan elkaar te koppelen dat een minimum aan zuivering nodig is. Dit betekent dat er een onderscheid gemaakt wordt tussen de waterkwaliteit welke nodig is voor verschillende toepassingen.

Het vertrekpunt van WMM is om de gewenste waterkwaliteit van gebruiksfuncties en de (tijdsafhankelijke) waterkwaliteit van bronnen als invoer te definiëren en om in een ontwerp de verschillende combinaties mede te beoordelen op de bijbehorende zuiveringsstappen.

4 Verkennende workshop

Binnen KWR is veel kennis en expertise aanwezig van de verschillende deelaspecten die in voorgaande hoofdstukken zijn beschreven. Met behulp van een workshop hebben we de belangrijkste factoren geïdentificeerd die relevant zijn om watervraag en wateraanbod met elkaar in balans te brengen. Met experts uit de verschillende teams en disciplines van KWR is deze kennis opgehaald die zal dienen als de puzzelstukjes voor het modelmatig raamwerk. De workshop was ontworpen om zo effectief mogelijk de expertise van alle aanwezigen op te halen. Dit is gedaan door afwisselend plenair en in kleine groepjes te werken. In het bijzonder werd er aangestuurd op het verkrijgen van:

- Een overzicht van alle mogelijke bronnen en gebruikers binnen het Nederlandse watersysteem;
- Een overzicht van de aandachtspunten waarmee rekening gehouden moet worden om bepaalde koppelingen tussen bronnen en gebruikers te maken.

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste aan bod gekomen punten opgesomd die impliciet of expliciet terug moeten komen in WMM. Een uitgebreide uitleg over de opzet van de workshop en de ruwe data is opgenomen in Bijlage I. Benadrukt moet worden dat de deelnemers gedurende de workshop meermaals impliciet of expliciet aangaven dat een modelmatige aanpak ambitieus maar haalbaar is en zeer waardevol zou zijn. Ook werd herhaaldelijk benadrukt dat het modelmatig beoordelen van ontwerpen een essentiële stap is, die verder zou moeten gaan dan een beoordeling in termen van financiële kosten alleen. Juist het inzichtelijk maken van diverse, moeilijk vergelijkbare en soms conflicterende prestatiecriteria wordt als zeer waardevol gezien.

4.1 Bronnen

Tijdens de workshop kwam een breed scala aan waterbronnen aan bod: van conventionele waterbronnen zoals grondwater, oppervlaktewater en zeewater tot nieuwe concepten zoals water afkomstig uit consumptiegoederen. In de discussie kwamen veel alternatieve waterbronnen aan de orde. Hierbij gaat het niet alleen om de meer bekende alternatieve bronnen zoals RWZI-effluent, zwart en grijs water, en hemelwater, maar ook om bemalingswater, industriële afvalwaterstromen (restwater uit de industrie), koelwater, waterstromen als gevolg van waterstofgebruik (restproduct van de verbranding van waterstof), water uit ijsbergen, water getransporteerd in containers en water uit de atmosfeer (condensatie).

Er was ook aandacht voor aandachtspunten rondom zowel conventionele als alternatieve bronnen. Waterkwaliteit, en de variaties daarvan in de tijd en tussen bronnen onderling, was een van de meest genoemde punten. Daarnaast kwam aan de orde dat het belangrijk is om onderscheid te maken tussen bronnen die continu beschikbaar zijn (grondwater, maar ook bemalingswater) en bronnen waarvan de beschikbaarheid sterk varieert in de tijd (onder andere oppervlaktewater en hemelwater). Stabiliteit en betrouwbaarheid van waterbronnen zijn een punt van aandacht.

4.2 Gebruikers

De gebruikers die tijdens de workshop werden genoemd, kunnen worden ingedeeld in vier categorieën:

- huishoudens en burgers;
- industrie en bedrijfsleven;
- land- en tuinbouw;
- natuur en leefomgeving.

Een belangrijk aandachtspunt dat in feite voor alle categorieën geldt, is het onderscheid tussen waterverbruik en watergebruik:

- Bij waterverbruik is sprake van het daadwerkelijk onttrekken van water uit het watersysteem voor de benodigde toepassing, waarna het benutte water niet volledig en/of met een veranderde kwaliteit weer in (een ander deel van) het systeem terugkomt. Denk hierbij aan de productie en consumptie van drinkwater of het onttrekken en benutten van grondwater voor koelwater in de industrie;
- Bij watergebruik wordt water niet zozeer geconsumeerd, maar vormt het de omgeving of het medium voor verschillende toepassingen. Denk hierbij aan recreatie (het gebruik van speel- en zwemwater), de binnenvaart of het leefgebied van aquatische planten en dieren.

Onder huishoudens en burgers vallen niet alleen huishoudelijk drinkwaterverbruik, maar ook bijvoorbeeld de brandweer en (soms) het beregenen van stedelijk groen. Een belangrijk aandachtspunt bij huishoudelijk waterverbruik is het onderscheid tussen water voor consumptie en water voor andere doeleinden. Recreatie werd genoemd als voorbeeld van watergebruik. Voor WMM is het belangrijk om het juiste aggregatieniveau te kiezen om aan te sluiten bij de verschillende functies van verbruik en gebruik.

Ten aanzien van de industrie werd opgemerkt dat het belangrijk is om onderscheid te maken tussen regelmatig verbruik van water en water voor noodgevallen (back-up water). Bovendien moet onderscheid worden gemaakt tussen kleinzakelijk (kleine bedrijven en kantoren) en grootzakelijk verbruik (onder ander industrie). Sommige industrieën zoals de bouwsector gebruiken grote hoeveelheden water van relatief goede waterkwaliteit. Voor een aantal industriële toepassingen is temperatuur een relevant aspect van waterkwaliteit. Sectoren zoals scheepvaart zijn ook afhankelijk van waterstanden (gebruik). Ten slotte moet rekening worden gehouden met de vraag naar water vanuit de energiesector, bijvoorbeeld voor koelwater of de productie van waterstof.

Wat de land- en tuinbouw betreft, vereisen verschillende gewassen en typen vee verschillende hoeveelheden water en van verschillende kwaliteit. Daarnaast is een belangrijk deel van de watervraag sterk seizoensgebonden. Tot slot kan ook peilbeheer ten behoeve van landbouw onder deze categorie worden geschaard.

De watervraag van de natuur en leefomgeving is een brede categorie: deze omvat onder andere verdamping door vegetatie, het op peil houden van de grondwaterstand en oppervlaktewater (sloten en meren). Het waarborgen van voldoende water voor de natuur werd expliciet als zorgpunt genoemd. Water voor de natuur is niet alleen essentieel voor het behoud van biodiversiteit, maar ook om de fysieke leefomgeving van de bevolking te beschermen (denk aan voldoende hoge grondwaterstanden om bodemdaling te voorkomen).

4.3 Matches tussen bronnen en gebruikers

In het interactieve deel van de workshop werd de deelnemers gevraagd om in kleine groepjes na te denken over koppelingen tussen een aantal waterbronnen en gebruikers naar keuze. De bevindingen worden hieronder per bron samengevat.

Het hergebruik van **bemalingswater**, zowel afkomstig uit polders als uit bijvoorbeeld bouwprojecten of infrastructuur, zou kunnen leiden tot een besparing op lozingskosten. Toepassing van bemalingswater uit bouwprojecten zou in de industrie kunnen worden hergebruikt, maar de benodigde zuivering is sterk afhankelijk van de toepassing en de schaal. Bemalingswater uit polders werd vanwege de lage waterkwaliteit niet erg interessant geacht voor agrarisch gebruik vanwege de potentieel slechte kwaliteit, tenzij de teeltgewassen hierop worden aangepast. Toepassing in de landbouw is bovendien erg seizoensgebonden, terwijl polderwater misschien weer meer continu beschikbaar komt. Door deze permanente beschikbaarheid zou het interessant kunnen zijn voor drinkwaterproductie, maar de kwaliteit (en aan zuivering gekoppelde reststromen) is een belangrijk aandachtspunt.

Hergebruik van **RWZI-effluent**, in combinatie met ondergrondse opslag, kan kansrijk zijn voor het op peil houden van de grondwaterstand. Vanwege de constante beschikbaarheid is het mogelijk een interessante bron voor doeleneinden met een lagere kwaliteitseis in de industrie, landbouw en (afhankelijk van de zuivering) huishoudens.

Restwater uit industrie en waterzuivering werd in verband gebracht met diverse gebruikers zoals natuur, huishoudens en de energiesector. Een aandachtspunt is dat het restwater zeer verschillend in kwaliteit kan zijn; goede kennis hiervan is vereist om de match mogelijk te maken. Bovendien zullen de hoeveelheid water en de locatie bepalend zijn voor het koppelen van restwater met huishoudelijke toepassingen.

Voor de toepassing van **hemelwater** is voor een aantal toepassingen nog meer kennis nodig over de kwaliteit. Daarnaast is opgemerkt dat regenwater geen continue bron van water is, wat een belangrijk aandachtspunt is voor de betrouwbaarheid van deze bron. **Zeewater** werd tot slot genoemd als een van de meest betrouwbare alternatieve bronnen wat betreft kwantiteit. Maar de kosten (geld en milieu) om drinkwater van zeewater te maken zijn dusdanig hoog dat dit over het algemeen niet een duurzame oplossing is.

Tot slot werden door de gebruikers nog een aantal algemene opmerkingen gemaakt over het koppelen van bronnen en gebruikers:

- Kijk in de beoordeling van potentiële matches verder dan enkel een kostenanalyse.
- Koppel gebruikers met een constante watervraag aan bronnen die continu beschikbaar zijn.
- Definieer een geschikte tijdsresolutie.

5 Concepten en modellen

Op basis van de vertrekpunten (Hoofdstuk 3) en de uitkomsten van de workshop (Hoofdstuk 4) is een literatuurstudie gedaan om te inventariseren in welke mate de benodigde functionaliteit voor WMM al beschikbaar was in andere bestaande modellen. De vereisten voor een dergelijk model houden verband met deze vier toekomstige kernfunctionaliteiten van WMM waarin we geïnteresseerd zijn:

1. het beschrijven (tekenen) van een systeem voor (inter)regionale waterverdeling in termen van de relevante componenten (watersysteem, winningen, zuivering, opslag, transport, vraag, realisatiekosten, etc.);
2. het beschrijven (doorrekenen) van het gedrag van een ontworpen systeem voor waterverdeling (onttrekkingseffecten, verdeling van water, operationele kosten, etc.);
3. het beoordelen van een ontworpen systeem op basis van (gekwantificeerde) eigenschappen en gedrag;
4. het automatisch genereren, beoordelen en aanscherpen van ontwerpen door de bovenstaande componenten te verbinden met numerieke optimalisatiemodellen.

Op basis daarvan is de literatuur doorzocht naar modellen voor waterverdeling, voor infrastructurele planning van waterverdeling, en voor automatisering/optimalisatie van beide.

Waterverdelingsvraagstukken hebben de afgelopen jaren veel aandacht gekregen en zullen naar verwachting relevanter worden vanwege veranderende waterbeschikbaarheid en watervraag. Veranderingen in klimaat en neerslagpatronen zullen de waterbeschikbaarheid per gebied doen verschillen. Lokale economische ontwikkelingen, demografische veranderingen en regelgeving zullen de watervraag doen veranderen. Deze veranderingen, vooral een lokale verhoging van de vraag in combinatie met een verlaging van beschikbaarheid, kunnen worden opgevangen met nieuwe infrastructuur.

De afgelopen decennia is er een gespecialiseerde tak van onderzoek ontstaan die is gericht op verdelingsvraagstukken van (schaarse) watervoorraden: integraal waterbeheer (Integrated Water Resources Management, IWRM), ook wel integraal stroomgebiedsbeheer genoemd (Integrated River Basin Management, IRBM). Een van de belangrijkste doelen van integraal waterbeheer is om economisch en sociaal welzijn te maximaliseren, waarbij de verwevenheid tussen mensen, ecosystemen en hydrologie in acht wordt genomen (Global Water Partnership., 2004). Deze doelen kunnen worden opgedeeld in vijf concepten (Candido et al., 2022):

- **Economische optimalisatie:** maximalisatie van de netto economische baten van watergebruik tussen de verschillende mogelijke gebruiken van dit water in een gebied. Water wordt zodanig tussen de verschillende eindgebruiken verdeeld dat de marginale baten gelijk zijn tussen alle gebruikers.
- **Duurzaamheid:** een concept waarmee ecosystemen ook gezien worden als eindgebruikers van water en daarmee hun natuurlijke functioneren kunnen behouden.
- **Gelijkheid/rechtvaardigheid:** een concept om sociale rechtvaardigheid te waarborgen en ervoor te zorgen dat alle gebruikers een minimale toegang tot water behouden. Dit criterium is nodig om ervoor te zorgen dat ook marginale groepen in de samenleving toegang tot water behouden wanneer hun economische toegevoegde waarde klein is en volgens een puur economische optimalisatie niet significant zou zijn.
- **Sociaal welzijn:** naast de economische optimalisatie en gelijkheid is het relevant om te kijken in hoeverre watergebruik invloed kan hebben op een aantal sociale indicatoren zoals de hoeveelheid banen, inkomen onder verschillende sociale klassen of levensverwachting.
- **Waterkwantiteit en -kwaliteit:** de economische waarde van water voor verschillende gebruikers is tegelijkertijd een kwestie van kwantiteit en kwaliteit. De combinatie van deze twee aspecten bepaalt de beschikbaarheid van water. Historisch gezien waren economisch gedreven modellen, zoals hydro-economische modellen, vooral

gebaseerd op waterkwantiteit. Kwaliteit wordt gezien als belangrijke toevoeging en wordt steeds vaker toegepast, maar brengt specifieke uitdagingen mee op het gebied van modellering en optimalisatie.

Bovengenoemde vijf concepten zijn tevens de ingrediënten voor verschillende beslissingsondersteunende systemen (*Decision Support System* of DSS). DSS zijn een belangrijk instrument voor het oplossen van vraagstukken binnen integraal waterbeheer. De kern van een DSS is doorgaans een model of verzameling aan modellen die tijdens besluitvorming helpen het overzicht te bewaren over alle data en analyses die de besluitvorming (zouden moeten) beïnvloeden. Sommige auteurs beschrijven twee gradaties in de rol van DSS: beschrijvende (*descriptive*) en voorschrijvende (*prescriptive*) DSS-modellen (Candido et al., 2022; Loucks & van Beek, 2017), ook wel respectievelijk simulatie- en optimalisatiemodellen genoemd:

- **Beschrijvende of simulatiemodellen** geven inzicht in wat er zal gebeuren wanneer een bepaalde strategie uitgevoerd wordt, of een bepaalde verzameling aan voorwaarden zich voordoet ('*What if?*'). In de meeste gevallen dient de gebruiker zelf de scenario's op te stellen en door te rekenen. De meeste bestaande DSS-pakketten vallen binnen deze categorie.
- **Voorschrijvende of optimalisatiemodellen** kunnen een wat actievere bijdrage leveren aan de te bepalen strategie om een bepaald doel te bereiken. Het model rekent daarbij een groot aantal scenario's door, waarbij de geoptimaliseerde variant wordt bepaald op basis van de doelen en randvoorwaarden die door de gebruiker zijn opgegeven. (Dit is dus waar met bovengenoemde kernfunctionaliteit 4 ook op aangestuurd wordt voor WMM).

Historisch gezien zijn optimalisaties vaak ontwikkeld op basis van een minder gedetailleerde weerspiegeling van de werkelijkheid dan simulatiemodellen. De reden hiervoor zit in de rekenkracht benodigd voor het genereren en doorrekenen van grote aantallen mogelijke varianten van ontwerpen. Voor een gedetailleerd of groot systeem zijn er meer varianten mogelijk en duurt het doorrekenen van een variant mogelijk langer (Loucks & van Beek 2017). Er vinden continu ontwikkelingen plaats die het doorrekenen van complexere problemen mogelijk maken, zowel op het gebied van optimalisatiestrategieën die efficiënt door de totale verzameling van mogelijke ontwerpen heen kunnen zoeken als op het gebied van krachtigere rekenhardware en -software. Desondanks zal het vinden van het juiste abstractieniveau voor de systeembeschrijving in WMM cruciaal blijven.

In de volgende paragrafen bespreken we de verschillende modelcategorieën en bestaande methodes en modellen om waterverdelingsvraagstukken te modelleren en evalueren. Daarbij lichten we enkele modellen uit waar we bij KWR ervaring mee hebben of die mogelijk voor WMM interessant zijn. Voor een uitgebreid overzicht van modellen binnen beslissingsondersteunende systemen voor integraal waterbeheer verwijzen we naar Candido et al. (2022). Een specifiek overzicht van hydro-economische modellen is te vinden in Harou et al. (2009). Aan het eind van het hoofdstuk wordt beschreven welke elementen er ontbreken voor het optimalisatievraagstuk dat we met WMM willen oplossen.

5.1 Simulatiepakketten met beperkte optimalisatiecomponenten

De meeste DSS-modellen vallen binnen de categorie beschrijvende of simulatiemodellen (Candido et al., 2022; Harou et al., 2009). Een aantal modellen zijn al in de jaren tachtig ontwikkeld, voor een specifiek (stroom)gebied (focus op de VS), met een belangrijke rol voor de verdeling van water vanuit stuwmeren. Een deel van de modellen is ontwikkeld voor specifieke projecten, waarbij het de vraag is of ze nog steeds operationeel zijn. Een uitzondering hierop is MIKE HYDRO BASINS (o.a. Jha & Gupta, 2003), een groot hydrologisch model dat nog steeds veel wordt gebruikt, met name op grote schaal (zelfs internationaal). In deze paragraaf lichten we enkele (meer recente) modellen uit die mogelijk relevant zijn voor WMM, of waarmee binnen KWR al ervaring is opgedaan.

5.1.1 RIBASIM

RIBASIM (van der Krogt & Boccalon, 2013) is een model waarmee op stroomgebiedsniveau waterverdelingsvraagstukken kunnen worden doorgerekend. Het simuleert vraag en aanbod in ruimte en tijd, onder invloed van verschillende aspecten en scenario's (hydrologisch, sociaaleconomisch, klimaatverandering, waterkwaliteit, enz.). Het stelt de gebruiker in staat om verschillende scenario's en maatregelen in een stroomgebied door te rekenen en te evalueren. Het gaat hier bijvoorbeeld om ingrepen om waterbeschikbaarheid en waterkwaliteit te verbeteren, het berekenen van de herkomst van het water voor elke plek in het stroomgebied als basis voor een waterkwaliteitsevaluatie, of het evalueren van de limieten van grondstoffen en de mogelijkheden om een regio te ontwikkelen.

Het oppervlaktewatersysteem wordt gerepresenteerd aan de hand van knopen en takken. Gedurende een gekozen simulatieperiode wordt voor elke tijdstap een waterbalans berekend. Hierbij is de eenvoudigste manier om water aan de verschillende gebruikers toe te kennen volgens het principe van 'wie het eerst komt, wie het eerst maalt'. Dit principe kan aangepast en gestuurd worden door de prioritering en regels voor verschillende gebruikers aan te passen. Het oppervlaktewatersysteem kan worden gekoppeld aan andere modellen voor onder andere neerslag-afvoer, waterkwaliteit en grondwater. RIBASIM bevat bovendien een component voor eenvoudige waterkwaliteitsberekeningen en een landbouwcomponent waarmee zaken als landbouwwatervraag en gewasopbrengst kunnen worden berekend. RIBASIM heeft drie deelsystemen, die zijn gekoppeld aan een gebruikersomgeving met een geografische weergave (GIS):

- informatiesysteem met de benodigde databases voor de simulaties;
- verzameling van simulatiemodellen om de hydrologie, watervraag, waterkwaliteit etc. te berekenen;
- analysesysteem om de beheerstrategieën te evalueren, waarbij ook de mogelijkheid bestaat om een DSS op te zetten.

RIBASIM is in de jaren tachtig ontwikkeld door Deltares en wordt inmiddels toegepast in diverse landen. Het model zal op termijn de oppervlaktewatermodule vormen binnen het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI)³, het instrumentarium dat wordt gebruikt om de effecten van veranderingen in hydrologie, klimaat en maatregelen in het watersysteem in Nederland in beeld te brengen.

5.1.2 WEAP

Het modelinstrumentarium WEAP (*Water Evaluation And Planning*) is in de kern een waterbalansmodel voor vraagstukken rondom integraal waterbeheer en planning (Yates et al., 2005). De verdeling van beschikbaar water geschiedt op basis van vraag en aanbod. Wanneer de totale vraag het aanbod overstijgt, kunnen watertekorten ontstaan. WEAP is opgezet volgens een structuur van *nodes* (knopen) en *links* (verbindingen), die binnen een GIS-gebruikersomgeving via het *drag and drop*-principe kan worden opgezet. Water vragende sectoren, aangeduid als *Demand sites*, en water leverende sectoren, gevat onder *Supply and Resources*, vormen de knopen. De knopen kunnen zowel antropogene (industrie, drinkwater, enz.) als natuurlijke componenten (bijvoorbeeld grondwater) van het watersysteem zijn. Tot de *Demand sites* behoren alle sectoren die water verbruiken; denk hierbij aan stedelijk gebied (huishoudens), landbouw en industrie, maar bijvoorbeeld ook drinkwaterwinning. *Demand sites* zijn de sturende onderdelen in de waterbalansberekeningen, waarbij het schaalniveau kan worden aangepast aan de wensen van de gebruiker en de beschikbare gegevens. Zo kan bijvoorbeeld de huishoudelijke watervraag worden gemodelleerd als één *Demand site*, maar ook per stad of wijk. Het is aan de gebruiker om de verschillende *Demand sites* te prioriteren, dat wil zeggen de volgorde van watervoorziening op te geven. Indien waterschaarste optreedt, zullen de sectoren met de hoogste prioriteit (bijvoorbeeld drinkwatervoorziening) eerst worden voorzien, met als gevolg dat eventuele tekorten het eerst optreden in de sectoren met lagere prioriteit. Behalve de verdeling van (oppervlakte)water kunnen binnen WEAP ook onder andere infiltratie, watervraag van landbouwgewassen, waterkwaliteit en vervuiling worden gesimuleerd. Het model kan worden gekoppeld met

³ Zie o.a. <https://nhi.nu/ontwikkelingen/> en <https://tkideltatechnologie.nl/project/oppervlaktewatermodule-nhi/>

andere modellen en software, bijvoorbeeld Excel, MODFLOW (grondwater) en modules voor waterkwaliteitsberekeningen. Daarnaast bevat het instrumentarium model building-functionaliteit, waarbij de relaties tussen knopen via ingebouwde of door de gebruiker op te stellen functies en vergelijkingen kunnen worden opgesteld.

WEAP is in de jaren tachtig ontwikkeld en kort daarna in beheer gekomen van het Stockholm Environment Institute (SEI) en wordt tegenwoordig wereldwijd toegepast. Bij KWR is het model enkele jaren geleden toegepast in het WiCE-project 'RWZI als waterfabriek' (Krajenbrink et al., 2021) voor een verkenning van hergebruik van RWZI-effluent op regionale schaal in twee casusgebieden.

5.1.3 UWOT

De *Urban Water Optioneering Tool* (UWOT) is een DSS-tool om waterverdelingsvraagstukken in met name stedelijk gebied door te rekenen (Makropoulos et al 2008)⁴. Het heeft een modulaire opzet waarmee verschillende onderdelen van de stedelijke waterketen (drinkwater, afvalwater, neerslag-afvoer) kunnen worden gesimuleerd tot op het niveau van individuele woningen en onderdelen daarvan. Waterverdeling binnen UWOT kent een *bottom up*-benadering op basis van vraag-gestuurde signalen, waarbij een watervraag binnen het modelnetwerk wordt gekoppeld aan een beschikbare bron ('*tap to source*'). Het model kan rekenen met relatief kleine tijdstappen (uurbasis) die passen bij het gedetailleerde niveau en de snelle reactietijd van de processen daarbinnen. UWOT biedt de mogelijkheid om scenario's door te rekenen waarin het effect van maatregelen, interventies en nieuwe technologieën, bijvoorbeeld op het gebied van huishoudelijke waterbesparingen, inzichtelijk wordt gemaakt. Het model is onderdeel van het internationale netwerk Watershare⁵ en is de afgelopen jaren in diverse (internationale) KWR-projecten toegepast, waaronder B-WaterSmart, een project binnen het Horizon 2020-programma van de Europese Unie (Bouziotas et al 2023)⁶. UWOT vormt onder andere de rekenkern van de *Regional demand-supply matching GIS tool* (RDSMG)⁷. De RDSMG is ontwikkeld als een van de tools binnen B-WaterSmart om vrij beschikbare gegevens over watervraag en -aanbod binnen een regio in een GIS-omgeving te visualiseren en waar mogelijk alternatieve koppelingen tussen vraag en aanbod te kwantificeren.

5.2 Systeemdynamische pakketten

De meeste hydrologische modellen zijn schematisaties van grond- of oppervlaktewater die gebruikmaken van partiële differentiaalvergelijkingen die numeriek worden opgelost. De onderzoeker kan ze gebruiken om verschillen in ruimte en vaak ook tijd binnen een hydrologisch deelsysteem te onderzoeken. De meeste modellen zijn fysisch gedistribueerd en gedetailleerd om de werkelijkheid zo goed mogelijk na te bootsen (Stofberg et al., 2024). Een nadeel van deze modellen is dat ze veel rekentijd kosten in het geval van relatief grote systemen, zodat ze minder praktisch zijn om te zetten bij het doorrekenen van veel scenario's, laat staan optimalisaties. Daarnaast worden deelsystemen doorgaans afzonderlijk beschouwd en doorgerekend, waardoor (complexe) interacties buiten beschouwing blijven (Phan et al., 2021; Yazdani et al., 2026). Systeemdynamische modellen (ook wel *System dynamics models*) zijn geschikt om op een hoger abstractieniveau, met een minder gedetailleerde schematisatie, verschillende hydrologische deelsystemen te koppelen en door te rekenen, waarmee de interactie tussen die deelsystemen kan worden onderzocht. Het gedrag van de deelsystemen is vaak beschreven met één of enkele gewone differentiaalvergelijkingen, waardoor het doorrekenen relatief weinig rekentijd kost (Stofberg et al., 2024). Ze zijn geschikt om de relaties en terugkoppeling tussen deelsystemen te onderzoeken, inclusief de bijbehorende niet-lineaire verbanden en dynamisch gedrag. Door het hogere abstractieniveau en het gebruik van eenvoudiger vergelijkingen is het niet mogelijk om processen en gedrag binnen een deelsysteem te onderzoeken. De relatief snelle rekentijd stelt de gebruiker echter in staat om in korte tijd verschillende scenario's door te rekenen en op

⁴ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815208000698>

⁵ <https://www.watershare.eu>

⁶ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2023.2190030#abstract>

⁷ <https://mp.watereurope.eu/d/Product/35>

deze manier gevoeligheidsanalyses of zelfs kleine optimalisaties van een hydrologisch systeem uit te voeren. Systeemdynamische modellen kunnen daarom gebruikt worden om systemen op strategisch niveau beter te begrijpen (Stofberg et al., 2024). Ze worden in toenemende mate gebruikt in DSS-tools voor vraagstukken rondom waterverdeling, hoewel het grondwatersysteem nog vaak onderbelicht blijft. Ook worden ze doorgaans toegepast voor scenariostudies ('*What if?*') en nog beperkt voor optimalisatiestudies ('*What is best?*'). Tot slot worden DSS-tools op basis van systeemdynamische modellen nog relatief weinig in samenwerking met stakeholders ontwikkeld, hoewel ze daar in de kern zeer geschikt voor zijn (Phan et al., 2021).

5.2.1 Vensim

Een voorbeeld van een systeemdynamisch modelinstrumentarium is het pakket Vensim⁸. Een belangrijk kenmerk van dit model is de structuur van causale verbanden en *feedback loops* tussen deelsystemen, die met behulp van eenvoudige vergelijkingen door de gebruiker kunnen worden opgezet. Het is geen specifiek hydrologisch model, maar kan door de generieke opzet wel als zodanig worden gebruikt. Door de korte rekentijd is het model geschikt om scenariostudies en gevoeligheidsanalyses uit te voeren. Verdelingsvraagstukken worden opgelost op basis van prioritering. Vensim bevat tevens een optimalisatietool voor modelkalibratie, hoewel deze niet beschikbaar is in de standaardversies. In de gebruikersomgeving kan een modelsysteem gemakkelijk via *drag and drop* worden opgesteld. Een nadeel van deze opzet is dat het model snel onoverzichtelijk wordt als er veel componenten worden gemodelleerd die bovendien met verschillende andere componenten en randvoorwaarden verband houden. Systeem dynamische modellen zijn binnen KWR toegepast voor besluitondersteuning in regionaal watermanagement (de Wit et al., 2026) en in de casus SUPERLOCAL (Krajenbrink & Stofberg, 2023) binnen het WiCE-project 'Samen voor balans tussen watervraag en -aanbod'. In de casus is Vensim toegepast om een regionaal model van grond- en oppervlaktewater te vervaardigen waarmee het effect van grootschalige waterbesparing in stedelijk gebied op het regionale watersysteem inzichtelijk is gemaakt.

5.2.2 Watersysteemverkenner

Als onderdeel van het WiCE-project 'Samen voor balans tussen watervraag en -aanbod' heeft KWR de Watersysteemverkenner ontwikkeld, een systeemdynamisch model in R om de effecten en doorwerking van maatregelen in het regionale watersysteem te kunnen kwantificeren (Stofberg & van Huijgevoort, 2024a, 2024b). Het omvat zowel het hydrologische systeem als het antropogene watersysteem (waterketen), inclusief interacties tussen grond- en oppervlaktewater. De Watersysteemverkenner is toegepast op een gebied in Noord-Brabant om de dynamiek van het watersysteem op de zuidelijke hoge zandgronden in beeld te brengen. Daarbij is specifiek onderzocht hoe verschillende droogtemaatregelen kunnen doorwerken in het watersysteem en hoe dit samenhangt met omgevingskenmerken. Het voordeel ten opzichte van gangbare hydrologische modellen is de snelle rekentijd van aanpassingen in het watersysteem, waardoor gebruikers (bijvoorbeeld stakeholders in een gebiedsproces) in korte tijd inzicht kunnen krijgen in het effect van aanpassingen en maatregelen in het watersysteem. Het gaat hierbij vooral om de ordegrootte van dit effect in vergelijking met andere maatregelen of de status quo, en niet zozeer om het absolute effect. Het model heeft daarvoor niet voldoende detail en is bovendien nog niet uitvoerig gevalideerd.

5.3 Optimalisatiepakketten

Optimalisatiemodellen kunnen worden gebruikt om een strategie te bepalen om een bepaald doel te bereiken, bijvoorbeeld optimale waterverdeling tussen gebruikers in een gebied. Daartoe worden een groot aantal scenario's doorgerekend en wordt vervolgens de optimale variant bepaald op basis van vooraf omschreven criteria. Optimalisatie kan gebruikt worden voor operationele processen (bepalen hoe een bestaand systeem optimaal benut kan worden) en voor ontwerp (het ontwerpen of uitbreiden van een systeem). Optimalisatiemodellen zijn niet specifiek ontwikkeld voor waterverdelingsvraagstukken, maar hebben de laatste decennia wel hun toepassing

⁸ <https://vensim.com/>

gevonden binnen integraal waterbeheer. Hydro-economische modellen vormen een belangrijke categorie, die in deze paragraaf apart wordt behandeld. Daarnaast geven we nog enkele voorbeelden van recente ontwikkelingen.

5.3.1 Hydro-economische modellen

Het idee achter hydro-economische modellen is dat economische en hydrologische principes worden gecombineerd voor het oplossen van vraagstukken rondom waterbeschikbaarheid en -verdeling (Harou et al. 2009). De modellen combineren hydrologische, technische economische en milieuaspecten binnen één samenhangend kader. Een belangrijk kenmerk, en een van de belangrijkste verschillen met traditionele waterverdelingsmodellen, is dat de watervraag van sectoren en gebruikers niet vaststaat, maar wordt gestuurd door economische waarde of soortgelijke concepten. Optimalisatie is een belangrijk aspect om de uiteindelijke waterverdeling vast te stellen. Daarbinnen kunnen verschillende smaken worden onderscheiden, bijvoorbeeld het al dan niet betrekken van een stochastische component in voorspellingen van waterverdeling in de tijd. Daarnaast kunnen hydro-economische modellen een bredere of toegespitstere insteek hebben. Daarbij moet worden aangetekend dat vanwege de complexiteit waterkwaliteit vaak geen onderdeel is van het waterverdelingsmodel zelf. Hetzelfde geldt voor agronomische of ecologische aspecten.

Een belangrijk punt van kritiek op hydro-economische modellen is de (te) sterke focus op economische aspecten en kostenreductie in de optimalisatie van waterverdeling (het eerste concept in Candido et al. 2022). Echter, de modellen hoeven niet per se (uitsluitend) economisch van aard te zijn. Sociale, politiek en milieuaspecten kunnen ook worden gebruikt in het optimalisatieproces.

5.3.2 GONDWANA

KWR heeft een softwareplatform voor optimalisatie ontwikkeld dat specifiek gericht is op drinkwaterdistributiesystemen: Gondwana (Van Thienen & Vertommen, 2015). Dit platform kenmerkt zich door een gebruiksvriendelijke interface die geschikt is voor het definiëren van distributie gerelateerde optimalisatieproblemen met zeer veel flexibiliteit. Hiermee ontsluit Gondwana krachtige en vaak complexe optimalisatietechnieken voor de hydraulische experts, en daarmee voor de hele drinkwatersector.

In de probleemdefinitie maakt Gondwana ten eerste gebruik van de modelstructuur van hydraulisch softwarepakket EPANET (Rossman, 2000) voor de representatie van het te ontwerpen systeem, en het gebruikt EPANET ook om het systeemgedrag van ontwerpen te kwantificeren met behulp van hydraulische berekeningen. Via de interface kunnen vervolgens de eigenschappen van om het even welke systeemcomponenten worden aangemerkt als beslisvariabele tijdens de optimalisatie. Ten slotte kunnen via de interface ook formulematige doelen en randvoorwaarden flexibel worden gedefinieerd op basis van om het even welke eigenschappen van systeemcomponenten en/of op basis van om het even welke aspecten van het berekende systeemgedrag.

Gondwana werkt volgens het iteratieve proces van een genetisch algoritme (Goldberg, 1989). Het brengt (eventueel gestuurd) willekeurige wijzigingen aan in het ontwerp of in de operatie van een netwerkmodel, bepaalt vervolgens de prestatie van een aantal gewijzigde ontwerpen volgens één of meerdere doelstellingen, en neemt de tot dan toe best presterende ontwerpen als basis voor de volgende iteratie van wijzigingen. Op die manier wordt stapsgewijs naar een optimaal presterend ontwerp toegewerkt.

5.3.3 Pywr

Recentelijk is in Python het package Pywr ontwikkeld en beschikbaar gekomen, waarmee waterverdelingsvraagstukken kunnen worden geoptimaliseerd op basis de waterverbruiksprioriteiten van de gebruikers (Tomlinson et al., 2020). Een model in Pywr wordt opgezet op basis van een structuur van knopen en takken, waarna de gebruiker met een minimale tijdstap van 1 dag scenario's kan doorrekenen. Naast het simuleren van verschillende scenario's, biedt Pywr ook de mogelijkheid om optimalisatiestudies uit te voeren op basis van meerdere criteria. Een verschil met andere DSS- en optimalisatiemodellen is dat Pywr geen kant-en-klare applicatie

is, maar een Python-bibliotheek, die men kan toepassen binnen een andere gebruiksomgeving of software. Daarnaast is het ontworpen om snel genoeg te zijn voor Verkennend Modelleren (Exploratory Modelling), een van de stappen binnen besluitvorming onder diepe onzekerheid (Marchau et al., 2019; Tomlinson et al., 2020). De modelstructuur van Pywr is zeer geschikt om de operationele aspecten van watersystemen te optimaliseren, maar is minder geschikt om beslissingen te nemen over de aanleg van nieuwe infrastructuur.

5.4 Synthese

In dit hoofdstuk hebben we beknopt de belangrijkste concepten achter bestaande DSS-modellen behandeld, inclusief een aantal voorbeelden. Veel van de modellen zijn gericht op waterverdeling (kwantiteit). Waterkwaliteit komt in veel modellen niet of slechts beperkt aan de orde. Tevens stellen we vast dat de meeste traditionele simulatiesoftware (paragraaf 5.1) geen of slechts beperkte mogelijkheden voor optimalisatie bevat. Omdat deze pakketten niet vrij aan te passen zijn, is het moeilijk om deze bestaande pakketten met een bestaande optimalisatiemodule te koppelen zonder de simulatiemodellen van de grond af op te bouwen. Het kan wel interessant zijn om de aanpak van deze simulatiemodellen over te nemen omdat ze zijn opgezet voor het beschrijven van systemen op een vrij grote schaal (regionaal/nationaal) die goed bij de gedachte achter WMM past. Wel kan het dan waardevol zijn om aandacht te besteden aan het aggregeren van het detailniveau met oog op het behapbaar houden van de optimalisatie.

Optimalisatiepakketten zoals hydro-economische modellen komen qua ingebouwde optimalisatiecapaciteiten meer overeen met de vereisten van WMM. Het nadeel van veel hydro-economische modellen is echter dat ze sterk gericht zijn op economie en kostenreductie, waarbij het risico bestaat dat andere, niet-financiële aspecten onvoldoende een rol spelen. Een vereiste van de WMM is dat echter deze andere aspecten voldoende worden afgewogen om tot een optimalisatie te komen. De expliciete aandacht voor flexibele definitie van doelstellingen en randvoorwaarden in Gondwana sluiten dan nog beter aan, hoewel de inherente focus van dat pakket op slechts de hydraulische waterinfrastructuur het pakket niet toereikend maakt voor de waterverdelingsvraagstukken die we met WMM willen oppakken. Op dat vlak sluit het voor waterverdeling ontworpen Pywr goed aan. Pywr's vorm van een Python module leent zich bovendien goed voor verdere toespitsing. Een van de belangrijkste zaken om toe te voegen is de mogelijkheid om optimalisatie toe te passen op keuzes voor nieuw toe te voegen routes voor waterverdeling, in plaats van enkel op de operatie van de bestaande routes.

Concluderend zien we veel van de gewenste deelaspecten (de vier kernfunctionaliteiten genoemd in de inleiding) terug in de verschillende bestaande pakketten die er zijn om te rekenen aan de waterverdeling. Geen van de pakketten zit echter dicht genoeg in de buurt als geheel. De simulatiepakketten die het dichtst in de buurt zitten (zoals met name WEAP) zijn niet open genoeg om bredere doelstellingen en uitgebreidere optimalisatiefunctie toe te voegen. Het heeft daarmee zin om WMM als toegespitst pakket op te zetten, geïnspireerd door de bovengenoemde aanpakken.

6 Opzet van het WMM raamwerk

Zoals beschreven in de uitkomst van de literatuurstudie zijn er meerdere modellen en softwarepakketten beschikbaar die geschikt zijn voor het modelleren van specifieke aspecten van watersystemen. In de kern is het WMM-probleem een plannings- en uitbreidingsvraagstuk waarbij de benodigde infrastructuur gekozen moet worden voor een set aan criteria waar het watersysteem aan moet voldoen. De bestaande modellen in de literatuur zijn dusdanig specifiek dat ze niet geschikt zijn om gebruikt te worden voor het WMM-probleem. Zo zijn modellen voor operationele optimalisatie op basis van een prioriteiten systeem moeilijk te gebruiken voor het plannen van nieuwe infrastructuur, en sluit het detailniveau van infrastructuur-optimalisatie, zoals GONDWANA (hydraulica), niet aan op de schaal waar WMM voor gebruikt zal worden. Voor WMM is een flexibele modelopzet nodig die gebruikt kan worden om de vele mogelijke configuraties voor de infrastructuur van een watersysteem te representeren. Deze opzet heeft als doel om systeemconfiguraties te verkennen binnen gegeven, door beleidsmakers vastgestelde, randvoorwaardes (waterbeschikbaarheid, watervraag, mogelijke bouwlocaties, etc.). WMM is vooralsnog dus niet bedoeld om de lokale watervraag of beschikbaarheid te bepalen of de effecten van een onttrekking of lozing op een gebied te berekenen. WMM is wel dusdanig flexibel opgezet dat het de uitkomsten van modellen welke hier wel voor bedoeld zijn kan gebruiken als invoer. Dankzij deze flexibiliteit kan WMM-gebruik maken van steeds doorontwikkelde versies van externe modellen en uitgangspunten⁹. In dit hoofdstuk worden de algehele structuur, de individuele modelcomponenten, de manier waarop deze individuele componenten aan elkaar gekoppeld dienen te worden, en de mogelijke aanpak voor daadwerkelijke optimalisatie voor WMM besproken. Eerst beschrijven we de basiselementen en modelstructuur. Vervolgens beschrijven we hoe verschillende systeemcomponenten opgebouwd kunnen worden uit de basiselementen. Daarna passen we deze toe op een hypothetische demo die doorlopen is met collega's uit de sector.

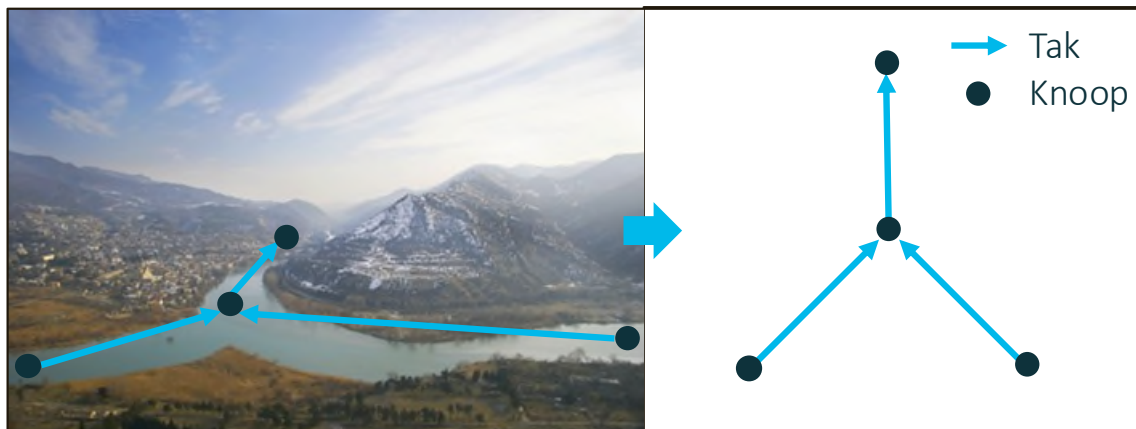
6.1 Basiselementen en overkoepelende modelstructuur

De meeste waterverdelingsmodellen en simulatiesoftware maken gebruik van grafen en waterbalansen om watersystemen te representeren en het gedrag van het systeem door te rekenen of te optimaliseren. Een graaf is een collectie van elementen (knopen of punten) die verbonden zijn via takken. Op elk van de knopen of takken kunnen berekeningen gedaan worden die afhankelijk zijn van of invloed hebben op de andere elementen in het systeem. Waterbalansen, de boekhouding van inkomende en uitgaande stromen, worden gebruikt om ervoor te zorgen dat fysiek onmogelijke uitkomsten voorkomen worden. Vanwege de eigenschappen van het WMM-probleem schatten we in dat deze overkoepelende modelstructuur, op basis van gerichte grafen, het meest geschikt is.

Een voorbeeld van een graaf om een riviersysteem te representeren is weergegeven in Figuur 5. De uiteindelijke hoeveelheid water, sediment, thermische energie of vervuiling over de bovenste tak van de rivier is de optelsom van de inkomende stromen bij de knoop. Deze optelsom, de massabalans op de knoop, is essentieel voor het doorrekenen van dit type netwerken. Wanneer stromen bij elkaar komen is de resulterende volumestroom aan water en massa aan andere stoffen op de uitgaande tak de optelsom van de inkomende stromen. De massabalans

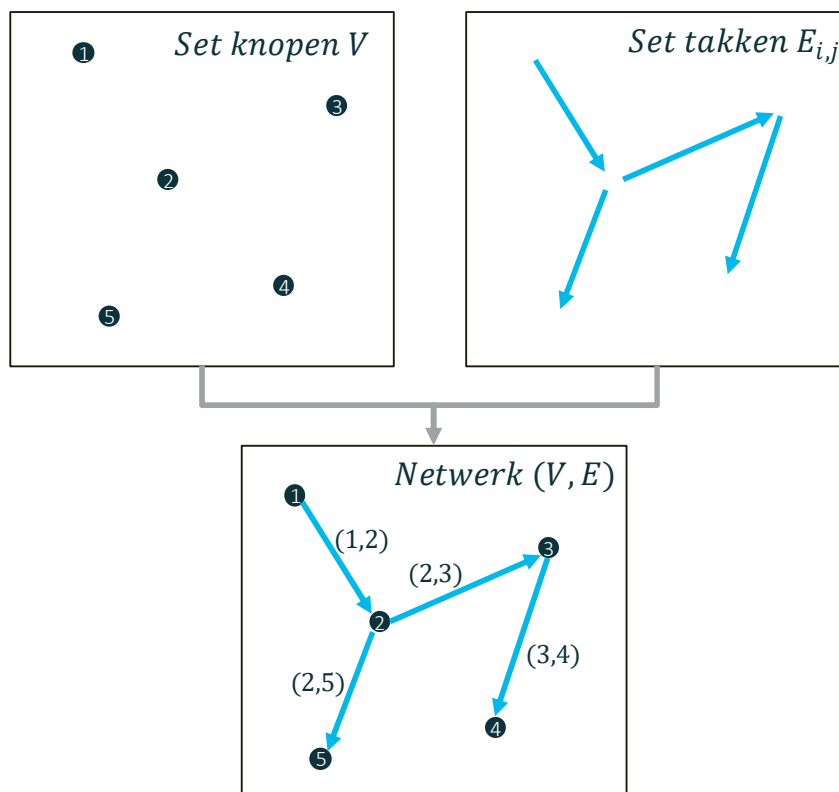
⁹ Bijvoorbeeld: in de demo in dit rapport gaan we uit van een specifieke, statische bovengrens aan waterbeschikbaarheid per bron. In werkelijkheid kunnen complexe hydrologische interacties ervoor zorgen dat de waterbeschikbaarheid op de ene locatie wordt beïnvloed door onttrekking op de andere locatie. Op het moment van schrijven zijn er nog geen (handzame) modellen die het mogelijk maken om deze interacties snel en correct af te schatten. In de toekomst, wanneer dergelijke eerste orde watersysteemmodellen verder zijn ontwikkeld, kan WMM deze gebruiken om recht te doen aan dit soort interacties tussen bronnen.

voor chemische en microbiologische parameters kan zich anders gedragen als gevolg van reacties gedurende de verblijftijd over de takken. Op een knoop kan een stroom ook gesplitst worden. In dat geval kan er op de knoop gekozen worden welke hoeveelheid er over elk van de uitgaande takken stroomt, zolang de optelsom gelijk is aan de totale inkomende hoeveelheid.



Figuur 5. Basisrepresentatie van de knoppen en takken van een graaf (links) en hun gebruik om de stroming van een watersysteem (rivier) te representeren (rechts).

De wiskundige manier om een graaf te representeren is door twee verzamelingen te definiëren: de verzameling met knopen V en de verzameling takken E die de verbindingen vormen tussen de knopen. Aan elke knoop $j \in V$ in de verzameling knopen kunnen verschillende eigenschappen worden toegewezen. In het geval van een waternetwerk kan er bijvoorbeeld de hoeveelheid water beschikbaar op de knoop toegewezen worden. Elke tak $(i, j) \in E$ tussen de knopen kan ook verschillende eigenschappen toegewezen krijgen, zoals de kosten voor het gebruik van de tak, of de maximale transportcapaciteit over de tak. De knopen en takken kunnen gekoppeld worden aan specifieke locaties of coördinaten om weergegeven te worden op een kaart (Figuur 6).



Figuur 6. Voorbeeld van een netwerk opgebouwd uit een verzameling knopen V en takken E

Wanneer de invoer (de knopen en takken, en hun eigenschappen) gedefinieerd is, wordt het mogelijk om verschillende optimalisatiemethodes toe te passen (berekeningen) om beste configuratie (uitvoer) te identificeren (zie Figuur 7). Voor optimalisaties met grafen worden over het algemeen deelverzamelingen gedefinieerd. De verzameling knopen V kan bijvoorbeeld verdeeld worden in de deelverzamelingen waterbronnen V^B en watergebruikers V^G . De verzameling takken kan ook onderverdeeld worden om onderscheid te maken tussen verschillende vormen van transport; bijvoorbeeld E^P voor pijpleidingen en E^K voor kanalen. Het gebruik van deelverzamelingen maakt het mogelijk om een flexibel en schaalbaar rekenmodel te maken dat om kan gaan met de verschillende benodigheden voor het doorrekenen van een waternetwerk.



Figuur 7. Schematische weergave van de WMM stappen op basis van invoer, berekeningen en uitvoer.

*De betekenis van optimaal is breed gedefinieerd en is flexibel binnen WMM

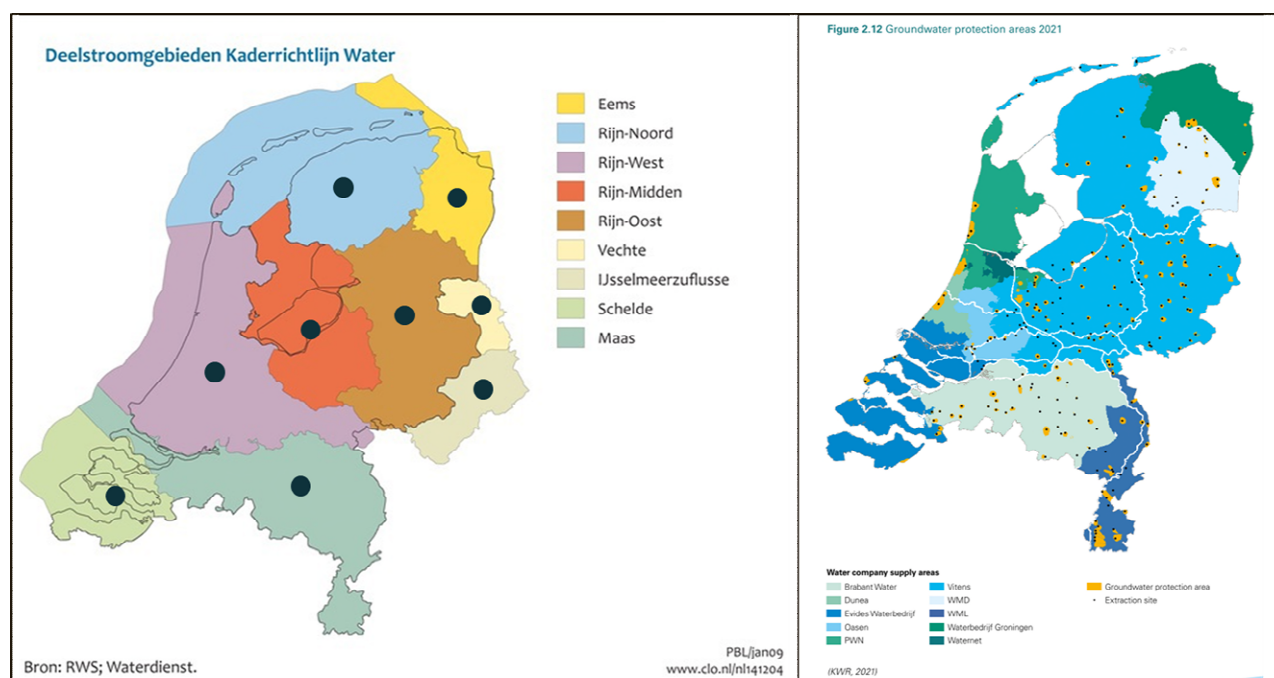
6.1.1 Knopen

Binnen het WMM-probleem identificeren we minstens drie deelverzamelingen binnen de knopen: invoerknopen V^I , uitvoerknopen V^U en knooppunten V^K . De invoerknopen V^I en uitvoerknopen V^U in WMM vertegenwoordigen de systeemgrenzen waar water het gemodelleerde watersysteem binnenkomt respectievelijk verlaat. Over het algemeen vertegenwoordigen deze knopen de traditionele waterbronnen (grondwater, oppervlaktewater) en gebruikers (steden, industrie), maar zij kunnen ook alternatieve bronnen als regenwater of restwater vertegenwoordigen. Invoerknopen hebben een netto waterbeschikbaarheid, uitvoerknopen een netto watervraag. De systeemgrenzen die door deze knopen worden beschreven zijn niet per definitie geografisch van aard. Bijvoorbeeld, het water dat een bierfabriek nodig heeft om te opereren valt binnen de modelgrenzen terwijl het water dat de fabriek verlaat in de vorm van het product (bier) naar individuele klanten erbuiten valt. In een dergelijk geval wordt de waterbalans bijgehouden tot aan het totale waterverbruik van de fabriek. De knooppunten V^K zijn alle andere locaties in het modelsysteem waar water samenkomt of verdeeld wordt en hebben een gesloten waterbalans.

Wanneer we op een integrale manier naar het watersysteem kijken, dan is het moeilijk om onderscheid te maken tussen waterbronnen en watergebruikers. Dit werd meermaals geconstateerd tijdens de interne workshop. Een natuurgebied kan aan de ene kant beschouwd worden als een waterbron wanneer het dient als een gebied waar

regenwater het grondwater aanvult dat daarna weer gebruikt wordt door mensen. Tegelijkertijd heeft de vegetatie in hetzelfde gebied een bepaalde watervraag waaraan moet worden voldaan om vegetatietypen in stand te houden. Gezien de ruimtelijke overlap tussen deze watervraag en wateraanbod is het nettoverschil tussen de lokale vraag en het lokale aanbod datgene wat bepaalt of water geleverd kan worden bij een invoerknoop voor gebruik in de rest van het watersysteem. Uiteindelijk is de waterbeschikbaarheid per locatie een menselijke afweging en keuze, aangezien er verkozen kan worden om meer water te onttrekken dan optimaal is voor de instandhouding van het lokale systeem. Op een vergelijkbare manier kan er een maximum gesteld worden aan de hoeveelheid water die teruggebracht wordt in het natuurlijke systeem. Binnen WMM zijn aspecten als waterbeschikbaarheid en watervraag gezien invoerdata, ze worden niet door WMM zelf berekend. Gezien het feit dat neerslag en watervraag kunnen fluctueren met de tijd, kan het voorkomen dat dezelfde locatie voor een deel van het jaar kan dienen als invoer en het andere deel als uitvoer. Naast de volumetrische invoercapaciteit of uitvoercapaciteit kan er ook een bepaalde waterkwaliteit aan de invoer of uitvoer aan deze knopen gekoppeld worden.

De invoerknopen en uitvoerknopen kunnen gebruikt worden op verschillende aggregatieniveaus. Een invoerknoop die een waterbron vertegenwoordigt kan gezien worden als een vooraf vastgestelde hoeveelheid water beschikbaar op de plek van een enkele winlocatie of op de schaal van een stroomgebied (Figuur 8). Op een vergelijkbare manier kan een uitvoerknoop de watervraag van watergebruikers vertegenwoordigen: een enkel huishouden, een wijk of een stad.



Figuur 8. Representatie van waterbronnen aan de hand van knopen op verschillende schaalniveaus.

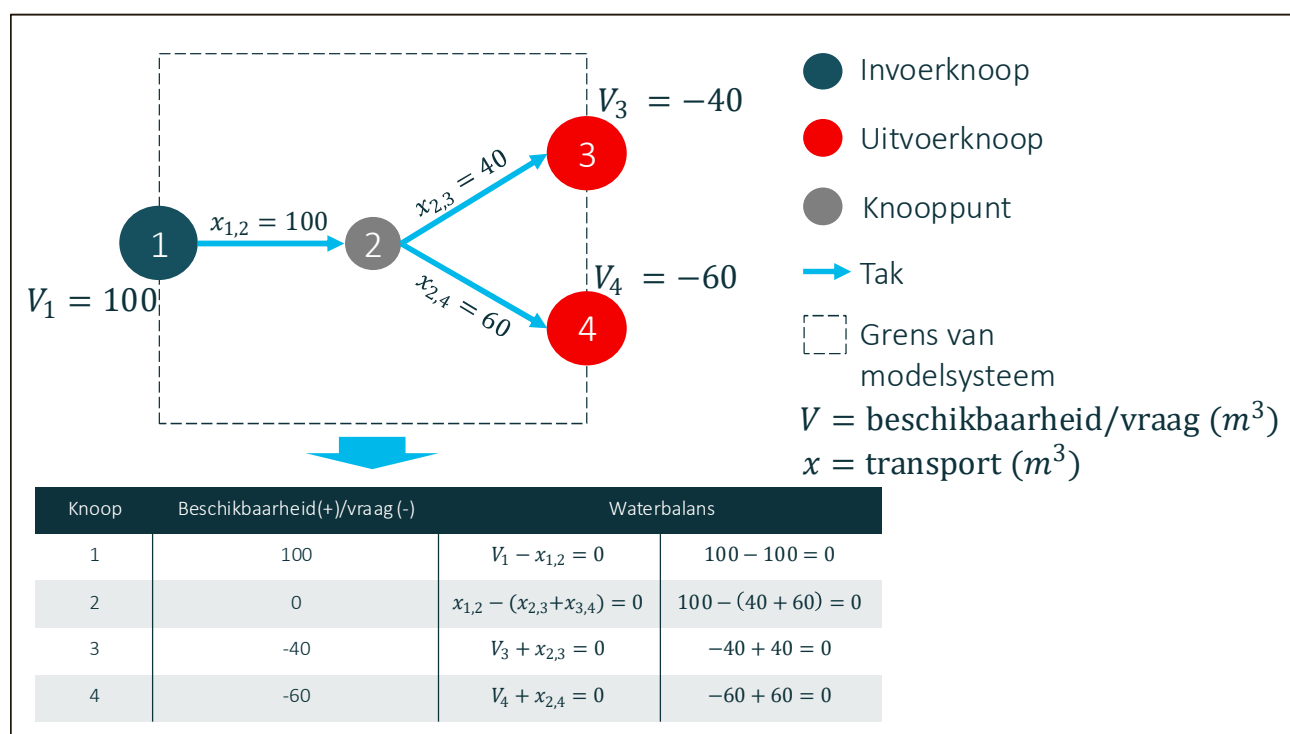
Interne knooppunten V^K zijn alle locaties in het netwerk zonder een netto watervraag of aanbod. Een knooppunt wordt op dezelfde manier weergegeven als een bron of een gebruiker, met het verschil dat interne knopen altijd minstens één inkomende en één uitgaande tak hebben. De waterbalans moet op elke knoop gehandhaafd worden, waarbij wel een verhouding tussen de inkomende en uitgaande stroom toegewezen kan worden om waterverliezen (verdamping, zuiveringsverliezen, etc.) op de knoop te representeren. Interne knopen vallen altijd binnen de grenzen van het modelsysteem en hebben geen directe interacties daarbuiten.

6.1.2 Takken

De takken binnen het WMM-model vertegenwoordigen alle mogelijke verplaatsingen van water tussen de knopen van het systeem. Takken worden beschreven met een startknoop en een eindknoop. De verplaatsing van water over een tak kan gelimiteerd zijn tot een maximum- of een minimumhoeveelheid. Indien bestaande infrastructuur gebruikt wordt, dan geldt over het algemeen een maximumcapaciteit voor watertransport. Een bestaand kanaal heeft een minimaal en een maximaal waterpeil, en een bestaande pijpleiding een maximale operationele stroomsnelheid. Voor het WMM-probleem is het ook van belang om rekening te houden met de mogelijke stromingsrichting. Door een pijpleiding kan water in beide richtingen getransporteerd worden, bij een kanaal wordt de stromingsrichting (zonder de mogelijkheid tot peilbeheer) bepaald door het natuurlijk verval.

6.1.3 Waterbalans

De onderliggende 'drijfveer' voor watertransport tussen bronnen en gebruikers is een waterbalans die berekend wordt op elke individuele knoop. De optelsom van deze individuele balansen zorgt voor een waterbalans op systeemniveau. De waterbeschikbaarheid bij de invoerknopen (bronnen) wordt een positieve waarde toegekend en de watervraag bij de uitvoerknopen (gebruikers) een negatieve waarde. De opgelegde waterbalans kan vervolgens alleen via transport over de takken voldaan worden, waarbij een inkomende stroom een positieve waarde heeft en een uitgaande een negatieve. Een (triviaal) voorbeeld hiervan is weergegeven in Figuur 9: de totale waterbeschikbaarheid is 100 m^3 , de totale watervraag 100 m^3 . Om ervoor te zorgen dat de waterbalans bij de uitvoerknopen op nul uitkomt is de enige optie om 100 m^3 , 40 m^3 , en 60 m^3 over de drie mogelijk takken te transporteren. Hiermee komen de waterbalans op de invoerknoop en het knooppunt ook op nul uit. Deze basis kan vervolgens uitgebreid worden voor transport van water met verschillende kwaliteiten en opslag van water op bepaalde knopen.

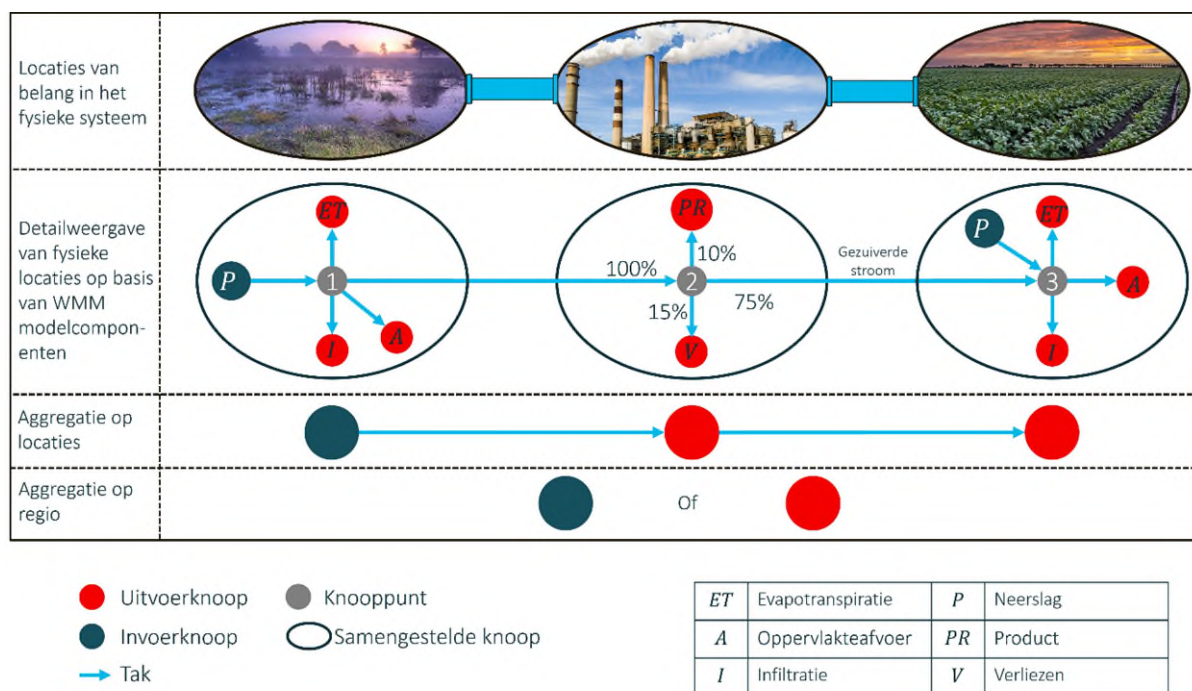


Figuur 9. Transport op basis van waterbalans op individuele knopen

6.2 Systeemcomponenten uit basiselementen

Door het toepassen van knopen en takken in verschillende combinaties en op verschillende schalen kunnen de relevante processen voor waterverdeling gesimuleerd en geoptimaliseerd worden. De meest voor de hand liggende vergelijking is die met een pijpleiding of een rivier zoals in Figuur 5. In deze paragraaf worden een aantal voorbeelden gegeven van de manier waarop knopen en takken op verschillende schalen gebruikt kunnen worden. Hiervoor introduceren we het concept van een samengestelde knoop: een verzameling van knopen en takken die samen het gedrag van een bepaald proces in het watersysteem vertegenwoordigen. Samengestelde knopen vertegenwoordigen over het algemeen een specifieke locatie in een gebied, zoals een natuurgebied, zuivering, opslag, of gebruiker. De takken en knopen binnen een samengestelde knoop kunnen toegewezen worden aan deelverzamelingen van V of E om overkoepelende randvoorwaarden aan het systeem op te leggen.

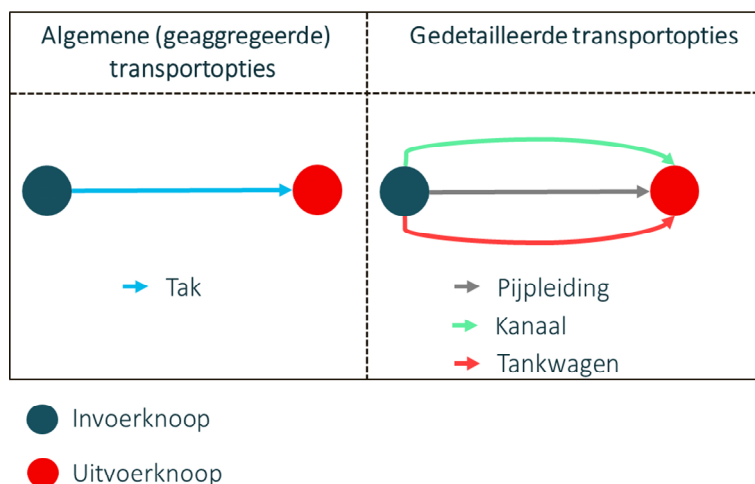
In Figuur 10 wordt een voorbeeld gegeven van een hypothetisch systeem met drie fysieke locaties; een natuurgebied (waterbron), een industriegebied (gebruiker), en een landbouwgebied (gebruiker). Deze locaties kunnen in detail weergegeven worden in de vorm van samengestelde knopen met de individuele modelcomponenten die voor WMM gedefinieerd zijn. De eerste samengestelde knoop vertegenwoordigt een natuurgebied, waar het beschikbare water uitsluitend uit neerslag (invoerknop) komt. Binnen het natuurgebied zelf verdwijnt een deel van deze neerslag uit het gemodelleerde systeem in de vorm van verdamping, oppervlakteafvoer of infiltratie naar het grondwater. Deze drie opties worden elk aangeduid met een uitvoerknoop die verbonden is met een knooppunt om deze splitsing te maken. De uiteindelijke waterbalans binnen deze samengestelde knoop is een overschot dat beschikbaar is voor de andere gebruikers en kan bepaald worden door waardes (modelmatig/beleidsmatig) toe te kennen aan elk element binnen de samengestelde knoop. Vanuit het natuurgebied wordt water getransporteerd naar de eerste gebruiker, een fabriek. Bij deze gebruiker verlaat tien procent van het inkomende water het gemodelleerde systeem in het geproduceerde product, vijftien procent verdwijnt vanwege verliezen tijdens het productieproces, en de rest (75%) kan gezuiverd worden voor hergebruik door de landbouw. Deze verdeling (10%, 15%, 75%) hangt af van het specifieke productieproces bij deze gebruiker. Het bijhouden van de waterbalans wordt mogelijk gemaakt door een knooppunt toe te voegen binnen de samengestelde knoop. Na zuivering wordt water over een tak getransporteerd naar het landbouwgebied, de tweede gebruiker. Het landbouwgebied is ook een samengestelde knoop waar het inkomende water van de industrie en neerslag het modelsysteem verlaat op drie manieren; verdamping, oppervlakteafvoer en infiltratie. De verdeling tussen deze drie stromen staat in dit voorbeeld niet vast, maar moet opgeteld de complete gezuiverde stroom zijn. Afhankelijk van het detailniveau waarop de gebruiker het systeem wil modelleren/optimaliseren, kan er gekozen worden om de processen/waterstromen binnen de samengestelde knopen te aggregeren tot een enkele invoer- of uitvoerknoop of een enkele knoop op regionale schaal. Afhankelijk van de situatie kan het detailniveau aangepast worden. Zo zou er in het landbouwgebied onderscheid gemaakt kunnen worden voor afvoer naar oppervlaktewater via drainage of via infiltratie.



Figuur 10. Voorbeeld van samengestelde knopen om verschillende situaties in een modelsysteem weer te geven.

6.2.1 Transport

Transport van water tussen twee knopen kan op meerdere manieren gebeuren. Transport van water kan bijvoorbeeld met een pijpleiding, een kanaal, met een tankwagen, etc. Deze situaties kunnen flexibel gemodelleerd worden door knopen met meerdere parallelle takken te verbinden, waarbij de takken voor de verschillende transportopties toegewezen kunnen worden aan deelverzamelingen. Door verschillende takken voor elk van de transportopties toe te voegen aan het model, is het mogelijk om de prestatie van het hele systeem te beoordelen op basis van de hoeveelheid water die uiteindelijk door elke transportoptie getransporteerd wordt (Figuur 11). Net als bij de knopen kan er gekozen worden voor verschillende detailniveaus.



Figuur 11. Voorbeelden van meerdere transportopties tussen knopen

6.2.2 Waterkwaliteiten en zuivering

Vanwege de vele soorten en typen zuivering van een breed scala aan stoffen wordt de zuiveringsvraag in deze versie van WMM versimpeld om de optimalisatie van zuivering, opslag, en transport tegelijkertijd mogelijk te maken. Binnen WMM werken we daarom met waterkwaliteitsklassen (zie Bijlage II) in plaats van massabalansen omdat dit beter aansluit bij de werkelijkheid. We kiezen niet voor massabalansen omdat deze complex en

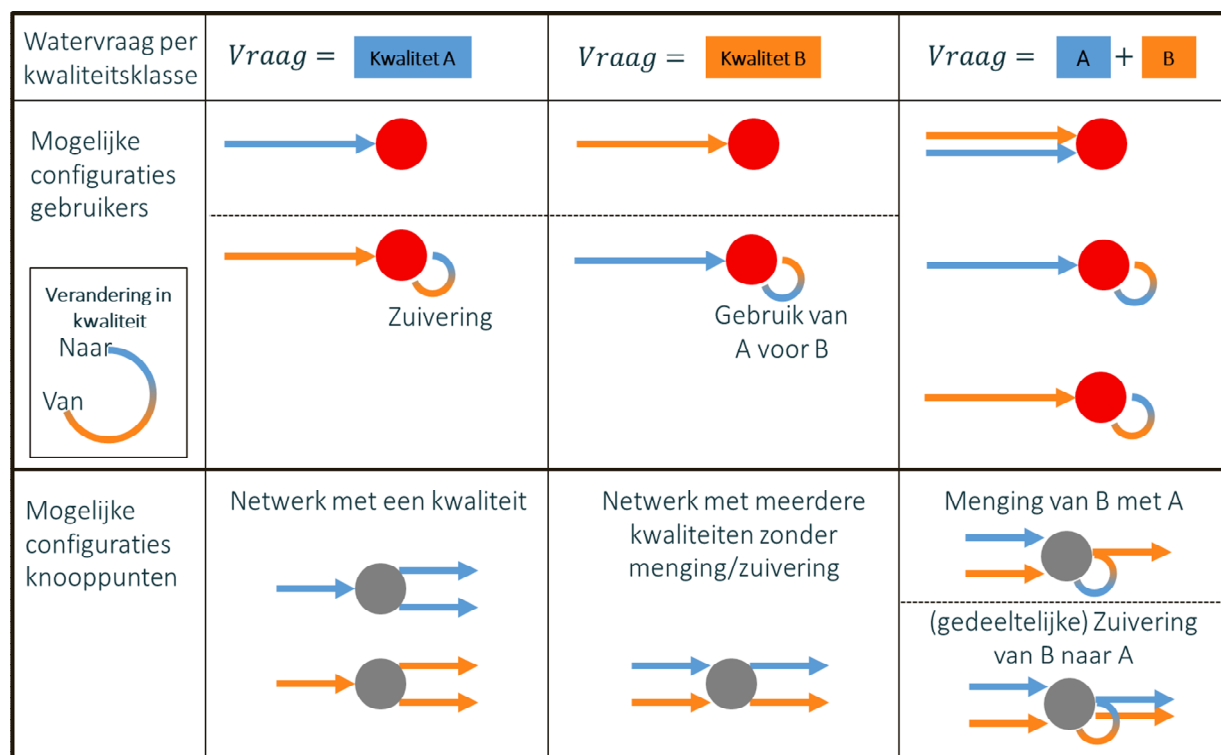
analytisch uitdagend zijn, vooral wanneer we combinaties van conventionele en alternatieve waterbronnen beschouwen. Bovendien zou de enorme hoeveelheid benodigde gegevens zware rekencapaciteiten vergen. WMM is dusdanig opgezet dat het een eerste inschatting maakt over de benodigde zuivering op systeemniveau, engineering op detailniveau volgt hier vervolgens uit. We kiezen ervoor om de behandeling niet volledig te ontwerpen, omdat we ons ervan bewust zijn dat bij het ontwerpen van zuivering andere factoren een rol spelen (zoals locatie, beschikbaarheid van energie, materialen, kennis van bouw, exploitatie en onderhoud) die buiten de scope vallen van een project over zoetwaterverdeling en watertransport.

In het huidige (drink)watersysteem wordt over het algemeen één kwaliteit per transportoptie getransporteerd: een pijpleiding wordt niet de ene dag voor ruw water en de volgende dag voor drinkwater gebruikt. Dit is de uitgangspositie voor het opzetten van de WMM-optimalisatie. Daarnaast kan zuivering nodig zijn om aan de kwaliteitseisen van de gebruikers te voldoen. De watervraag naar een enkele waterkwaliteit kan voldaan worden door water van de juiste kwaliteit te transporteren, of water van een andere kwaliteit te transporteren en deze op locatie om te zetten of te zuiveren tot de gewenste kwaliteit, of ergens tussen de bron en de gebruiker in. Wanneer er op een locatie vraag is naar meerdere kwaliteiten (bijvoorbeeld drinkwater en proceswater op een industrieterrein) dan bestaan de volgende opties:

1. transport van drinkwater en gebruik van drinkwater als proceswater;
2. transport van water met proceswater kwaliteit in combinatie met (gedeeltelijke) zuivering tot drinkwater op locatie;
3. gescheiden transport van drinkwater en proceswater via verschillende transportopties.

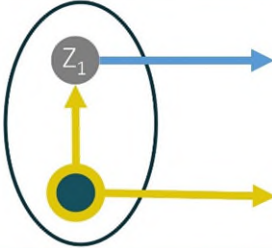
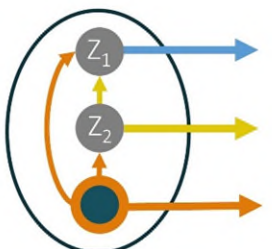
Deze opties zijn schematisch weergegeven in Figuur 12 (boven). Een vergelijkbare situatie treedt op bij de bronnen: water kan direct getransporteerd worden met de beschikbare kwaliteit, of water kan eerst (deels) gezuiverd worden.

In een netwerk met een enkele kwaliteit kan water bij de knooppunten verdeeld worden of samenkomen. In een netwerk met meerdere kwaliteiten kan water bij knooppunten verdeeld worden met of zonder menging of zuivering. Bij menging van kwaliteiten hanteren we het principe dat de uitgaande stroom de kwaliteitsklasse krijgt van de inkomende stroom met de laagste kwaliteit. Op een knooppunt kan ook een deel van de inkomende kwaliteiten gezuiverd worden. Deze situaties worden weergegeven in Figuur 12 (onder). Een mogelijke consequentie van het gebruik van een hoge waterkwaliteit voor een laagwaardig doel is dat de resulterende reststroom een onverwachtse (hogere) kwaliteit heeft. Dit kan ondervangen worden met definities van de componenten.

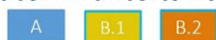


Figuur 12. Schematische weergave van waterkwaliteiten op gebruikersniveau binnen WMM

Op basis van bovenstaande regels kan het zuiveringsproces zelf ook weergegeven worden aan de hand van waterbalansen over knopen (zie Figuur 13). Hiervoor worden zuiveringsknopen gebruikt. Zuiveringsknopen hebben de unieke mogelijkheid om de waterkwaliteit om te zetten: het inkomende water (kwaliteit B) heeft een andere kwaliteit dan het uitgaande water (kwaliteit A) $\rightarrow (Volume_{B,in} = Volume_{A,uit})$. Het achterliggende principe achter deze modelmatige vorm van zuivering op basis van waterkwaliteitsklassen is dat waterbalansen op de knopen gehandhaafd kunnen worden, terwijl de waterkwaliteit omgezet kan worden. De zuiveringsprocessen binnen de samengestelde knopen worden voor de eindgebruiker over het algemeen geaggregeerd tot een enkele knoop die meerdere waterkwaliteiten kan leveren of ontvangen. Voor alle andere knopen in het systeem geldt dat de inkomende kwaliteit gelijk moet zijn aan de uitgaande kwaliteit.

Invoerknoop met beschikbare waterkwaliteit A waar geen zuivering nodig is om waterkwaliteit A te leveren aan de rest van het systeem.		
Samengestelde knoop met beschikbare waterkwaliteit B.1 met de mogelijkheid voor lokale zuivering naar kwaliteit A. Modelmatig gebeurt de omzetting van kwaliteit B.1 naar A op de bovenste knoop (Z) waar de kwaliteit van de uitgaande stroom afwijkt van de inkomende stroom. Deze samengestelde knoop kan desgewenst kwaliteit A of B.1 aan de rest van het systeem leveren.		Waterbalans Z ₁ : 
Samengestelde knoop met beschikbare waterkwaliteit B.2 met de mogelijkheid voor lokale zuivering naar kwaliteit A of B.1. De omzetting naar A kan in één stap gebeuren, of in twee stappen via B.1. Deze samengestelde knoop kan desgewenst kwaliteit A, B.1, of B.2 aan de rest van het systeem leveren.		Waterbalans Z ₁ :  Waterbalans Z ₂ : 
Geaggregeerde versie van een invoerknoop met kwaliteitsklasse B.2 waarbij de interne processen voor de gebruiker verborgen blijven.		

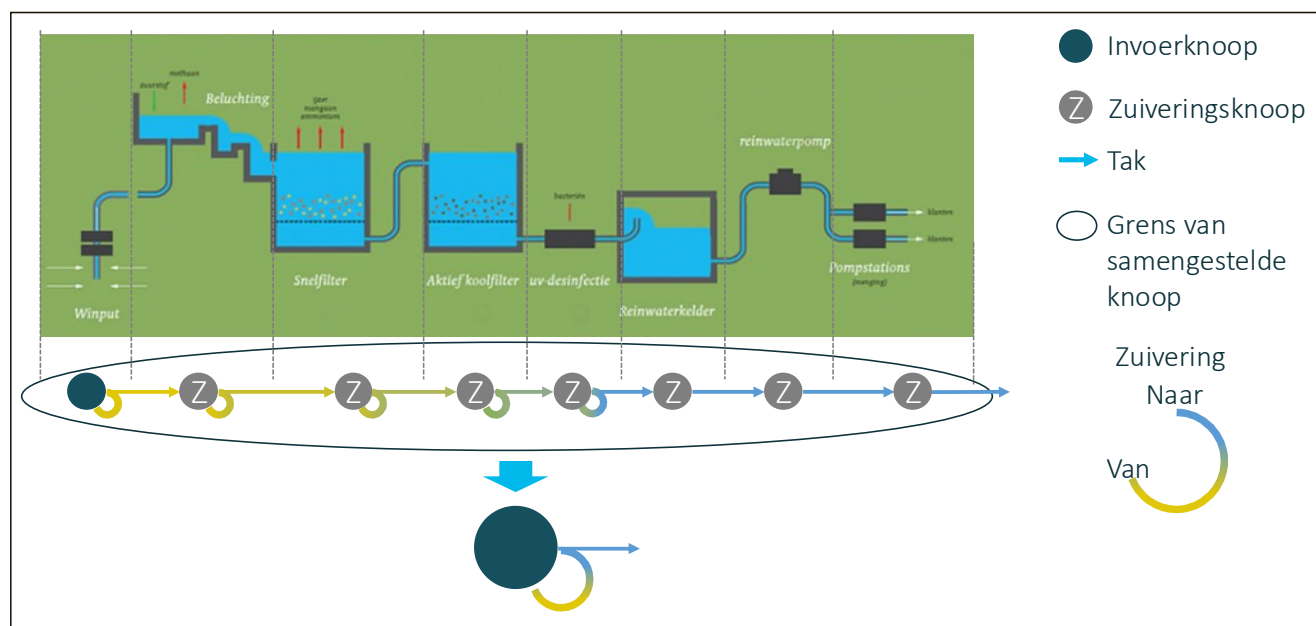
Waterkwaliteitsklasse



Z Zuiveringsknoop

Figuur 13. Zuivering op basis van knopen en takken met aangepaste waterbalansen op knopen waar zuivering kan plaatsvinden

Figuur 14 is een voorbeeld van een samengestelde knoop voor een win- en zuiveringslocatie waarin alle individuele stappen van de winput tot en met het pompstation worden weergegeven in de vorm van knopen en takken. Over het algemeen zal de verandering van kwaliteit gemodelleerd worden aan de hand van een samengestelde knoop in plaats van afzonderlijke knopen voor elke individuele processtap.



Figuur 14. Samengestelde knoop voor winlocatie X

De keuze voor een bepaalde zuiveringstechnologie zal afhangen van verschillende factoren zoals inkomende en uitgaande waterkwaliteit (aan de bron en te verkrijgen na behandeling), locatie, energiebehoefte, infrastructuur- en onderhoudskosten, CO₂-voetafdruk, enz. Elke factor die in overweging wordt genomen, zal variëren met de capaciteit van de zuiveringsinstallatie, wat resulteert in een (parameter-)functie die de werking van de zuivering beschrijft.

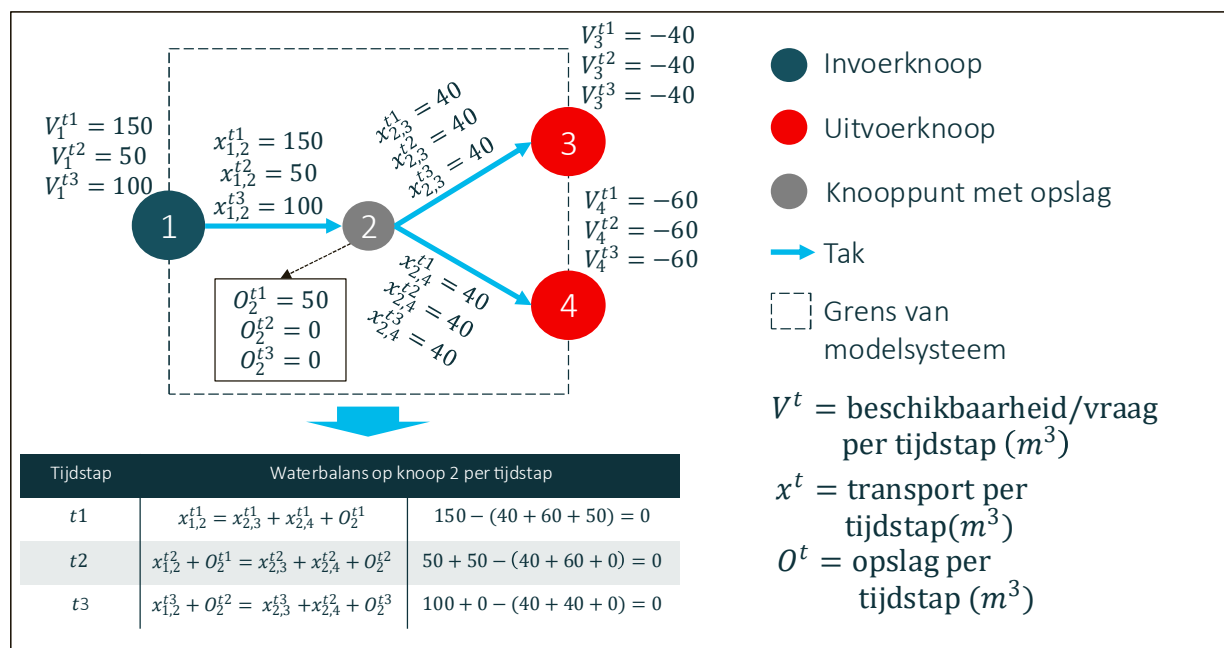
Water kan ook worden behandeld via natuurlijke processen zoals bodemfiltratie, verdamping en condensatie of verdunning. Daarom kan de mismatch in kwaliteit tussen een waterbron en een watergebruiker worden overbrugd door natuurlijke zuiveringsprocessen. Waterbehandeling wordt geassocieerd met zowel natuurlijke als antropogene processen. Ongeacht het proces gaat de noodzaak voor behandeling altijd gepaard met de mismatch tussen de waterkwaliteit aan de bron en de waterkwaliteitseisen bij de gebruiker.

De parameterfuncties voor zuivering in het WMM-model worden gebruikt om de behandeling weer te geven, wanneer technologische behandeling nodig is om een mismatch tussen de waterkwaliteit aan de bron en de waterkwaliteit bij de gebruiker te ondervangen. Een voorbeeld van de stappen die nodig zijn om parameterfuncties te verkrijgen is opgenomen in Bijlage II. In Bijlage II beginnen we met het definiëren van waterkwaliteitsklassen, om te kunnen beslissen of er sprake is van een mismatch in kwaliteit. De volgende stap is beslissen of mismatches in kwaliteit kunnen worden overbrugd, en zo ja, door het gebruik van natuurlijke of technologische behandeling. Door te identificeren welk proces past bij elke omzetting in kwaliteit is het mogelijk om in de literatuur te zoeken naar specifieke factoren die van invloed zijn op de behandeling, wat leidt tot parameterfuncties die de behandelingsopties kunnen weergeven.

6.2.3 Opslag

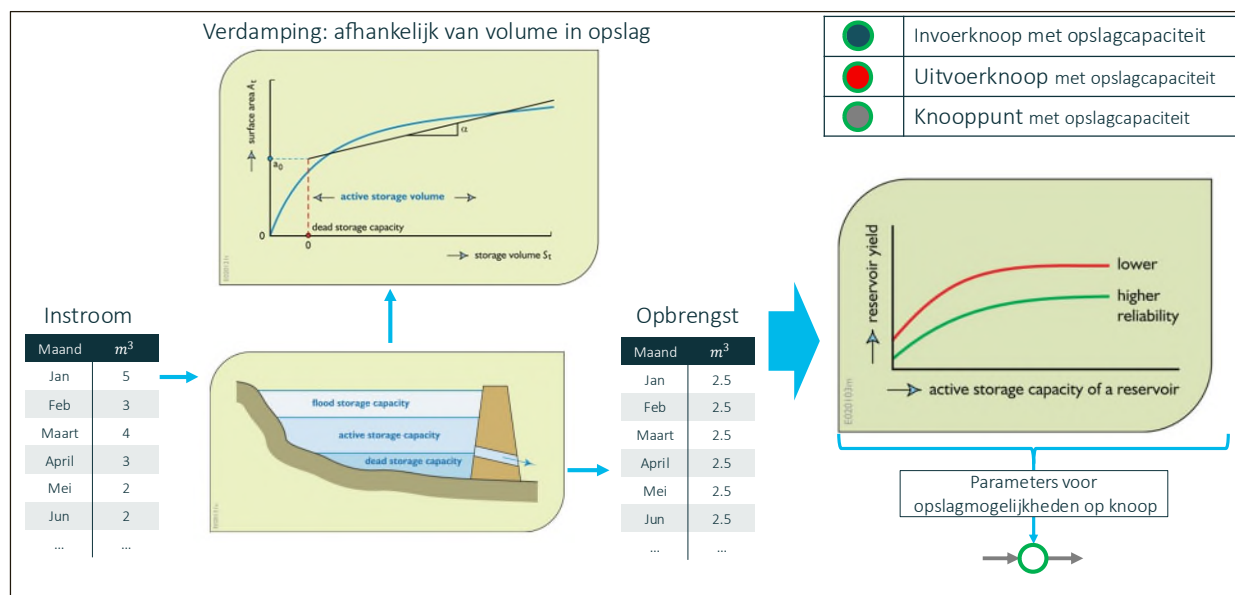
De opslag van water voor later gebruik kan op meerdere manieren gebeuren: bassins kunnen met oppervlaktewater gevuld worden, regenwater kan versneld geïnfiltreerd worden en teruggewonnen, etc. De aanwezigheid van opslag zorgt ervoor dat overtollig water in de toekomst gebruikt kan worden. Om water op te kunnen slaan en later te gebruiken werken we met een serie tijdstappen. Een simpel voorbeeld van waterbalansen die gekoppeld zijn via tijdstappen wordt weergegeven in Figuur 15. In dit voorbeeld zijn er drie tijdstappen, waarbij

er tijdens de tweede tijdstap een gebrek aan water is om aan de watervraag op dat moment te kunnen voldoen. Dit wordt ondervangen door in de vorige tijdstap water op te slaan. De hoeveelheid water die beschikbaar is in een reservoir is afhankelijk van de aanvulling en onttrekking in het verleden. Over het algemeen is er ook sprake van een maximale capaciteit aan water dat opgeslagen kan worden per locatie. Binnen WMM kunnen de invoerknoppen, de uitvoerknoppen en de interne knopen een opslagcapaciteit toegewezen krijgen. Deze opslagcapaciteit kan statisch zijn of in sommige gevallen fluctueren over de tijd. Wanneer opslag ook invloed heeft op de kwaliteit van water, dan kan deze verandering toegewezen worden aan de uitgaande stroom van de opslag. In dergelijke gevallen kan het wenselijk zijn om de opslag zelf weer te geven als een samengestelde knoop (doorvoerknoop en opslagknoop met verbindingen in twee richtingen) zodat er gekozen kan worden voor directe doorvoer en de opslag te omzeilen.



Figuur 15. Voorbeeld van een netwerk met opslagmogelijkheden en de desbetreffende waterbalans op de knoop met opslagcapaciteit

In het verleden kon het gebruiken van tijdstappen voor elk van de takken in een groot netwerk ervoor zorgen dat het doorrekenen van het complete systeem te lang duurde om meerdere scenario's te onderzoeken. In dit stadium is nog niet bekend wat de benodigde rekencapaciteit voor WMM zal zijn. Mocht blijken dat een aanpak met tijdstappen niet haalbaar is, dan kan de opslag van water versimpeld worden door de opslagcapaciteit om te rekenen naar een constante opbrengst uit het desbetreffende reservoir. De relatie tussen een sequentie aan instromende hoeveelheden water naar een reservoir, de verliezen (verdamping) en de gewenste opbrengst in relatie tot de capaciteit van het reservoir wordt schematisch weergegeven in Figuur 16. De relatie tussen de opbrengst en de opslagcapaciteit die op elke locatie gerealiseerd kan worden, wordt toegekend aan de invoerknoop, uitvoerknoop, of knooppunt. De optimalisatie zal vervolgens uitwijzen op welke plek een bepaalde hoeveelheid opslag gerealiseerd moet worden.



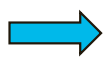
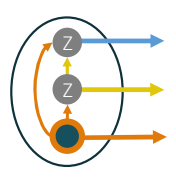
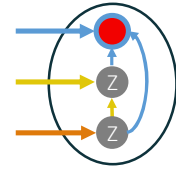
Figuur 16. Figuur op basis van materiaal uit Loucks & van Beek (2017)

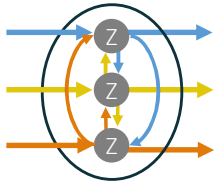
6.3 Voorbeelden van (samengestelde) systeemelementen

Zoals beschreven in het voorgaande deel van dit hoofdstuk biedt de overkoepelende modelstructuur van WMM voldoende ruimte om alle situaties in een watersysteem modelmatig weer te geven. Dit kan gedaan worden op basis van de individuele componenten (invoerknopen, uitvoerknopen, knooppunten, takken) of door deze te combineren in de vorm van samengestelde systeemcomponenten (natuurgebied, zuiveringslocatie, ...) die op verschillende locaties toegepast kunnen worden. Op deze manier komen we tot een modelopzet die aansluit bij de beleving van een grotere groep gebruikers en stakeholders.

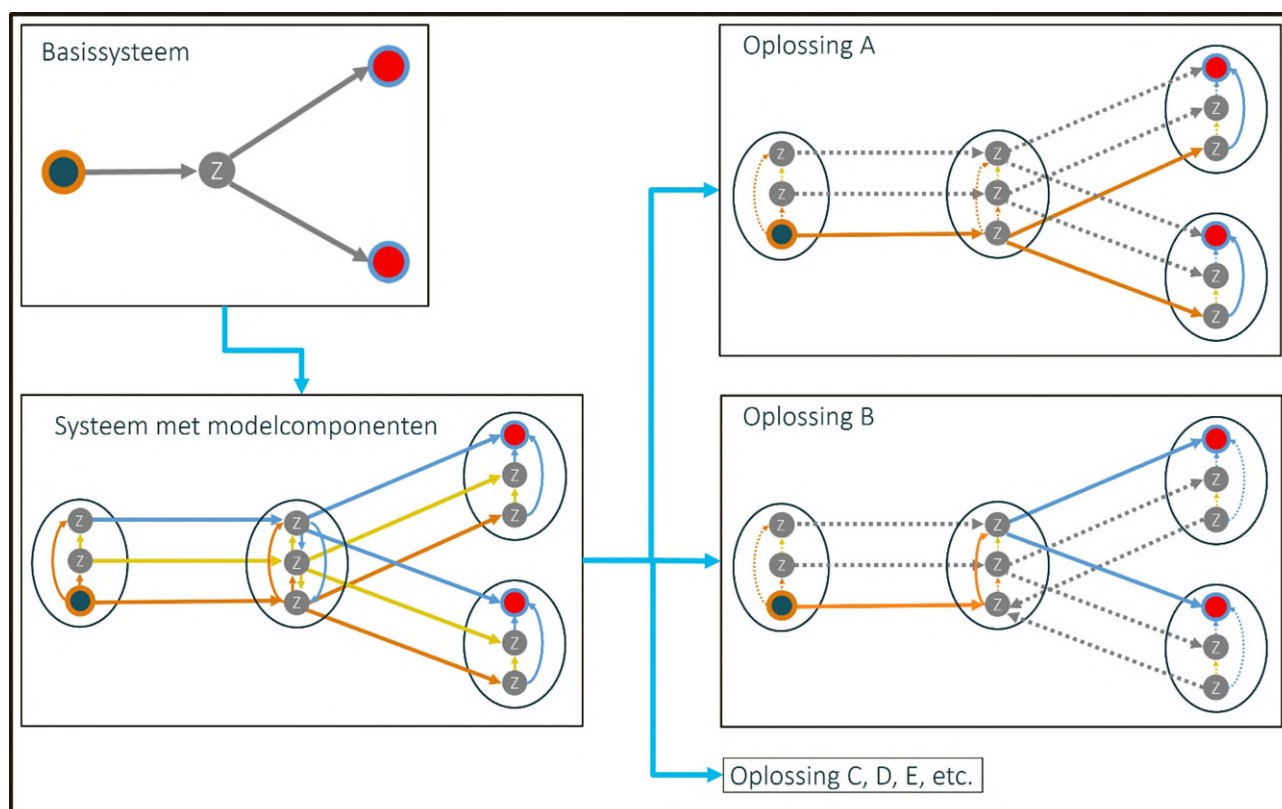
Samengestelde systeemelementen kunnen worden voorgeprogrammeerd zodat de gebruiker van WMM deze op een simpele manier kan implementeren op de locaties waar deze aan de orde zijn. Voorbeelden van belangrijke denkbare elementen worden gegeven in Tabel 1. De detailvisualisatie laat zien hoe water binnen de samengestelde knoop kan bewegen. De geaggregeerde visualisatie verbergt de interne werking, maar behoudt wel de relevante eigenschappen.

Tabel 1. Voorbeelden van mogelijke standaard systeemelementen in WMM (meer configuraties dan weergegeven zijn mogelijk)

Naam (samengesteld) modelcomponent	Detailvisualisatie	Geaggregeerde visualisatie	Relevante eigenschappen
Bron			• Locatie • Netto waterbeschikbaarheid per waterkwaliteitsklasse per tijdseenheid • Kosten, milieu-impact, ruimtegebruik, etc. per eenheid invoer • (potentiële) Opslagcapaciteit per tijdseenheid • Kosten, milieu-impact, ruimtegebruik, etc. per eenheid opslag
Gebruiker			• Locatie • Netto watervraag per waterkwaliteitsklasse per tijdseenheid • Kosten, milieu-impact, ruimtegebruik, etc. per eenheid uitvoer • (potentiële) Opslagcapaciteit per tijdseenheid • Kosten, milieu-impact, ruimtegebruik, etc. per eenheid opslag
Knooppunt			• Locatie • (potentiële) Opslagcapaciteit per tijdseenheid • Kosten, milieu-impact, ruimtegebruik, etc. per eenheid opslag
Verbinding-optie voor transport			• Locatie • Beginpunt en eindpunt • Maximale transportcapaciteit per tijdseenheid • Kosten, milieu-impact, ruimtegebruik, etc. per eenheid transport
Bron met zuivering			• Locatie • Netto waterbeschikbaarheid per waterkwaliteitsklasse per tijdseenheid • (potentiële) Opslagcapaciteit • Kosten, milieu-impact, ruimtegebruik, etc. per eenheid invoer per waterkwaliteit en per eenheid opslag
Gebruiker met zuivering			• Locatie • Netto watervraag per waterkwaliteitsklasse per tijdseenheid • (potentiële) Opslagcapaciteit • Kosten, milieu-impact, ruimtegebruik, etc. per eenheid uitvoer per waterkwaliteit en per eenheid opslag

Knoop met zuivering: een knoop in het netwerk zonder vraag of aanbod maar waar wel zuivering (omhoog) of menging (omlaag) kan gebeuren.			• Locatie • (potentiële) Opslagcapaciteit • Kosten, milieu-impact, ruimtegebruik, etc. per eenheid uitvoer per waterkwaliteit en per eenheid opslag
---	---	---	---

Op basis van de elementen in dit hoofdstuk laten we een simpel voorbeeld zien van de manier waarop de elementen gebruikt worden om uiteindelijk tot een oplossing te komen (zie Figuur 17). Beginnend met een basissysteem met vier knopen (een bron, een knooppunt met mogelijke zuivering, een twee gebruikers) wordt het systeem opgebouwd met de verschillende modelcomponenten. Binnen Oplossing A wordt er gekozen om het water eerst te transporteren om het uiteindelijk bij de gebruikers te zuiveren. Binnen oplossing B wordt er gekozen om water te transporteren naar een gedeelde zuiveringslocatie om het vervolgens naar de gebruikers te transporteren. Naast deze twee oplossingen zijn er nog een aantal andere manieren om water van de bron naar de gebruikers te krijgen via transport en zuivering.

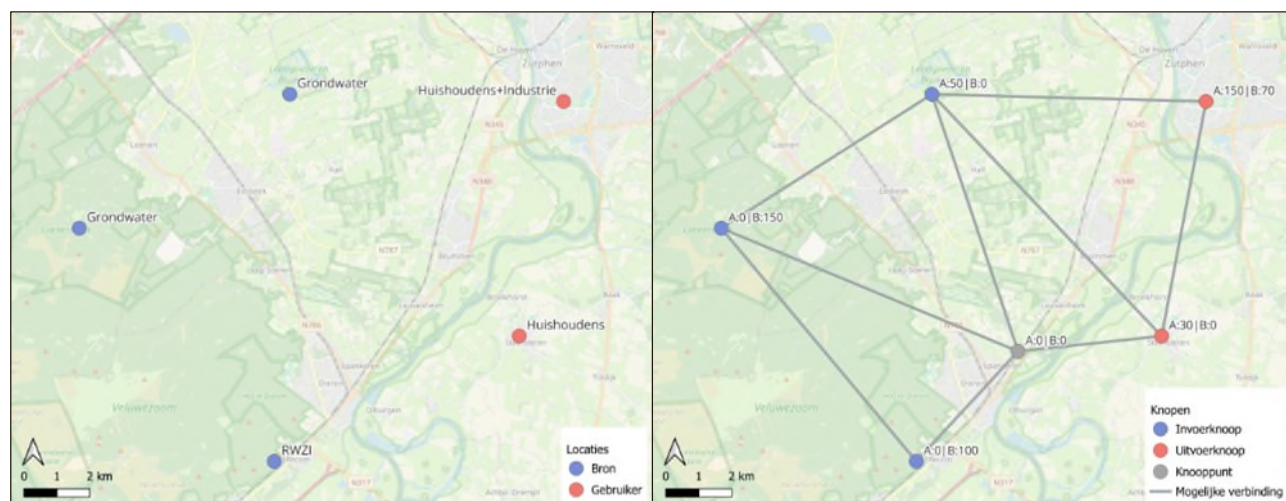


Figuur 17. Voorbeeld van WMM-systeem op basis van modelcomponenten en voorbeelden van mogelijke oplossingen. De stippellijnen binnen de oplossingen zijn de takken welke ongebruikt blijven. De aanduiding 'Z' geeft aan dat zuivering mogelijk is.

6.4 WMM-demo op basis van modelstructuur en systeemcomponenten

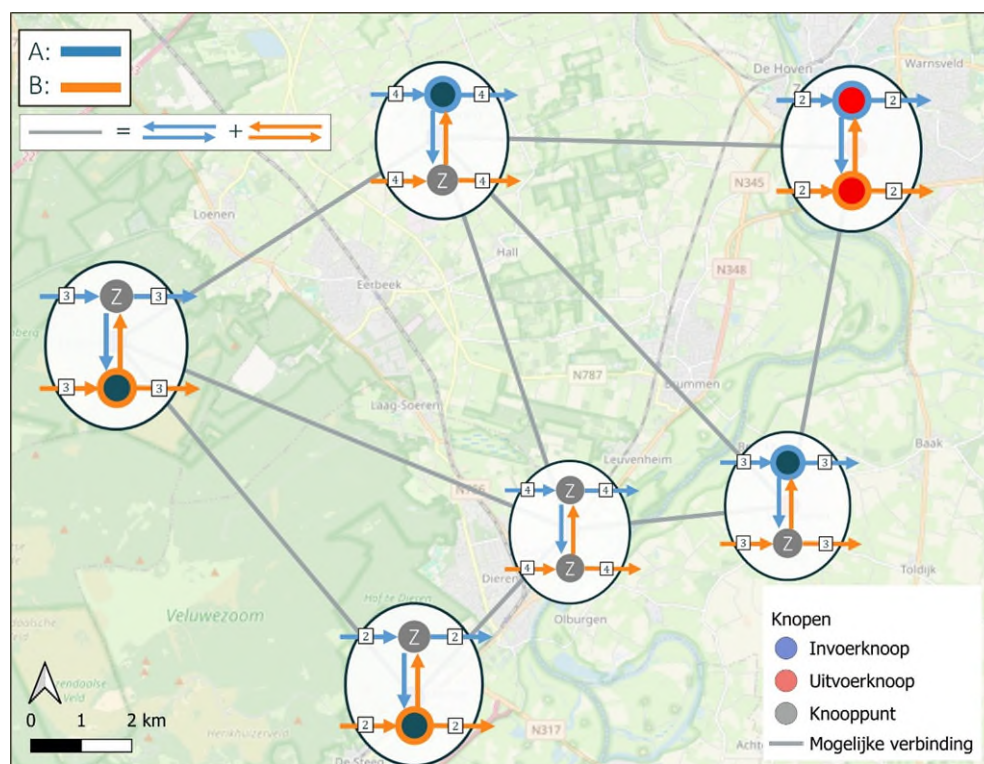
Om de opzet van WMM te testen en feedback op te halen uit de sector is een hypothetische demo opgezet waarmee twee workshops (mei 2025 en januari 2026) gehouden zijn. De locaties en mogelijke transportopties in deze demo zijn fictief, en de weergave ervan op een kaart dient alleen ter illustratie voor de manier waarop WMM

uiteindelijk gebruikt zou kunnen worden. Binnen de demo is gekozen voor een systeem met drie mogelijke bronnen en twee gebruikers (zie Figuur 16, links). De verschillende typen bronnen (grondwater en RWZI) en gebruikers (huishoudens en industrie) zijn gekozen om aannemelijk te maken dat water van verschillende kwaliteiten (A en B) in het systeem aanwezig zijn en gebruikt zouden kunnen worden. De watervraag en waterbeschikbaarheid op deze locaties is een invoergegeven en dient in de demo als randvoorwaarde binnen de optimalisatie. In deze demo gaan we ervan uit dat als een gebruiker water van kwaliteit B nodig heeft, dat in deze ook voorzien kan worden met water van kwaliteit A. Water van kwaliteit A dat gemengd wordt met water van kwaliteit B wordt vervolgens beschouwd als kwaliteit B. Naast de bronnen en gebruikers is een mogelijk knooppunt voor de transportopties geïdentificeerd. In deze eerste demo laten we opslag achterwege. De beginsituatie van het systeem aan de hand van de basiselementen van WMM is weergegeven in Figuur 18 (rechts).



Figuur 18. Hypothetische WMM Demo zonder opslagmogelijkheden. De watervraag/beschikbaarheid in $\text{m}^3 \text{dag}^{-1}$ per kwaliteit is aan de rechterkant weergegeven op de knopen (dit zijn invoerwaardes voor het model en worden niet door WMM zelf berekend).

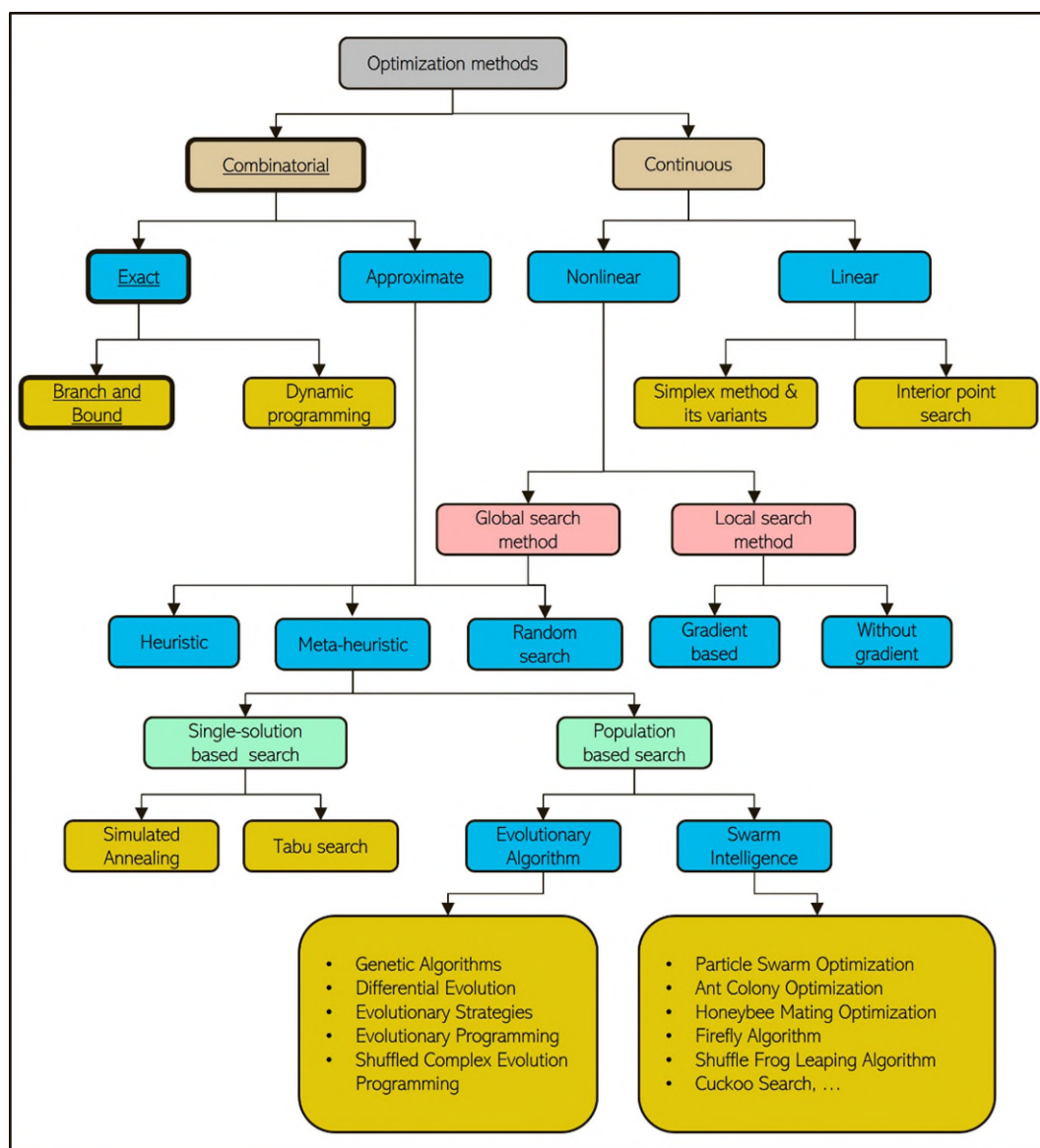
Wanneer de bovenstaande regels voor zuivering en paralleltransport toegepast worden op de demo dan resulteert dit in de situatie zoals in Figuur 19. Elke locatie kan dienen als doorvoer en op elke locatie is het mogelijk om water te zuiveren. Voor elke mogelijke verbinding per knoop per kwaliteit moet een inkomende en een uitgaande stroom gedefinieerd worden. Op basis hiervan demonstreren we de berekeningen binnen WMM in een volgend hoofdstuk.



Figuur 19. Demo op basis van samengestelde knopen voor zuivering en parallel transport voor meerdere kwaliteiten. De takken tussen de fysieke locaties vertegenwoordigen de mogelijke verbindingen per kwaliteit in beide richtingen. De cijfers in de kaders geven het aantal verbindingen per kwaliteit aan.

7 Opzet van WMM berekeningen

In de kern is de vraag die binnen WMM beantwoord dient te worden: welke combinatie van bronnen, zuivering, opslag en transport resulteert in het optimale watersysteem (op basis van de beschouwde criteria)? Gezien de vele mogelijke evaluatiecriteria in een watersysteem kan 'optimaal' op verschillende manieren geïnterpreteerd worden: de kosten, de milieu-impact, het materiaalverbruik, de implementatietijd, of specifieke balans tussen deze en andere prestatie-indicatoren. Met de beschreven modelcomponenten kunnen de interacties tussen de verschillende elementen in het watersysteem en hun onderliggende interacties beschreven en doorerekend worden, maar dit is nog niet genoeg om een geoptimaliseerde configuratie te vinden tussen alle mogelijke configuraties. Hiervoor zijn verschillende methodes beschikbaar (Figuur 20). In dit hoofdstuk bespreken we de basisopzet van WMM met de focus op de optimalisatie van een systeem aan de hand van transport en zuivering. Parallel daaraan is er gewerkt aan de optimalisatie van opslag en transport (zie Bijlage III). Deze twee individuele modules zijn nog niet geïntegreerd voor een totaalplaatje waarin transport, zuivering, en opslag tegelijk meegenomen worden.



Figuur 20. Taxonomie van optimalisatiemethoden, aangepast uit Janga Reddy & Nagesh Kumar (2020). WMM bevindt zich in de dik omlijnde route.

Het WMM-probleem is combinatorisch van aard omdat er een bepaalde systeemconfiguratie gekozen moet worden uit een discrete verzameling van transportopties, zuiveringen en opslag. Het probleem is een combinatie van continue en discrete parameters: de volumestroom van water is continu, de bouw en het gebruik van waterinfrastructuur worden over het algemeen gediscetiseerd. Buisdiameters zijn alleen beschikbaar in een reeks van discrete diameters. Voor optimalisatieproblemen waarin hydraulische aspecten meegenomen worden in de doelen en/of randvoorwaarden wordt over het algemeen gebruik gemaakt van een hydraulische solver (zoals in EPANET) om het gedrag van het systeem te berekenen en prestaties hieruit af te leiden. Vanwege de omvang van de oplossingsruimte, in combinatie met het non-lineaire karakter van hydraulische berekeningen, wordt bij dit soort optimalisaties over het algemeen meta-heuristisch gebruikt. Hierbij worden de variabelen binnen het modelsysteem op een slimme manier systematisch aangepast om de zoekruimte te doorzoeken naar de optimale oplossing. Deze methode garandeert geen globaal optimum maar is wel geschikt om relatief snel een geoptimaliseerde oplossing te vinden.

Er is op dit moment echter geen simulatiesoftware beschikbaar waarin verschillende soorten transport, zuivering en opslag meegenomen worden in de simulatie van een compleet waterdistributiesysteem. In andere woorden, er

is voor WMM geen equivalent van EPANET of WNTR. Voor de doelen van WMM (hoe moet de waterverdeling er globaal uitzien) is het ook niet nodig om de hydraulische aspecten van watertransport mee te nemen binnen de optimalisatie. Dit is in lijn met de manier waarop de veel andere waterverdeling- en waterallocatiemodellen werken; zie CALVIN (Dogan et al., 2018), CALSIM (Draper et al., 2004), WEAP (Sieber, 2015), WSM-DSS (ProGEA S.r.l., 2004). In deze modellen worden waterverdelingsvraagstukken geoptimaliseerd door een systeem van lineaire vergelijkingen op te lossen. Waar nodig worden lineaire benaderingen gebruikt voor niet-lineaire functies, waardoor het mogelijk wordt om exacte methoden te gebruiken. Dit soort methoden leveren in principe het exacte globale optimum van het probleem waar ze op toegepast worden. Afhankelijk van de dimensie van het systeem kan het echter nodig zijn om de rekentijd te beperken en de beste oplossing binnen de gekozen tijd te gebruiken.

7.1 WMM: Fixed Charge Multi-Commodity Network Design Problem

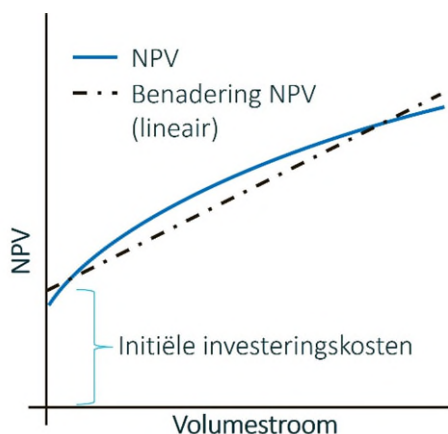
Het waterallocatieprobleem in WMM kan beschouwd worden als een variatie op het 'Fixed Charge Multi-Commodity Network Design Problem' (Hellsten et al., 2021). Dit is een optimalisatieprobleem waarbij er gezocht wordt naar de manier waarop meerdere grondstoffen door een netwerk getransporteerd kunnen worden tegen de laagste kosten, waarbij kosten in brede zin gedefinieerd kunnen zijn. In een versimpelde versie van dit probleem wordt het geformuleerd als een lineair programma. In een lineair programma worden de transportkosten over de takken berekend met een lineaire functie (transportkosten = transportkosten per eenheid * aantal eenheden). In de context van WMM is het toepasselijk om de formulering aan te passen om rekening te kunnen houden met de vaste investeringskosten die nodig zijn om transport, zuivering, of opslag van water mogelijk maken met infrastructuur die uitgebreid moet worden of nog niet bestaat. Deze uitbreiding maakt het probleem een 'mixed integer linear program' (MILP). Er zijn meerdere methoden beschikbaar om vervolgens de optimalisatie uit te voeren. Binnen dit onderzoek kiezen we voorlopig voor een exacte methode in de vorm van 'Branch and Bound' (zie Figuur 20) omdat algoritmes op dit gebied vergaand ontwikkeld en geoptimaliseerd zijn. Het optimalisatieprobleem wordt echter wel dusdanig opgezet dat het aangeboden kan worden aan een optimalisatiemethode die gebruik maakt van meta-heuristiek, bijvoorbeeld een genetisch algoritme zoals geïmplementeerd in Gondwana.

Om te bepalen welke waterbronnen in combinatie met transportopties optimaal zijn, is het nodig om te definiëren op welke basis 'optimaal' gedefinieerd wordt. Zoals naar voren kwam in de workshop (zie Bijlage I) is het belangrijk voor WMM om meerdere definities te kunnen hanteren, of in ieder geval flexibel genoeg te zijn om op basis van verschillende evaluatiecriteria de prestatie van het systeem te kunnen doorrekenen. In dit hoofdstuk gebruiken we monetaire kosten als voorbeeld, maar de manier waarop het probleem geformuleerd is kan op dezelfde manier gebruikt worden voor andere evaluatiecriteria zoals de emissie van broeikasgassen in tonCO₂ eq⁻¹.

Over het algemeen worden de monetaire kosten of baten van infrastructureurprojecten uitgedrukt in investeringskosten (CAPEX) en operationele kosten (OPEX) over de levensduur van de infrastructuur. Deze twee kunnen gecombineerd worden om tot een netto contante waarde (Net Present Value, NPV) te komen, waarbij het gebruikelijk is om een discontovoet te hanteren. Hoe hoger de volumestroom hoe lager de kosten per volume-eenheid als effect van schaalvergroting (zie Figuur 21). Dit vertaalt zich vervolgens naar een NPV-curve welke steil begint en vervolgens afvlakt. Afhankelijk van de wensen van de gebruiker kan aan de hand van elk van deze drie eenheden (CAPEX, OPEX, NPV) een besluit genomen worden over de optimale configuratie van het een systeem.

In de context van WMM is het belangrijk dat het modelsysteem in ieder geval om kan gaan met investeringskosten en operationele kosten. De reden hiervoor is dat WMM gebruikt moet kunnen worden om keuzes te maken binnen een bestaand systeem waar investeringen voor nieuwe infrastructuur gemaakt kunnen worden. Door deze initiële investeringskosten (aangeduid met A in Figuur 21) mee te nemen in de berekeningen kan er bijvoorbeeld een afweging gemaakt worden tussen een nieuwe waterzuivering met hoge investeringskosten ten opzichte van het benutten van een bestaande zuivering met overcapaciteit maar hoge operationele kosten vanwege een verouderde

technologie. Een werkelijke benadering van de NPV kosten (niet lineair) vergt een speciale formulering en oplossing. Daarom gebruiken we voorlopig een lineaire benadering om WMM te testen.

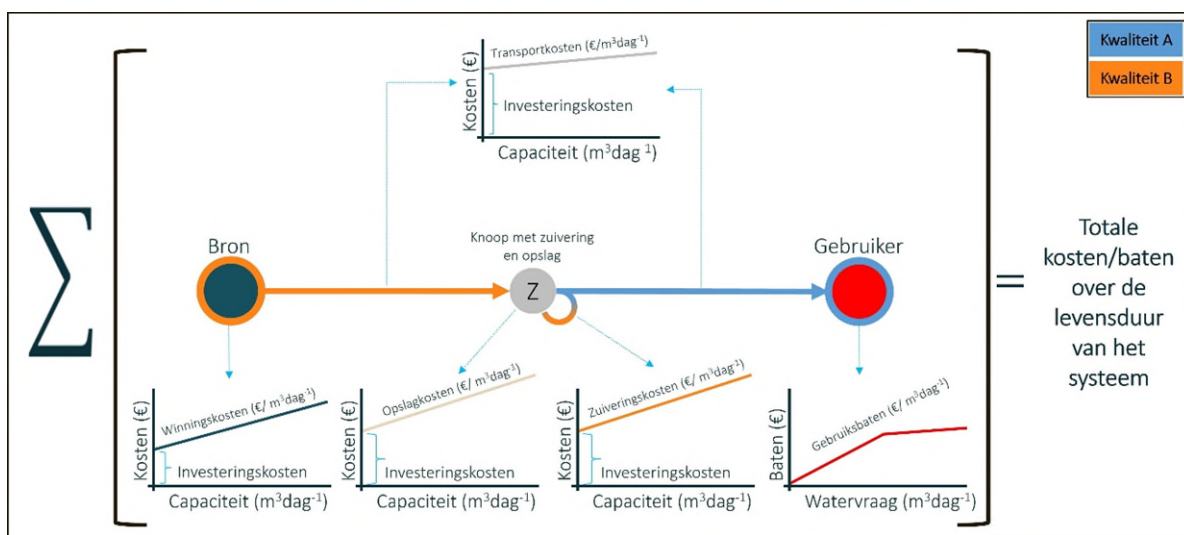


Figuur 21. Voorbeeld van NPV (CAPEX + OPEX) en OPEX als functie van volumestroom Q (gebaseerd op (Judd & Turan, 2019)). De initiële investeringskosten voor het bouwen van de infrastructuur zijn de kosten welke gemaakt moeten worden onafhankelijk van de volumestroom.

7.2 Schematische formulering

Op basis van de bovengenoemde model-elementen kan een schematische weergave gemaakt worden van een versimpeld optimalisatieprobleem in WMM (Figuur 22). De watervraag (kwaliteit A) van de gebruiker kan voldaan worden vanuit een enkele bron van kwaliteit B. Na winning bij de bron is een combinatie van zuivering, opslag, en transport nodig om het water bij de gebruiker te krijgen. Zuivering en opslag vinden plaats op dezelfde locatie. De gebruiker (industrie) maakt gebruik van het water om goederen te produceren, waardoor de beschikbaarheid van water gekoppeld kan worden aan baten. Tot aan een bepaalde grens is al het geleverde water essentieel en heeft elke extra geleverde kuub een hoge waarde. Boven deze grens kan water nog wel gebruikt worden, maar heeft het een lagere toegevoegde waarde. In dit geval vormen de winning en het gebruik de grenzen van het modelsysteem. Deze grenzen kunnen uitgebreid worden met een extra knoop en tak voor de lozing van restwater in combinatie met de betreffende kosten en baten.

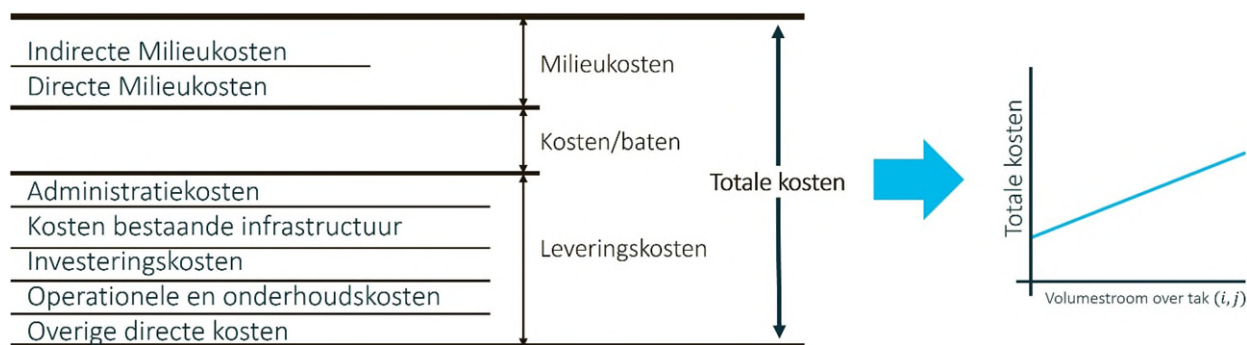
Wanneer er voor elke tak in het systeem een kostenfunctie wordt opgesteld, dan kan de prestatie van elke mogelijke configuratie bepaald worden aan de hand van de volumestroom over elke tak en het volume in de opslag. De uiteindelijke kosten/baten van het systeem zijn de optelsom van de kosten en baten voor elk van de takken en de opslag. In dit voorbeeld bestaan de kosten uit de onderdelen zuivering, de opslag, de winlocatie en het transport (met desbetreffende knopen en takken). De baten worden gevormd door het watergebruik bij de eindgebruiker (de rode knopen en takken), omdat met dit water goederen kunnen worden geproduceerd. Bij het optimaliseren van dit systeem kan er dus worden gekozen om óf de kosten te minimaliseren, óf de baten te maximaliseren.



Figuur 22. Basisrepresentatie totaalkosten berekend binnen WMM. De kosten zijn gebaseerd op de netto contante waarde (CAPEX + OPEX) op basis van een gespecificeerde volumestroom/capaciteit.

7.3 Keuze van beoordelingscriteria

De voorgaande sectie beschrijft een optimalisatie op basis van monetaire kosten. Tijdens de workshops kwam naar voren dat het belangrijk is om naast kosten ook andere beoordelingscriteria te kunnen toepassen. De modelstructuur zoals beschreven in dit hoofdstuk is dusdanig opgezet dat deze geschikt is om met andere en/of aanvullende criteria om te gaan. De monetaire kosten- en batenfuncties kunnen ook opgesteld worden voor bijvoorbeeld energieverbruik, CO₂-emissies, materiaalverbruik of impact op biodiversiteit per volumestroom over elk van de takken. Vervolgens zijn er meerdere manieren waarop men met deze criteria kan omgaan. Een optie is om buiten de optimalisatieprocedure de criteria te aggregeren tot een enkele waarde (zie Figuur 23). Deze benadering is direct te implementeren binnen de bovenstaande modelstructuur, maar hiermee verliest men wel de mogelijkheid om meerdere doelen met elkaar te vergelijken.



Figuur 23. Voorbeeld van de geaggregeerde kostenopbouw die gebruikt kan worden voor elke tak van het watersysteem aangepast uit ProGEA S.r.l. (2004). Deze kostenopbouw is de invoer voor WMM.

Als beoordelingscriteria tegenstrijdig zijn, is het onwaarschijnlijk dat een enkele systeemconfiguratie optimaal scoort op alle afzonderlijke criteria. Om de afwegingen tussen tegenstrijdige criteria duidelijker in kaart te brengen bespreken we twee mogelijke benaderingen:

- **Meerdere optimalisaties met verschillende doelen uitvoeren.** Dit is een methode die goed past bij exacte benaderingen zoals lineaire programma's. Deze aanpak is gemakkelijk te implementeren, maar is vooral

geschikt om het effect van tegenstrijdige doelen op een uiteindelijke oplossing in kaart te brengen. De methode is minder geschikt om optimale compromissen tussen doelen te identificeren.

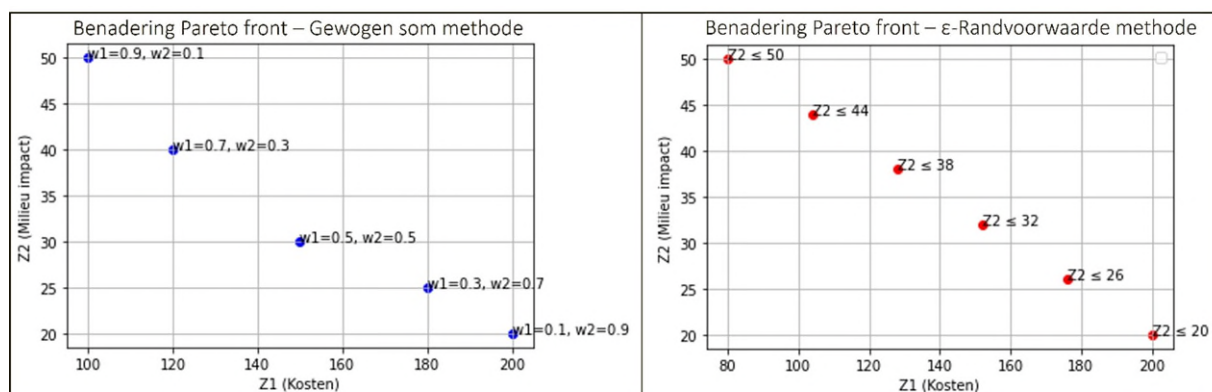
- **Een probleem met meerdere expliciete doelen opstellen en oplossen.** De verschillende doelen worden samengevoegd tot een optelsom van de verschillende kostenfuncties van het systeem. Binnen MILP zijn twee mogelijkheden om hier mee om te gaan. Deze worden hieronder kort beschreven.

Gewogen som methode: in deze methode worden kostenfuncties voor de verschillende doelen samengevoegd binnen een enkele doelfunctie en worden er gewichten toegekend aan elk van de individuele functies. Een algemene formulering hiervoor is:

$$f_{obj}(x) = \alpha g(x) + \beta h(x) \quad (1)$$

De overkoepelende doelfunctie $f_{obj}(x)$ is opgebouwd uit $g(x)$ en $h(x)$, de verschillende subdoelen die geoptimaliseerd dienen te worden. De gewichten die toegekend worden aan elk van deze doelen zijn α en β . Dezelfde vorm wordt gebruikt bij meer dan twee subdoelen. Deze methode is relatief makkelijk te implementeren maar het bepalen van de juiste gewichten kan lastig zijn. Om een pseudo-Pareto front te genereren op basis van deze methode worden de gewichten systematisch veranderd over meerdere iteraties van het model. Elk van de gevonden oplossingen is optimaal gegeven de toegekende gewichten. Dit levert een pseudo-Pareto front op met de impact van de gekozen gewichten op de verschillende doelen (Figuur 24, links). Deze methode beantwoordt de vraag: hoeveel belangrijker moet het ene doel zijn ten opzichte van het andere doel om de optimale oplossing te beïnvloeden. Bijvoorbeeld: hoe ziet het optimale ontwerp van een zuiveringsinstallatie eruit wanneer milieu-impact voor 75% meetelt in de uiteindelijke beslissing en de totale kosten voor 25%.

ϵ -Randvoorwaarde Methode (Haimes, 1971): in deze methode wordt een primair doel geoptimaliseerd terwijl de andere doelen, begrensd door de parameter ϵ , als randvoorwaarden gebruikt worden. Door de optimalisatie meerdere malen uit te voeren, met variërende waarden als randvoorwaarde voor de alternatieve doelen, kan de wisselwerking tussen verschillende doelen onderzocht worden (Figuur 24, rechts). Met deze methode weet men zeker dat de uitkomst optimaal is voor een doel voor een bepaalde waarde van een ander(e) doel(en). Bijvoorbeeld: wat is het ontwerp voor een zuiveringsinstallatie met de laagste milieu-impact wanneer de totale kosten niet hoger mogen zijn dan X. Bij meer dan twee doelen worden de verschillende subdoelen tegelijk begrensd ($\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_k$).



Figuur 24. Voorbeelden van de benaderingen van een 2D Pareto front op basis van de gewogen som methode en de ϵ -Randvoorwaarde Methode. Z1 en Z2 zijn de verschillende doelen die geminimaliseerd moeten worden. Elk van de oplossingen is een optimale oplossing voor de gekozen gewichten w1 en w2 (links) of binnen een randvoorwaarde voor Z2 (rechts).

7.4 Wiskundige formulering WMM-demo

Voor daadwerkelijke optimalisatie moet het schematische probleem omgezet worden naar een wiskundige formulering, zodat een algoritme ermee kan rekenen. Deze formulering bestaat uit verzamelingen, parameters, beslisvariabelen, randvoorwaarde en een doelfunctie. We beginnen met de formulering voor het probleem zonder opslag en breiden deze vervolgens uit met opslag.

Om het optimalisatieprobleem schaalbaar te houden definiëren we een aantal verzamelingen binnen de knopen en takken en gebruiken we een netwerk met meerdere lagen waarmee de conversie van kwaliteiten (k) (zoals weergegeven in Figuur 17) mogelijk gemaakt wordt. In eerste instantie worden er voor elke fysieke locatie een aantal fictieve knopen (n_k) aangemaakt, een per waterkwaliteit. Het onderscheid tussen fysieke locaties (u, v) en fictieve knopen (i, j) is nodig om bouwbeslissingen te kunnen nemen welke los staan van het aantal kwaliteiten terwijl de stroming per kwaliteit apart bijgehouden moet worden via de fictieve knopen (i, j). Vervolgens worden op basis van de verzameling mogelijke fysieke verbinding (E) een verzameling gerichte verbindingen (A) aangemaakt tussen de fictieve knopen. Daarnaast wordt een verzameling van conversie/zuivering mogelijkheden opgesteld op basis van de fysieke locaties ($CONV$). Het onderscheid tussen E en A is nodig om per kwaliteit de transportrichting te bepalen en om parallelle infrastructuur te benutten. Tijdens de optimalisatie wordt er vervolgens bepaald welke verbindingen (E) aangelegd worden, in welke richting transport plaatsvindt (A), en welke conversies ($CONV$) gebruikt moeten worden. De verschillende verzamelingen worden weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 Verzamelingen binnen het WMM-optimalisatieprobleem.

Verzameling	Beschrijving
K	Verzameling van waterkwaliteiten
N	Verzameling van fictieve knopen per waterkwaliteit met het format n_k , waarbij n de locatie-ID is en k de waterkwaliteit.
A	Verzameling van alle gerichte verbindingen per verbinding-ID (e) per kwaliteit (k) van fictieve knoop (i) naar fictieve knoop (j) $\rightarrow A = \{(e, k, i, j)\}$. Notitie: ook al bevatten i en j de kwaliteitsinformatie wordt deze hier expliciet opgenomen als index voor rekentechnische doeleinden.
E	Verzameling ongerichte verbindingen tussen de fysieke locaties (u) en (v) per verbinding-ID (e) $\rightarrow \{(u, v, e)\}$. Deze worden in de randvoorwaarden gebruikt om ervoor te zorgen dat water enkel in één richting kan stromen. De verbinding-ID maakt het mogelijk om meerdere parallelle verbindingen te definiëren (oude + nieuwe infrastructuur bijvoorbeeld).
$CONV$	Verzameling van conversiemogelijkheden $\{(n, k_f, k_t)\}$ per locatie-ID (n) met conversies van kwaliteit (k_f) naar kwaliteit (k_t), en $k_f \neq k_t$

De parameters zijn vaste waardes binnen een optimalisatie waarmee de interacties tussen de beslisvariabelen beschreven worden en de randvoorwaarden opgesteld worden (zie Tabel 3).

Tabel 3 Parameters binnen WMM

Parameter	Beschrijving	Eenheden
$varKosten_{e,k,i,j}$	De kosten per eenheid capaciteit over de takken over de levensduur	Kosteneenheid tijdseenheid m^{-3}
$capaciteit_{u,v,e}^{trans}$	De maximumcapaciteit over de ongerichte transporttakken	m^3 tijdseenheid ⁻¹
$vastKosten_{u,v,e}$	De vaste kosten voor het bouwen van verbinding e over de levensduur welke onafhankelijk zijn van de capaciteit	Kosteneenheid
$aanbod_{k,i}$	Het aanbod (>0) of de vraag (<0) naar waterkwaliteit k op fictieve knoop i . De watervraag en het wateraanbod worden verschoven van de fysieke locatie n naar de bijbehorende fictieve knoop $i = n_k$ (één per aanwezige waterkwaliteit k). De vraag of het aanbod van kwaliteit k op fysieke locatie n wordt volledig toegewezen aan fictieve knoop n_k , terwijl de overige fictieve knopen van diezelfde locatie ($n_{k'}$ voor $k' \neq k$) een aanbod van nul krijgen.	m^3 tijdseenheid ⁻¹
$varKosten_{n,k_f,k_t}^{conv}$	De variabele conversiekosten van kwaliteit k_f naar kwaliteit k_t op knoop n per eenheid capaciteit over de levensduur	Kosteneenheid tijdseenheid m^{-3}
$vastKosten_{n,k_f,k_t}^{conv}$	De vaste kosten welke gemaakt moeten worden voor de conversie van kwaliteit k_f naar kwaliteit k_t op knoop n over de levensduur welke onafhankelijk zijn van de capaciteit	Kosteneenheid
$capaciteit_{n,k_f,k_t}^{conv}$	De maximumcapaciteit voor een zuivering op locatie n van kwaliteit k_f naar kwaliteit k_t	m^3 tijdseenheid ⁻¹

De beslisvariabelen zijn de knoppen waaraan gedraaid kan worden om te zoeken naar de optimale configuratie van het systeem. In het geval van WMM zijn dit in er in ieder geval vier (Tabel 4): de volumestroom over een tak (welke gelijk is aan de benodigde capaciteit), het wel of niet bouwen van een leiding, de keuze voor de richting van het transport in de leiding, en de keuze voor de conversie van kwaliteiten.

Tabel 4 Beslisvariabelen binnen WMM

Beslissingsvariabelen	Beschrijving	Soort
$f_{(e,k,i,j)}$	De volumestroom (m^3 tijdseenheid ⁻¹) over tak (i,j) per kwaliteit (k)	Positief reëel getal
$y_{(u,v,e),k}^{trans} \in \{0,1\}$	Binaire variabele per waterkwaliteit welke aangeeft of een verbinding wel of niet benut wordt. Deze beslissing wordt gemaakt over de set ongerichte takken omdat de bouw van een leiding los staat van de richting waarin het water vervolgens zal stromen en om te voorkomen dat water tegelijk in beide richtingen kan stromen.	Binair (0,1)
$z_{(u,v,e),k} \in \{0,1\}$	Binaire variabele die aangeeft in welke richting transport plaatsvindt 1 = richting $u \rightarrow v$ 0 = richting $v \rightarrow u$	Binair (0,1)

$c_{n,kf,kt}$	De volumestroom welke omgezet wordt van kwaliteit k_f naar kwaliteit k_t op knoop n	Positief reëel getal
$y_{n,kf,kt}^{conv} \in \{0,1\}$	Binaire variabele welke aangeeft of de conversie van kwaliteit k_f naar kwaliteit k_t op knoop n geactiveerd wordt	Binair (0,1)

De doelfunctie is een minimalisatie van de kosten. Aangezien kosten positieve waardes hebben, gebruiken we een doelfunctie die geminimaliseerd dient te worden:

$$\min \left[\sum_{a \in A} f_a \cdot varKosten_a + \sum_{(u,v,e) \in E} \sum_{k \in K} y_{(u,v,e),k}^{trans} \cdot vastKosten_{u,v,e} + \sum_{(n,kf,kt) \in CONV} c_{n,kf,kt} \cdot varKosten_{n,kf,kt}^{conv} + \sum_{(n,kf,kt) \in CONV} y_{n,kf,kt}^{conv} \cdot vastKosten_{n,kf,kt}^{conv} \right] \quad (2)$$

De eerste term in de doelfunctie representeert de totale som aan variabele transportkosten op basis van de volume-eenheden getransporteerd over elke tak. De tweede term zijn de vaste kosten die gemaakt moeten worden om de takken te activeren. De derde term zijn de variabele conversiekosten voor de conversie van kwaliteiten. De vierde term zijn de vaste kosten voor het inschakelen van de conversies.

Naast de doelfunctie zijn er een aantal randvoorwaarden waaraan een optimale oplossing aan moet voldoen. In eerste instantie definiëren we de voorwaartse richting:

$$A_{uv}(e, k) = \{(e, k, u, v)\} \in A \quad (3)$$

en andersom,

$$A_{vu}(e, k) = \{(e, k, v, u)\} \in A \quad (4)$$

De capaciteit (gelijk aan de volumestroom) over elke tak wordt vervolgens begrensd met:

$$\sum_{a \in A_{uv}(e,k)} f_a \leq capaciteit_{u,v,e}^{trans} \cdot y_{(u,v,e),k}^{trans} \quad (5)$$

en,

$$\sum_{a \in A_{vu}(e,k)} f_a \leq capaciteit_{u,v,e}^{trans} \cdot y_{(u,v,e),k}^{trans} \quad (6)$$

De keuze voor de stroomrichting wordt gehandhaafd met:

$$\sum_{a \in A_{uv}(e,k)} f_a \leq capaciteit_{u,v,e}^{trans} \cdot z_{(u,v,e),k} \quad (7)$$

en,

$$\sum_{a \in A_{vu}(e,k)} f_a \leq \text{capaciteit}_{u,v,e}^{trans} \cdot (1 - z_{(u,v,e),k}) \quad (8)$$

Uiteindelijk wordt de keuze voor de stroomrichting gekoppeld aan de binaire beslissing voor het aanleggen van een leiding:

$$z_{(u,v,e),k} \leq y_{(u,v,e),k}^{trans} \quad (9)$$

Zuivering van water kan alleen gebeuren wanneer er op de desbetreffende knoop zuiveringsmogelijkheden gerealiseerd worden:

$$c_{n,kf,kt} \leq \text{capaciteit}_{n,kf,kt}^{conv} \cdot y_{n,kf,kt}^{conv} \quad (10)$$

De waterbalans per waterkwaliteit (k) per knoop (n) wordt gehandhaafd door de inkomende en uitgaande stroom per knoop te definiëren:

$$In(i,k) = \sum_{(e,k,j,i) \in A} f_{e,k,j,i} \quad (11)$$

en,

$$Uit(i,k) = \sum_{(e,k,i,j) \in A} f_{e,k,i,j} \quad (12)$$

En de inkomende en uitgaande stroom op basis van de conversies per fictieve knopen te definiëren:

$$\text{conv}In(i,k) = \sum_{(n,k,kt) \in CONV, n=base(i)} c_{n,k,kt} \quad (13)$$

en,

$$\text{conv}Uit(i,k) = \sum_{(n,kf,k) \in CONV, n=base(i)} c_{n,kf,k} \quad (14)$$

Waar $base(i)$ de fysieke locatie-ID is van fysieke knoop (i).

Aangezien al het transport via de fictieve knopen verloopt hoeven er alleen balansen voor de fictieve knopen opgesteld te worden. Afhankelijk van de watervraag op de originele knoop wordt er een specifieke waterbalans op de fictieve knopen gehandhaafd (waarbij vergelijkingen (11)-(14) in vergelijking (15) gebruikt worden):

$$(Uit + \text{conv}Uit) - (In + \text{conv}In) = \begin{cases} \leq \text{aanbod}_{k,i} & \text{als } \text{aanbod}_{k,i} > 0 \\ = \text{aanbod}_{k,i} & \text{als } \text{aanbod}_{k,i} < 0 \\ = 0 & \text{anders} \end{cases} \quad \forall i \in N \quad (15)$$

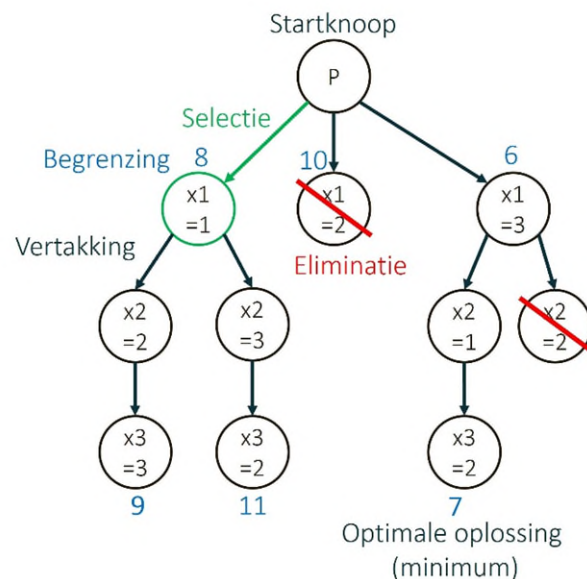
Deze waterbalans betekent dat wanneer er water beschikbaar is op een knoop ($\text{aanbod} > 0$), er een maximum gesteld wordt aan het gebruik hiervan: minder is ook toegestaan. Wanneer er een watervraag is ($\text{aanbod} < 0$),

dan moet er aan deze vraag voldaan worden (watervraag heeft een negatieve waarde in het model). Na de optimalisatie worden de uitkomsten weer omgezet naar een versimpelde weergave zonder de fictieve knopen en extra takken welke aangemaakt zijn voor het optimalisatiealgoritme.

Het opstellen van een optimalisatieprobleem uit de bovenstaande continue en binaire variabelen leidt tot een gemengd geheeltallig programmeerprobleem (Mixed Integer Problem, MIP). In deze eerste iteratie van WMM kiezen we ervoor om een exacte methode te gebruiken om een oplossing voor dit soort problemen te vinden. Dit kan gedaan worden met specifieke algoritmes voor stromen/bewegingen over een netwerk (Tomlinson et al., 2020) of met een verzameling lineaire vergelijkingen (een lineair programma) waar generieke solvers/algoritmes beschikbaar voor zijn. Een geschikt algoritme is het 'Branch-and-Bound' algoritme dat kan omgaan met binaire beslisvariabelen en dat ver ontwikkeld is om op een efficiënte manier suboptimale oplossingsrichtingen uit te sluiten. Dit algoritme bestaat uit vier stappen:

- 1 Het probleem wordt versimpeld tot een lineair probleem door de geheeltallige randvoorwaarden te negeren en een bovengrens en ondergrens voor de oplossing te bepalen (bounding).
- 2 Het probleem wordt opgedeeld in deelproblemen met nieuwe randvoorwaarden om te voldoen aan de geheeltallige randvoorwaarden (branching).
- 3 Elk deelprobleem wordt opgelost en alleen behouden als de boven- of ondergrens beter presteren dan de oplossingen die voorsnog gevonden zijn. De andere deelproblemen worden geëlimineerd (snoeien/eliminieren)
- 4 Dit proces wordt herhaald totdat alle deelproblemen gesnoeid dan wel opgelost zijn. De uitkomst van dit proces is de beste oplossing die voldoet aan de randvoorwaarden.

Een van de voordelen van dit algoritme is dat het bewezen altijd het globale optimum oplevert. Een visualisatie van dit proces is weergegeven in Figuur 25.



Figuur 25. Visualisatie van het Branch-and-bound algoritme aangepast uit (Mehdi, 2011)

8 Uitkomsten WMM demo

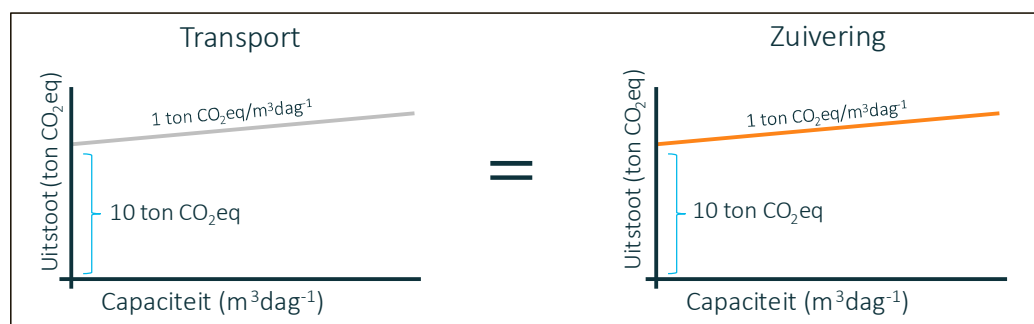
Op basis van de opzet in Hoofdstuk 6 en de rekenmethode uitgewerkt in Hoofdstuk 0 is de WMM-demo geprogrammeerd in Python. De uitkomsten hiervan zijn gebruikt tijdens de workshops met de interne en externe partijen. In dit hoofdstuk behandelen we een aantal situaties/dilemma's die met behulp van de modelmatige implementatie onderzocht kunnen worden. De gekozen kosteneenheid is de uitstoot van CO₂ (ton CO₂eq) die in de optimalisatie geminimaliseerd dient te worden. In alle gevallen gaat het om hypothetische situaties, waarbij de onderzoekers de invoerwaardes zo hebben gekozen dat het systeem begrijpelijk blijft voor de deelnemers, terwijl de complexiteit, en daarmee de noodzaak voor WMM, duidelijk wordt. Hieronder herhalen we de spelregels waaraan de optimalisatie zich moet houden.

1. Er moet minimaal aan de watervraag van de gebruiker voldaan worden.
2. Er mag niet meer dan de vooraf vastgestelde beschikbaarheid bij bronnen onttrokken worden.
3. Water kan bij de bron, gebruiker, of knooppunt gezuiverd worden van B naar A.
4. Transport van verschillende kwaliteiten in dezelfde richting gebeurt met parallelle transportleidingen.
5. Een watervraag naar kwaliteit B kan voldaan worden met kwaliteit A.
6. Mengen van kwaliteit A met kwaliteit B resulteert in water met kwaliteit B (voorzorgsprincipe).

Tijdens de workshops werden de aannames en spelregels voor de WMM-optimalisatie uitgelegd en werd de deelnemers gevraagd om op basis daarvan een optimaal systeem en waterverdeling te tekenen. In de rest van dit hoofdstuk volgen de voorgelegde situaties en hun oplossingen en vervolgens een korte reflectie op basis van de interacties met de deelnemers.

8.1 Situatie 1: gelijke kosten

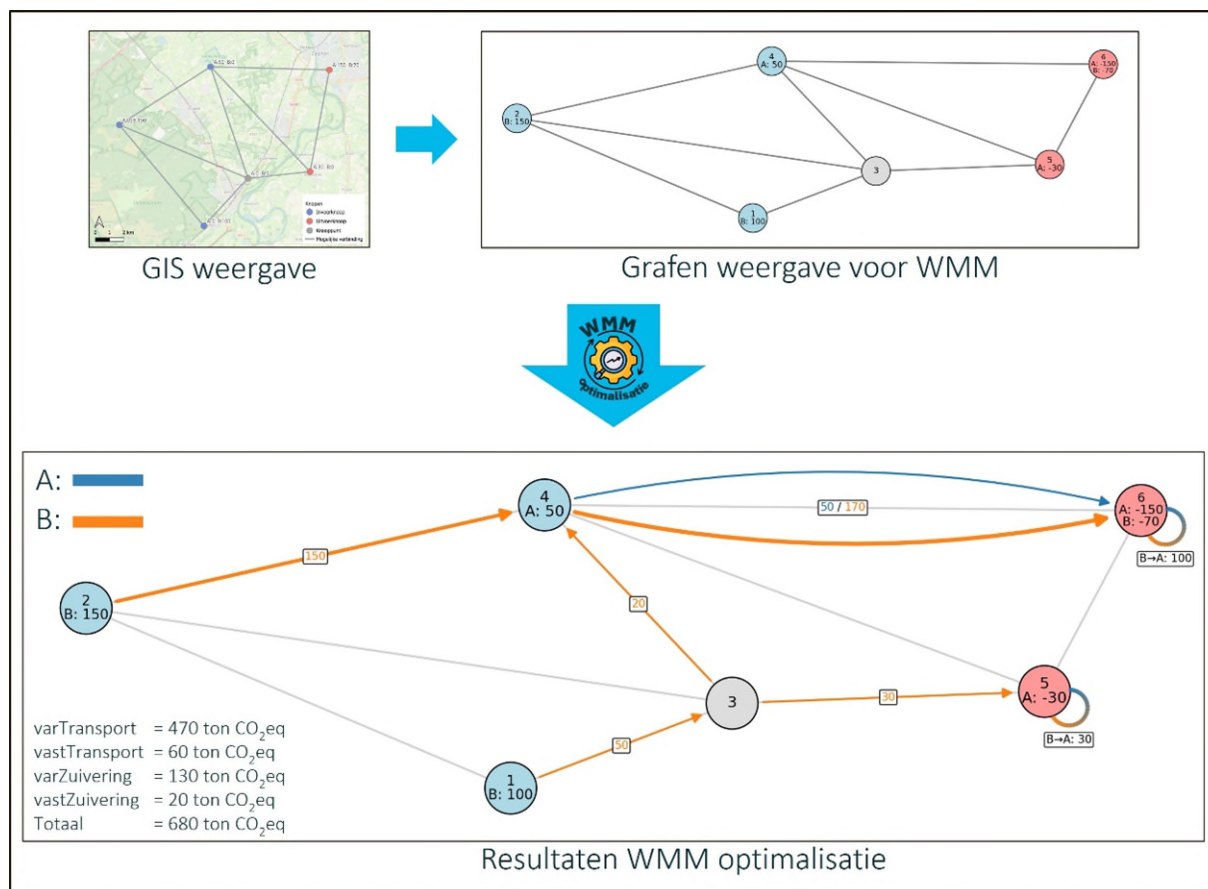
In eerste instantie onderzoeken we de fictieve situatie waarin de kosten, uitgedrukt in CO₂-uitstoot, voor transport en voor zuivering gelijk zijn. Over elke tak waar transport kan plaatsvinden zijn de kosten gelijk, en op elke knoop waar zuivering kan plaatsvinden zijn de kosten ook gelijk (zie Figuur 25). We gebruiken deze situatie als benchmark om vervolgens te kunnen aantonen en uitleggen wat het effect is van veranderingen in de inputdata.



Figuur 26. Kostenfuncties op basis van CO₂ uitstoot over de levensduur van de infrastructuur gebruikt voor Situatie 1 & 2 in de WMM Demo

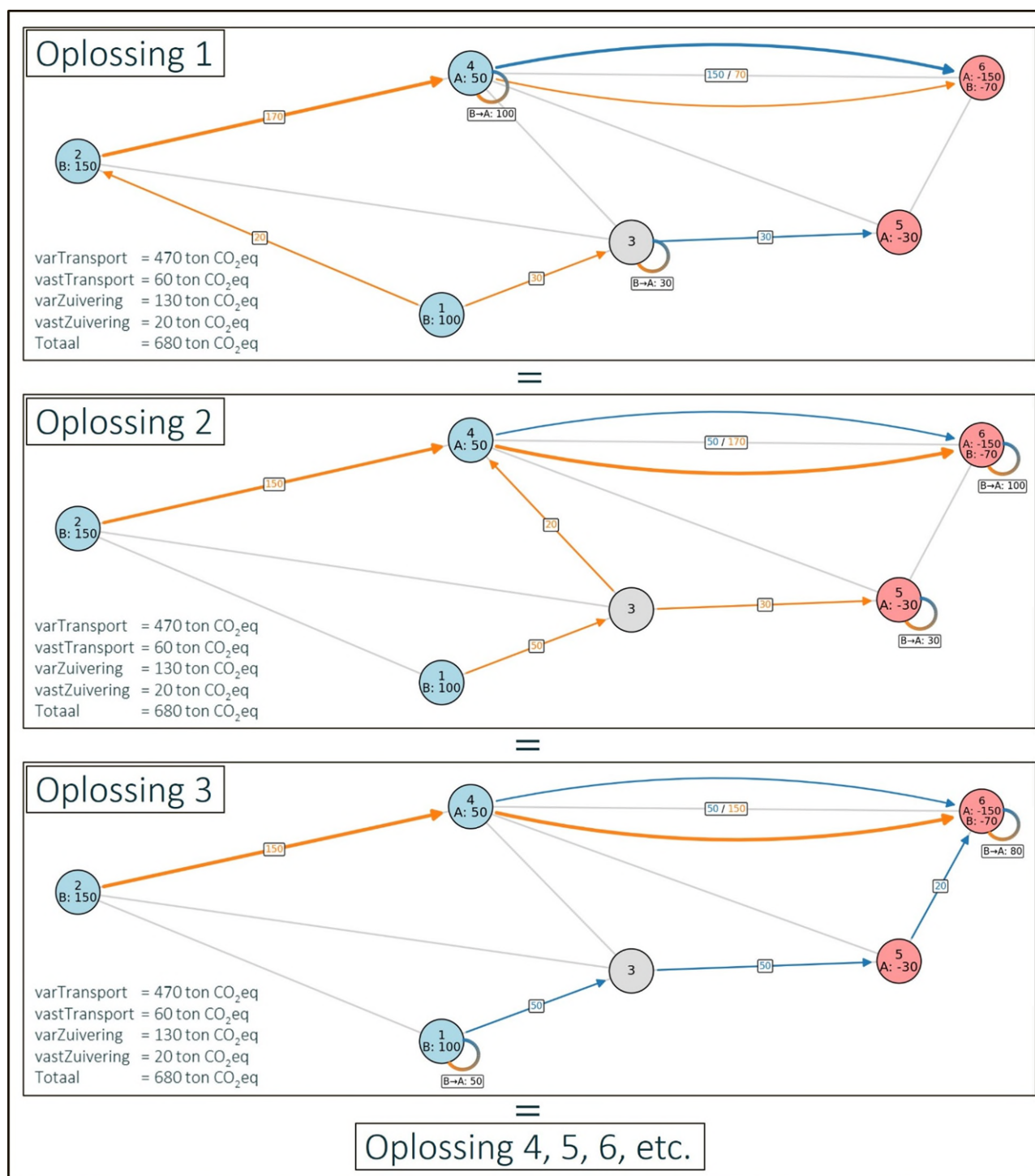
Op basis van de invoerwaardes voor watervraag en waterbeschikbaarheid aangeleverd vanuit een GIS-systeem wordt een graaf opgezet die vervolgens geoptimaliseerd wordt op basis van de formulering in Hoofdstuk 7.4 (zie Figuur 27). Het probleem is geprogrammeerd in Python, gebruikmakend van PYOMO voor efficiënte formulering van het probleem, en van GLDP als solver. De minimale uitstoot van het geoptimaliseerde systeem, op basis van de

uitstootfuncties in Figuur 26, is 680 ton CO₂eq. Het grootste deel hiervan is afkomstig van de variabele uitstoot afkomstig van transport. Er worden in totaal zes leidingen aangelegd (aangeduid met de gekleurde verbindingen) en het water wordt op beide locaties met een watervraag gezuiverd van kwaliteit B naar kwaliteit A. Tussen knoop 4 en knoop 6 worden waterkwaliteit A en B getransporteerd in aparte parallelle leidingen.



Figuur 27. Eerste situatie onderzocht met WMM. De situatie zoals deze aangeleverd zou worden met GIS (links boven) de manier waarop deze vertaald wordt naar een graaf met uniek genummerde knopen en de mogelijke verbindingen (rechts boven) en de uitkomsten van de WMM-optimalisatie op basis van de wiskundige formulering (onder) waarbij de gekleurde verbindingen daadwerkelijk gebruikt worden (volumestroom weergegeven in de kaders).

Het is belangrijk om te vermelden dat de systeemconfiguratie met de minimale uitstoot niet uniek is. Aangezien de gebruikte uitstootfuncties voor transport (per tak) en zuivering (per knoop) in dit voorbeeld gelijk zijn, bestaan er meerdere systeemconfiguraties waarmee aan de watervraag voldaan kan worden met een totaal van zes leidingen en twee zuiveringslocaties (zie Figuur 28). Wanneer WMM toegepast zou worden op een reële casus is de kans dat deze situatie zich zou voordoen zeer klein, omdat de kostenfuncties per tak en per locatie gedefinieerd zouden worden. De verschillen in afstand tussen de knopen (die nu achterwege gelaten zijn) zouden ervoor zorgen dat er variatie ontstaat in de transportkosten, wat zou resulteren in een optimale oplossing.

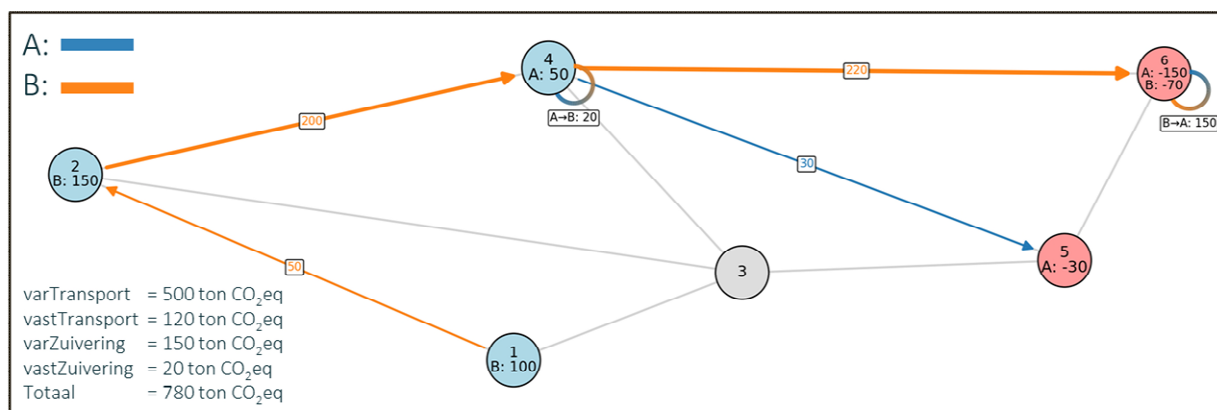


Figuur 28. Voorbeeld van meerdere systeemconfiguraties met gelijke uitstoot op basis van gelijke kostenfuncties per verbinding en zuivering

8.2 Situatie 2: verandering in vaste kosten voor transport

In deze tweede situatie onderzoeken we het effect van hogere investeringskosten voor het aanleggen van leidingen op de uiteindelijke systeemconfiguratie. We passen de investeringskosten voor transport aan van 10 ton CO₂eq naar 30 ton CO₂eq. Het effect hiervan is dat de totale uitstoot voor de optimale systeemconfiguratie met 15% toeneemt van 680 ton CO₂eq naar 780 ton CO₂eq. Gezien de hoge investeringskosten is het niet meer rendabel om parallelle leidingen aan te leggen. Dit betekent dat er op knoep 4 water van kwaliteit A gemengd wordt met

kwaliteit B (dit resulteert in water van kwaliteit B, spelregel 6) dat vervolgens getransporteerd en gezuiverd wordt bij knoop 6 (zie Figuur 29).



Figuur 29. Optimale systeemconfiguratie voor Situatie 2 in de WMM-demo

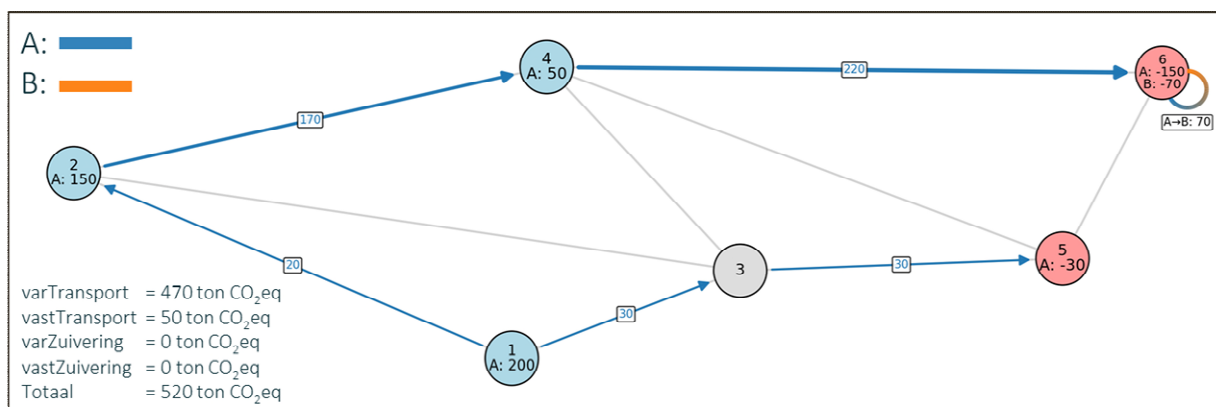
8.3 Situatie 3: veranderingen in waterbeschikbaarheid

In deze derde situatie onderzoeken we wat er gebeurt als de waterbeschikbaarheid bij de bronnen zou veranderen. Als gevolg van aangescherpte milieunormen bovenstrooms neemt de hoeveelheid en kwaliteit van het beschikbare water bij knoop A toe, en verandert de kwaliteit van het beschikbare water bij knoop 2 van kwaliteit B naar kwaliteit A (zie Tabel 5). De kosten voor transport worden weer gelijkgesteld aan Situatie 1.

Tabel 5. Waterbeschikbaarheid bij de bronnen in de WMM-demo voor Situatie 1 en Situatie 2

Knoop	Situatie 1		Situatie 2	
	Kwaliteit A	Kwaliteit B	Kwaliteit A	Kwaliteit B
1	-	100	200	-
2	-	150	150	-

De systeemconfiguratie met de minste CO₂-uitstoot is er een waarbij vijf leidingen worden aangelegd en de watervraag naar kwaliteit B bij knoop 6 voldaan wordt met water van kwaliteit A (zie Figuur 30). Ook hier zijn er meerder configuraties met vijf leidingen mogelijk met dezelfde totale uitstoot.



Figuur 30 Optimale systeemconfiguratie voor Situatie 3

8.4 Bevindingen WMM-demo

Door de bovenstaande situaties met de deelnemers van de workshops te doorlopen zijn een aantal waardevolle inzichten opgedaan:

- De uitleg van de aannames, randvoorwaarden en modelopbouw is een essentieel moment in het proces om te waarborgen dat iedereen het systeem op dezelfde manier en met voldoende diepgang begrijpt. De vragen en discussiepunten die in dit stadium naar boven komen laten zien dat het onmogelijk is om alle randvoorwaarden en uitgangspunten van tevoren (d.w.z. door de onderzoekers) vast te stellen en dat dit met de eindgebruikers gedaan moet worden. Een dergelijke demo, die behapbaar en navolgbaar is, biedt deelnemers de kans om hun specifieke domeinkennis in het kader van een optimalisatieprobleem te plaatsen. Op basis hiervan kunnen de randvoorwaarden en de doelfuncties worden aangescherpt. Dit impliceert ook dat een succesvolle implementatie van WMM staat of valt bij de manier waarop de parameters, randvoorwaarden en doelfuncties samen met stakeholders gedefinieerd worden.
- De optimale oplossing op zich is net zo relevant als de uitleg ervan. Vooral wanneer er in eerste instantie contra-intuïtieve uitkomsten zijn, dan is het waardevol om deze uit te kunnen leggen aan de hand van de spelregels die van tevoren bepaald zijn. In Situatie 2 wordt water eerst gemengd voor transport om vervolgens weer gezuiverd te worden. Dit gedrag kan vervolgens uitgelegd worden op basis van de veranderingen in de investeringskosten ten opzichte van de eerste situatie en de spelregel die stelt dat de menging van kwaliteit A met kwaliteit B resulteert in kwaliteit B.
- De manier waarop WMM omgaat met menging van stromen in het systeem moet duidelijk in de beginstadia duidelijk gemaakt en beargumenteerd worden op basis van voorbeelden om te laten zien dat het gebruik van massabalansen niet nodig is in de verkennende fase waar WMM voor gebruikt wordt. Een mogelijke manier om dit te doen is door de kwaliteitsklassen te stresstesten en na te gaan of de uitkomsten representatief zijn voor de praktijk.
- Afhankelijk van de aanwezigheid is het nodig en waardevol om de technische werking van het model toe te lichten en te laten zien om vertrouwen in de uitkomsten op te bouwen.
- Deelnemers bemerken direct dat de tijdscomponent achterwege is gelaten en dat dit essentieel is in een werkelijke situatie. De intentie van WMM is om het tijdsaspect wel mee te nemen, maar het is dus ook waardevol om dit aspect ook al in de demo op te nemen.
- De manier waarop een ontwerp uit WMM gecommuniceerd wordt binnen en buiten de sector vraagt om nuance. Dit voorkomt dat resultaten een eigen leven gaan leiden en zorgt ervoor dat strategen binnen de drinkwaterbedrijven de regie behouden.
- De sector is op zoek naar doelfuncties die niet alleen op monetaire kosten gebaseerd zijn. Zijn er bijvoorbeeld mogelijkheden om (verlies aan) biodiversiteit dusdanig te kwantificeren dat deze gebruikt kunnen worden binnen de doelfunctie of de randvoorwaarden?
- De flexibiliteit van de probleemdefinitie is een waardevol aspect van WMM, maar vergt ook de nodige aandacht om de werking hiervan over te brengen.

9 Vervolgstappen en onderzoeksopgave

In het voorgaande hoofdstuk is een voorbeeld gegeven van een WMM-optimalisatie op kleine schaal. Hieronder worden een aantal vervolgstappen beschreven die nodig zijn om WMM van ‘proof of concept’ in het verkennend onderzoek naar implementatie te brengen.

9.1 Netwerkopgave

In de bovenstaande methodologie is invoer vanuit de praktijk nog niet of nauwelijks geïntegreerd. Een belangrijke vervolgstap is dus het betrekken van de uiteindelijke eindgebruikers in een iteratief proces om vanuit de beschreven basis WMM uit te bouwen tot een bruikbaar model voor besluitvorming. De beschreven denkwijze, methodologie en synthetische demo zijn gebruikt om een dialoog over bedrijfsgrensoverstijgende waterverdeling op te starten en de mogelijkheden voor optimalisatie te illustreren. Op basis van deze interacties en de opgedane kennis tijdens de workshops wordt een proces voorzien waarin de sector betrokken blijft bij de verdere theoretische ontwikkeling van het WMM-concept en de uiteindelijke tooling die aansluit bij de behoeftes van de eindgebruikers. Dit kan bereikt worden door samen met de eindgebruikers een reële WMM-casus op te zetten met als doel:

- Inzicht te krijgen in de rol die een ontwerptool/ontwerpmodel als WMM kan spelen;
- Meer inzicht te krijgen in de belangen en uitgangspunten welke meegenomen moeten kunnen worden in een tool als WMM;
- Inzicht en ervaring rond het formeren en functioneren van een ontwerpgroep dat gebruikt maakt van een tool als WMM.

9.2 Oplossingsmethode

Zoals besproken in hoofdstuk 0 zijn er verschillende manieren om een combinatorisch optimalisatieprobleem in een watersysteem op te lossen. Afhankelijk van de complexiteit, linearisatiemogelijkheden en schaal van het probleem kan er gekozen worden voor exacte methodes dan wel benaderingsmethodes (zie Figuur 20). Naarmate de schaal van het probleem toeneemt en het wenselijk wordt om meerdere doelen tegelijk te optimaliseren, zal de voorkeur bij methodes op basis van benadering liggen. Het voorbeeld dat geschetst is in hoofdstuk 8 is een kleinschalig voorbeeld van het probleem dat het WMM-model dient op te lossen. Op deze schaal is de toegepaste en snel te implementeren exacte methode voldoende om tot een optimale oplossing te komen. Het is de verwachting dat voor daadwerkelijke implementatie van WMM op regionaal of landelijk niveau de overstap naar meta-heuristiek, zoals een evolutionair algoritme, noodzakelijk kan zijn. In dit geval blijft de algemene formulering van het probleem hetzelfde, maar wordt het op een andere manier opgelost. Dit is vergelijkbaar met het handelsreizigersprobleem, dat opgelost kan worden met exacte methodes (Roberti & Toth, 2012) of met heuristiek (Halim & Ismail, 2019).

9.3 Doelfuncties en randvoorwaarden

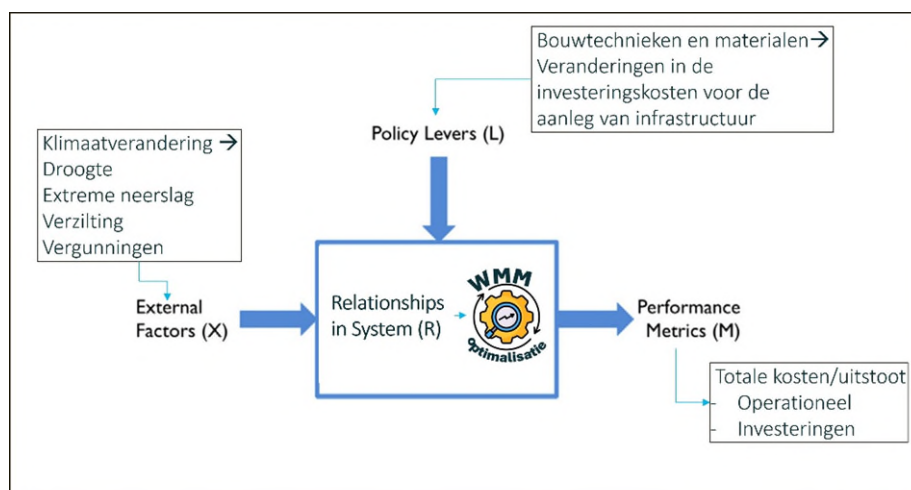
De opgestelde doelfunctie en de randvoorwaarden van een optimalisatieprobleem bepalen welke aspecten wel of niet meegewogen worden in de uitkomsten. In de synthetische demo is ervoor gekozen om de doelfunctie te

beperken tot een enkele waarde (CO₂-uitstoot) die geminimaliseerd dient te worden. Tijdens de demo werd door de deelnemers aangekaart dat uitbreiding hiervan wenselijk is voor daadwerkelijke implementatie, met de mogelijke effecten op biodiversiteit als voorbeeld. Naast fysieke eigenschappen zoals kosten of milieu-impact kan het ook waardevol zijn om andere aspecten mee te nemen in de evaluatie. De randvoorwaarden en doelfunctie in de synthetische demo zullen hoogstwaarschijnlijk alleen vertakte netwerken genereren omdat deze doorgaans de minste infrastructuur nodig hebben. In sommige gevallen kan het echter wenselijk zijn om delen van het netwerk vermaasd aan te leggen om redundantie in te bouwen tegen storingen. Dit kan bereikt worden door de randvoorwaarden van het optimalisatieprobleem aan te passen, bijvoorbeeld door op bepaalde knopen te bepalen dat er altijd minstens twee actieve verbindingen moeten zijn, of door vast te stellen dat de totale hoeveelheid opslag (ongeacht de locatie) aan een minimum moet voldoen, of door een faalscenario-evaluatie onderdeel van de optimalisatie te maken. Wanneer de vereisten voor concepten als veerkracht, robuustheid of flexibiliteit dusdanig uitgewerkt en gedefinieerd zijn dat ze gekwantificeerd kunnen worden, is het ook mogelijk om deze mee te nemen binnen de WMM-optimalisatie. In eerste instantie kunnen de prestaties op deze gebieden achteraf berekend worden, terwijl de optimalisatie gebaseerd blijft op een andere doelfunctie. Vervolgens kunnen de concepten omgezet worden in randvoorwaarden en/of meegenomen worden in de doelfuncties.

In het algemeen kan gesteld worden dat het voor flexibel gebruik van WMM van belang is dat een gebruiker doelfuncties en randvoorwaarden flexibel kan definiëren en aanscherpen. De implementatie van doelfuncties en randvoorwaarden binnen een Python-omgeving is over het algemeen echter niet toegankelijk voor de meeste eindgebruikers, en de structuur van kostenfuncties die centraal staat binnen MILP zal niet altijd aansluiten bij de belevingswereld. Dit maakt het moeilijk om interactief en iteratief scenario's te onderzoeken. Het omzetten van doelen en uitgangspunten van beslissers naar effectieve kostenfuncties is een punt van aandacht voor vervolgonderzoek. Idealiter worden de verschillende opties voor de doelfuncties en randvoorwaarden geactiveerd/aangepast door een simpele verzameling van commando's of een GUI, waarbij de vertaling naar de MILP-context vervolgens achter de schermen gebeurt.

9.4 Onzekerheid

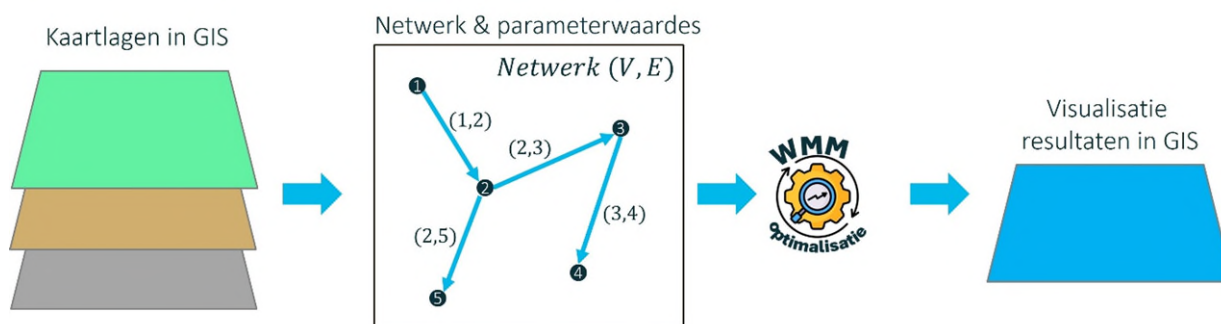
Met de beschreven modelopbouw kan onzekerheid onderzocht worden door een onzekerheidsmarge of scenario's rondom de input waardes vast te stellen en hier vervolgens een sample van inputwaardes mee te genereren waarmee WMM gedraaid wordt. Vervolgens kan er voor elke beslisvariabele berekend worden onder welke omstandigheden deze doorgaans wel of niet geactiveerd worden. Elke zuivering, transporttak en opslag is gekoppeld aan een binaire variabele waarmee bepaald wordt of deze wel of niet gebruikt/gebouwd dient te worden. Op basis van de frequenties, idealiter uitgesplitst per scenario, kan er een eerste inschatting gemaakt worden van de infrastructuur die hoogstwaarschijnlijk nodig is. Bovenstaande procedure kan uitgevoerd worden met de EMA workbench (Kwakkel, 2017), die specifiek is ontwikkeld om te onderzoeken wat het effect van externe factoren en verschillende beleidskeuzes kunnen zijn op de prestaties van een systeem. Dit wordt gedaan op basis van het XLRM framework (zie Figuur 31). De impact van de factoren welke beïnvloedbaar zijn (*policy levers*) en de factoren buiten het handelingsperspectief van de besluitnemer (*external factors*) worden systematisch onderzocht en gekoppeld aan hun effect op de prestaties van het systeem (*performance metrics*). De uitkomsten kunnen gebruikt worden om na te gaan welke systeemconfiguratie en infrastructuur het meest robuust is binnen een ensemble van mogelijke toekomstsituatie, maar ook om te identificeren welke scenario's het meest problematisch zijn om vervolgens te monitoren hoe de werkelijkheid zich ontwikkelt en te sturen op adaptatie.



Figuur 31. Voorbeeld van de toepassing van WMM binnen het XLRM framework, aangepast uit (Kwakkel, 2017)

9.5 Koppeling met GIS voor invoerdata

In veel DSS-modellen voor waterverdeling worden GIS-methoden gekoppeld aan het beslismodel. Dit maakt het voor gebruikers intuïtiever omdat het een fysieke omgeving laat zien en maakt mogelijk voor besluitvormers om op een interactieve manier met het model te werken en verschillende scenario's te onderzoeken. In het geval van WMM zou de koppeling met GIS het vooral mogelijk moeten maken om de invoerdata op te halen en voor te bewerken en deze gereed te maken voor de optimalisatie en vervolgens de resultaten te visualiseren, de optimalisatie gebeurt niet binnen GIS zelf (zie Figuur 32). Binnen GIS kunnen op een makkelijke manier extra knopen, takken, en hun parameterwaardes toe te voegen op een interactieve kaart. Vanuit deze interactieve omgeving is het wenselijk dat de invoertabellen voor de optimalisatie automatisch gegenereerd worden aan het optimalisatieprobleem. Binnen de GIS-omgeving kunnen ook automatisch randvoorwaarden aan de knopen en takken toegevoegd worden. Wanneer er bijvoorbeeld in de GIS-omgeving een tak ingetekend wordt tussen twee locaties met een significant hoogteverschil of door een natuurgebied, kan het effect hiervan op de transportkosten (verhoogde pompkosten en bouwkosten) automatisch toegevoegd worden aan de kostenfunctie. Na de optimalisatie is het wenselijk dat de resultaten automatisch via dezelfde GIS-omgeving gevisualiseerd worden. Net als tijdens de demo waarbij de werking van de optimalisatie getest werd, is het van belang om een simpele invoeromgeving voor de gebruikers te testen aan de hand van een GIS-interface.



Figuur 32 Visualisatie van de integratie van GIS met WMM

9.6 Waterkwaliteit

In de huidige versie van de WMM is de waterbehandeling vereenvoudigd opgenomen. In volgende ontwikkelingen zijn parameterfuncties nodig, per mismatch in waterkwaliteit, als een benadering om waterbehandeling in de

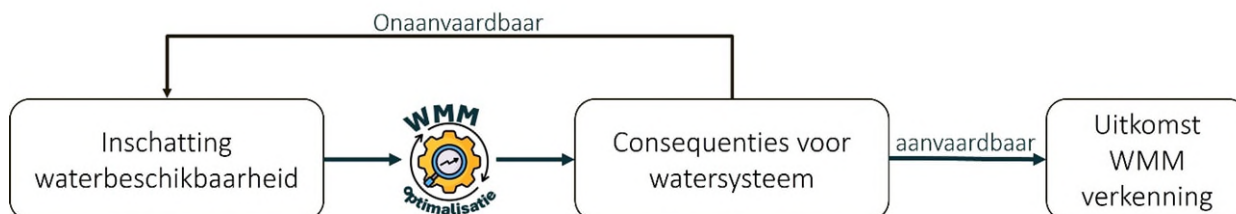
WMM te integreren. Het gebruik van parameterfuncties is een algemene benadering die gebaseerd is op gepubliceerde gegevens, waardoor het niet nodig is om in een planningsfase een volledig ontwerp van een water- of afvalwaterzuiveringsinstallatie te maken.

Deze parameterfuncties moeten uit de literatuur worden verzameld. Voorts moet de voorgestelde aanpak in bijlage II, te beginnen met de definitie van waterkwaliteitsklassen, worden besproken met en gecontroleerd door wetenschappers uit andere kennisgebieden om hier overeenstemming over te bereiken. De conceptuele benadering op basis van de waterbehandelingsmatrix (Tabel 9) moet uitvoeriger getoetst worden vanuit meerdere specialisaties. De uitkomst van de discussies moet duidelijk maken welke kwaliteitsmismatches verder moeten worden onderzocht om parameterfuncties te identificeren die in de WMM kunnen worden geïntegreerd.

Verder moeten de factoren die van invloed zijn op de parameter worden gedefinieerd, op basis van literatuur of advies van deskundigen. Wanneer de factoren zijn overeengekomen, kunnen parameterfuncties worden opgesteld voor elke cel van de zuiveringsmatrix of in ieder geval voor de meest relevante combinatie van bron en toepassing.

9.7 Waterbeschikbaarheid vooraf en achteraf

In de demo beschreven in dit rapport wordt waterbeschikbaarheid van tevoren ingeschat een meegegeven als vaste invoerwaardes voor de optimalisatie. In werkelijkheid is waterbeschikbaarheid afhankelijk dynamisch en afhankelijk van wat er elders in het systeem gebeurt; een onttrekking op locatie A heeft invloed op locatie B. Uiteindelijk is het aan beleidsmakers om te bepalen of deze invloed acceptabel is. Interacties van dit type kunnen vandaag de dag nog maar beperkt in WMM meegenomen worden omdat handzame (niet te rekenintensieve) hydrologische modellen hiervoor ontbreken. WMM zou dergelijke modellen kunnen gebruiken om hydrologische interacties tussen bronnen recht te doen wanneer die eenmaal ontwikkeld zijn, maar dergelijke ontwikkeling blijft vooralsnog een onderzoekopgave. Wel kan er, op dit moment, op basis van de uitkomst van de optimalisatie achteraf nagegaan worden of er onverwachte en onaanvaardbare effecten optreden in het watersysteem om waar nodig de invoerwaardes aan te passen. Dit kan in een iteratief proces herhaald worden (zie Figuur 33).



Figuur 33 Iteratief proces om de consequenties van een WMM-verkenning op het watersysteem te testen

10 Conclusies en aanbevelingen

Het idee achter WMM is ontstaan naar aanleiding van de uitdagingen rondom de watertransitie en de hypothese dat de huidige ontwerpmethodes hiervoor ontoereikend zullen zijn. Het concept/methode ontwikkeld in dit project is bedoeld om besluitvorming rondom waterverdeling en infrastructuur te ondersteunen. Dit wordt gedaan door een flexibele model opzet waarmee recht gedaan kan worden aan kennis vanuit verschillende domeinen. Kennis en simulaties van het (lokale) hydrologisch systeem, gevoeligheden rondom omgevingsvraagstukken, en prijskaartjes rondom infrastructuur komen samen in een systematische aanpak waarmee een overzicht van de huidige situatie geboden wordt en opties richting de toekomst onderzocht en geoptimaliseerd kunnen worden. WMM is geschikt om kennis uit verschillende disciplines samen te brengen en op strategisch niveau na te denken over het toekomstige watersysteem van Nederland. In de rest van dit hoofdstuk volgen de voorlopige conclusies en aanbevelingen voor de onderzoekslijn waarvan dit project het startschot is.

10.1 Conclusies

De mismatch tussen watervraag en -aanbod, zowel in ruimte, tijd als in kwaliteit, vraagt om een structurele en overzichtelijke ontwerpaanpak waarin de wensen en uitgangspunten van de betrokken partijen expliciet en meegenomen kunnen worden. Een bedrijfsgrensoverstijgende waterverdeling is een kansrijke strategie om met deze mismatches om te gaan, maar realisatie hiervan vereist innovatie op meerdere vlakken. Een van deze innovaties is het ontwikkelen van een modelmatige, kwantitatieve aanpak die de dilemma's rond een dergelijke waterverdeling bespreekbaar maakt. Water Matchmaker (WMM) is een kwantitatief model dat ontwikkeld is om dilemma's rondom deze mismatches te verkennen.

WMM is bedoeld om te onderzoeken welke combinaties van bronnen, zuivering, opslag en transport mogelijk zijn om watervraag en -aanbod bij elkaar te brengen en welke infrastructuur daarbij nodig is. De vertrekpunten hierbij zijn dat een mismatch in ruimte opgelost kan worden met transport, een mismatch in tijd met opslag, en een mismatch in kwaliteit met zuivering. Andere modellen en benaderingen op het gebied van waterverdeling en infrastructuur zijn niet geschikt voor dit vraagstuk omdat ze doorgaans een waterverdeling optimaliseren op basis van alleen bestaande infrastructuur of een te hoog detailniveau hanteren (hydraulica en massabalansen voor waterkwaliteit). Dit maakt deze benaderingen niet flexibel genoeg te zijn voor gebruik in de context van bedrijfsgrens overstijgende waterverdeling op hoofdlijnen.

In WMM wordt het watersysteem weergegeven met een graaf met meerdere lagen, waarbij elke laag gereserveerd is voor een specifieke waterkwaliteit. Veelvoorkomende systeemelementen worden voorgeprogrammeerd in de vorm van samengestelde knopen en hebben specifieke functies in het systeem. De prestatie van het systeem wordt vervolgens bepaald op basis van de beoordelingscriteria die voor elke handeling (transport, zuivering, opslag) in het systeem berekend wordt. De keuze voor zuivering gebeurt op basis van waterkwaliteitsklassen, omdat deze aanpak een betere weerspiegeling van de praktische implementatie geeft dan op basis van massabalansen. De uitkomsten van de demo bevestigen de noodzaak van het ontwerp van een bedrijfsoverstijgende waterverdeling: kleine verschillen in de inputwaardes en randvoorwaardes hebben significante effecten op de manier waarop het systeem ingericht wordt.

De ontwikkelde demo en gerelateerde workshops laten zien dat de aanloop naar de daadwerkelijke optimalisatie net zo belangrijk is als de uitkomst ervan. Er moet voldoende overeenstemming zijn over de uitgangspunten,

randvoorwaardes en de gebruikte beoordelingscriteria om vertrouwen in een optimalisatiemodel te krijgen en om de uitkomsten op een zinnige manier te kunnen interpreteren. Vanuit een dergelijk gedeeld startpunt kan een iteratief proces ontstaan waarbij de effecten van veranderingen in de inputwaardes en uitgangspunten onderzocht kunnen worden.

10.2 Aanbevelingen

Voor implementatie van WMM in de praktijk gelden op hoofdlijnen twee typen aanbevelingen: de technische implementatie en het proces met de eindgebruikers.

Op moment van schrijven heeft de integratie tussen de zuiveringsmodule (zie Hoofdstuk 0) en de opslagmodule (zie Bijlage III) binnen WMM nog niet plaatsgevonden. Enkel de zuiveringsmodule is genoeg om met eindgebruikers aan een synthetische demo te werken en bekendheid met de WMM-methodiek te creëren. Zonder de mogelijkheid voor opslag sluiten de resultaten echter onvoldoende aan bij de realiteit. Naast de technische integratie van deze twee modules is het ook nodig om een effectieve manier te vinden waarop de tijdscomponent en opslag meegenomen kunnen worden in de werksessies waarbij gebruikers met WMM aan de slag gaan. Hiernaast wordt er nog geen terugkoppeling gemaakt tussen de resultaten van de optimalisatie, de consequenties op het watersysteem, en de invoerwaardes voor waterbeschikbaarheid. De aanbeveling is om in eerste instantie meer ervaring op te doen over de manier waarop gebruikers met WMM hun vraagstukken kunnen onderzoeken voordat verdere ontwikkeling plaatsvindt.

Flexibiliteit van het model moet centraal blijven staan. Tijdens de workshops en de demo werd meermaals gevraagd wat er allemaal met WMM mogelijk was, en of bepaalde aspecten ook met WMM onderzocht kunnen worden. Dit benadrukt de potentie en urgentie van WMM maar vereist ook dat verdere ontwikkeling aansluit bij de belevingswereld van de gebruiker. Een belangrijk deel hiervan is de systematische uitbouw van de voorgeprogrammeerde systeemcomponenten in de vorm van samengestelde knopen. Dit moet dusdanig gebeuren dat gebruikers makkelijk kunnen experimenteren op hogere aggregatieniveaus terwijl het mogelijk blijft om op detailniveau de eigenschappen van individuele locaties aan te passen.

Het succes van WMM staat of valt bij het proces dat de gebruikers doorlopen wanneer ze ermee werken. De interne werking van WMM moet voldoende transparant zijn, zodat de dialoog kan gaan over de relevante scenario's, aannames en invoerwaardes waar het model mee werkt. Hiervoor is het nodig om inzicht te krijgen in de rol welke WMM kan spelen binnen organisaties, duidelijkheid te krijgen over de belangen en uitgangspunten van verschillende stakeholders en of deze voldoende meegenomen kunnen worden binnen WMM, en ervaring met de manier waarop een ontwerpgroep met een dergelijke tool kan werken.

11 Referenties

- Buishand, T. A., De Martino, G., Spreeuw, J. N., & Brandsma, T. (2013). Homogeneity of precipitation series in the Netherlands and their trends in the past century. *International Journal of Climatology*, 33(4), 815–833. <https://doi.org/10.1002/joc.3471>
- Candido, L. A., Coêlho, G. A. G., de Moraes, M. M. G. A., & Florêncio, L. (2022). Review of Decision Support Systems and Allocation Models for Integrated Water Resources Management Focusing on Joint Water Quantity-Quality. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001496](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001496)
- CBS. (2024). *Bevolkingskernen in Nederland*. <https://www.cbs.nl/nl-nl/dossier/nederland-regionaal/regionale-statistieken/bevolkingskernen-in-nederland#:~:text=In%20totaal%20telt%20Nederland%20zo%27n%20%20200%20bevolki,ngskernen>.
- Connecticut Department of Energy and Environmental Protection. (2010). *Water Quality Classifications*. www.cteco.uconn.edu
- de Wit, J. A., van Dam, J. C., Heijmans, T. H. H., van Huijgevoort, M. H. J., Ritsema, C. J., & Bartholomeus, R. P. (2026). Subsurface Irrigation in Regional Water Management: a System Dynamics Approach to Support Decision Making. *Water Resources Management*, 40(3). <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04393-2>
- Dogan, M. S., Fefer, M. A., Herman, J. D., Hart, Q. J., Merz, J. R., Medellín-Azuara, J., & Lund, J. R. (2018). An open-source Python implementation of California's hydroeconomic optimization model. *Environmental Modelling and Software*, 108, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.002>
- Draper, A. J., Munévar, A., Arora, S. K., Reyes, E., Parker, N. L., Chung, F. I., & Peterson, L. E. (2004). CalSim: Generalized Model for Reservoir System Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(6), 480–489. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:6\(480\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:6(480))
- Global Water Partnership. (2004). *Catalyzing change : a handbook for developing integrated water resources management (IWRM) and water efficiency strategies*. Global Water Partnership Secretariat.
- Haimes, Y. (1971). On a Bicriterion Formulation of the Problems of Integrated System Identification and System Optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-1(3), 296–297. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1971.4308298>
- Halim, A. H., & Ismail, I. (2019). Combinatorial Optimization: Comparison of Heuristic Algorithms in Travelling Salesman Problem. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26(2), 367–380. <https://doi.org/10.1007/s11831-017-9247-y>
- Harou, J. J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D. E., Medellín-Azuara, J., Lund, J. R., & Howitt, R. E. (2009). Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. In *Journal of Hydrology* (Vol. 375, Numbers 3–4, pp. 627–643). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>
- Hellsten, E., Koza, D. F., Contreras, I., Cordeau, J. F., & Pisinger, D. (2021). The transit time constrained fixed charge multi-commodity network design problem. *Computers and Operations Research*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105511>

- Hofman-Caris, C. H. M., Stofberg, S. F., van Alphen, H. J., de Waal, L., & van Huijgevoort, M. H. J. (2019). *Radicaal nieuwe bronnen voor drinkwater* (Number BTO 2019.019). <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/59958049>
- Janga Reddy, M., & Nagesh Kumar, D. (2020). Evolutionary algorithms, swarm intelligence methods, and their applications in water resources engineering: A state-of-the-art review. In *H2Open Journal* (Vol. 3, Number 1, pp. 135–188). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2020.128>
- Jha, M. K., & Gupta, A. Das. (2003). Application of Mike Basin for Water Management Strategies in a Watershed. *Water International*, 28(1), 27–35. <https://doi.org/10.1080/02508060308691662>
- Judd, S., & Turan, F. (2019). Sidestream vs immersed membrane bioreactors: A cost analysis. *91st Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference, WEFTEC 2018*, 3722–3733. <https://doi.org/10.2175/193864718825136008>
- KNMI. (2023). *KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland* (Numbers 23–03). https://cdn.knmi.nl/system/ckeditor/attachment_files/data/000/000/357/original/KNMI23_klimaatscenario's_gebruikersrapport_23-03.pdf
- Krajenbrink, H. J., & Stofberg, S. F. (2023). *Effect van waterbesparing in stedelijk gebied op het regionale watersysteem. Casus SUPERLOCAL* (Number KWR 2023.062). <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/71379162>
- Krajenbrink, H. J., Stofberg, S. F., & Bartholomeus, R. P. (2021). *RWZI als waterfabriek voor een robuuste watervoorziening* (Number STOWA 2021-31). <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/62853272>
- Krauss, C., Fernandez, M., Penn, I., & Rojas, R. (2021, February 21). How Texas' Drive for Energy Independence Set It Up for Disaster. *The New York Times*.
- Kwakkel, J. H. (2017). The Exploratory Modeling Workbench: An open source toolkit for exploratory modeling, scenario discovery, and (multi-objective) robust decision making. *Environmental Modelling and Software*, 96, 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.054>
- Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017). *Water Resource Systems Planning and Management*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
- Marchau, V. A. W. J., Walker, W. E., Bloemen, P. J. T. M., & Popper Editors, S. W. (2019). *Decision Making under Deep Uncertainty*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2>
- Mehdi, M. (2011). *PARALLEL HYBRID OPTIMIZATION METHODS FOR PERMUTATION BASED PROBLEMS*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00841962>
- Pendergrass, A. G., Knutti, R., Lehner, F., Deser, C., & Sanderson, B. M. (2017). Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17966-y>
- Phan, T. D., Bertone, E., & Stewart, R. A. (2021). Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management. *Cleaner Environmental Systems*, 2, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100031>
- ProGEA S.r.l. (2004). *The WaterStrategyMan DSS A Comprehensive Decision Support System for the Development of Sustainable Water Management Strategies*. https://environ.chemeng.ntua.gr/wsm/Uploads/Deliverables/ThirdYear/Deliverable_21_4.pdf
- RIVM. (2023). *Waterbeschikbaarheid voor de bereiding van drinkwater tot 2030-knelpunten en oplossingsrichtingen*. <https://doi.org/DOI 10.21945/RIVM-2023-0005>

- RIVM. (2024). *Bevolking | Regionaal | Volksgezondheid en Zorg*.
<https://www.vzinfo.nl/bevolking/regionaal>
- Roberti, R., & Toth, P. (2012). Models and algorithms for the Asymmetric Traveling Salesman Problem: an experimental comparison. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 1(1–2), 113–133. <https://doi.org/10.1007/s13676-012-0010-0>
- Sieber, J. (2015). *Water Evaluation And Planning System USER GUIDE for WEAP 2015*.
<http://www.weap21.org><http://www.sei-us.org>
- Stofberg, S. F., & van Huijgevoort, M. H. J. (2024a). *De Watersysteemverkenner v0.1 - Inzicht in interacties binnen watersysteem en waterketen* (Number KWR 2024.013).
<https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/72231518>
- Stofberg, S. F., & van Huijgevoort, M. H. J. (2024b). *Inzicht in het watersysteem door toepassing van een systeemmodel* (Number BTO 2024.015).
<https://library.kwrwater.nl/publication/71685248/inzicht-in-het-watersysteem-door-toepassing-van-een-systeemmodel/>
- Stofberg, S. F., van Huijgevoort, M. H. J., Krajenbrink, H. J., & Brakkee, E. A. (2024). *Interventies in het watersysteem* (Number BTO 2024.017).
- Tomlinson, J. E., Arnott, J. H., & Harou, J. J. (2020). A water resource simulator in Python. *Environmental Modelling and Software*, 126.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104635>
- van Aalderen, N., van Berkel, F., van der Roest, E., Meekel, N., & van den Berg, R. T. A. (2023). *GRROW: Generational Radical Rethinking of the Watersector* (Number BTO 2023.033).
- van der Krogt, W. N. M., & Boccalon, A. (2013). *River Basin Simulation Model RIBASIM Version 7.00 User Manual*.
- van der Wiel, K., Beersma, J., van den Brink, H., Krikken, F., Selten, F., Severijns, C., Sterl, A., van Meijgaard, E., Reerink, T., & van Dorland, R. (2024). KNMI'23 Climate Scenarios for the Netherlands: Storyline Scenarios of Regional Climate Change. *Earth's Future*, 12, e2023EF003983. <https://doi.org/10.1029/2023EF003983>
- Van Thienen, P., & Vertommen, I. (2015). Gondwana: a generic optimization tool for drinking water distribution systems design and operation. *Procedia Engineering*, 119, 1212.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.978>
- van Waterschappen, U., & Vewin. (2021). *Water verbindt*. <https://unievandwaterschappen.nl/wp-content/uploads/2021/11/Samenwerkingsagenda-Water-verbindt.pdf>
- Vertommen, I., Van Laarhoven, K., Willet, J., Krajenbrink, H. J., Lousada Ferreira, M., Pronk, G., & Laterveer- de Beer, M. (2025, December). Water matchmaker: systeemperspectief in de watertransitie. *H2O*, 21. <https://www.h2owaternetwerk.nl/water-matters/water-matters-december-2025>
- Vewin. (2022). *Dutch Drinking Water Statistics 2022 From source to tap*. www.vewin.nl.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 - A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Part 1: Model Characteristics. *Water International*, 30(4), 487–500. <https://doi.org/10.1080/02508060508691893>
- Yazdani, M., van Thienen, P., Stofberg, S. F., van Huijgevoort, M. H. J., & Bartholomeus, R. P. (2026). Managed Aquifer Recharge: Modeling approaches to integrated assessment of groundwater interventions. In *Groundwater for Sustainable Development* (Vol. 32). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101552>

I Workshop fase I

I.1 Opzet

Binnen het watermatchmaker-project is een workshop georganiseerd om de expertise binnen KWR te bundelen op het gebied van water vraag en aanbod. In deze bijlage wordt de opzet van de workshop uitgewerkt.

Doel van de workshop: kennis en expertise uit verschillende disciplines binnen KWR samen te brengen en zoveel mogelijk relevante factoren en aandachtspunten ('puzzelstukjes') in kaart brengen die in acht moeten worden genomen om vraag en aanbod met elkaar in balans te brengen.

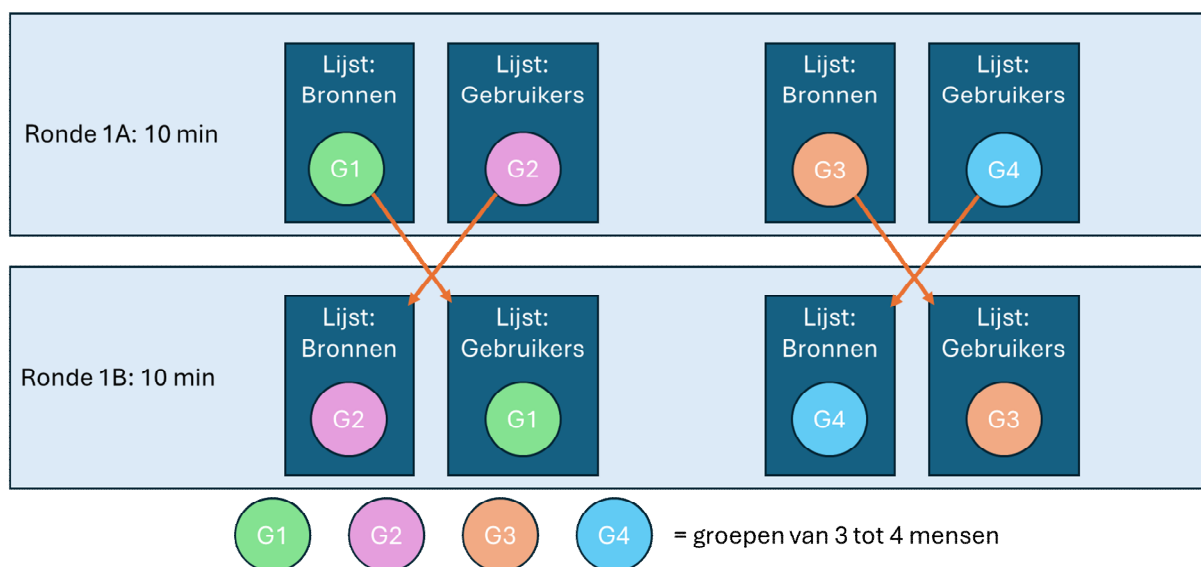
Voorbereiding/huiswerk voor de experts: nadenken over de verschillende waterbronnen (inclusief alternatieve) en watergebruikers in Nederland.

Wat zijn hun:

- eigenschappen;
- belangen;
- verwachtingen;
- toekomstperspectieven/scenario's?

De workshop: tijdens de workshop werken we in groepjes van 3 à 5 mensen in verschillende rondes om de 'puzzelstukjes' in kaart te brengen. Tussen de verschillende rondes koppelen we de bevindingen terug met de hele groep.

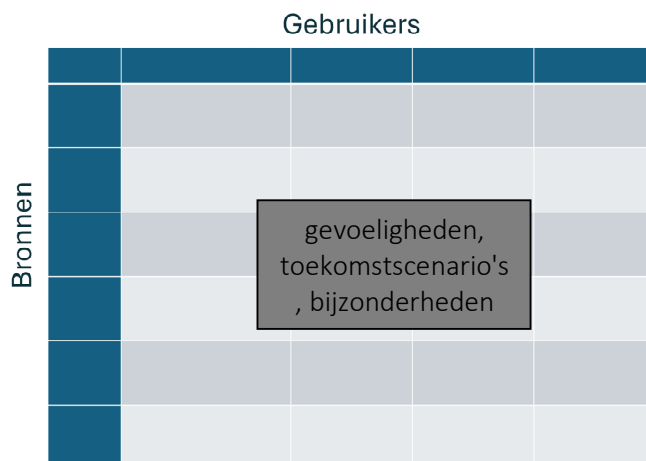
Tijdens de eerste ronde van de workshop vragen we de deelnemers om een overzicht te maken van bronnen en gebruikers en hun meest belangrijke aspecten. Binnen de eerste ronde wisselen de deelnemers eenmaal van groep om kruisbestuiving van ideeën te bevorderen. De opzet van de eerste ronde is weergegeven in Figuur 34.



Figuur 34. Opzet van de eerste ronde van de workshop

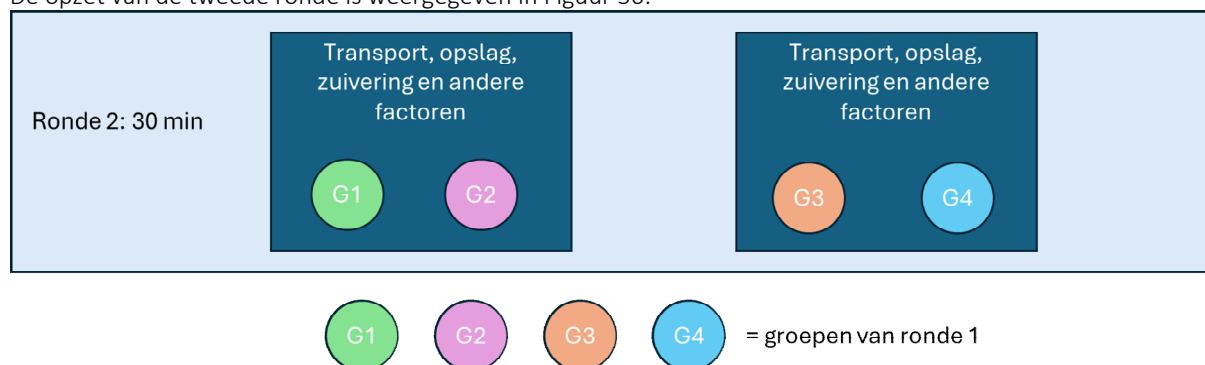
De uitkomst van de eerste ronde is een lijst van bronnen en gebruikers. Voor zover mogelijk wordt er aangegeven welke aandachtspunten er zijn voor elk van de items.

In de tweede ronde van de workshop vragen we de deelnemers om een matrix in te vullen met de bronnen en gebruikers waarbij de gevoeligheden, toekomstscenario's en bijzonderheden qua transport, opslag en zuivering in de cellen komen te staan (Figuur 35).



Figuur 35. Matrix voor de tweede ronde van de workshop

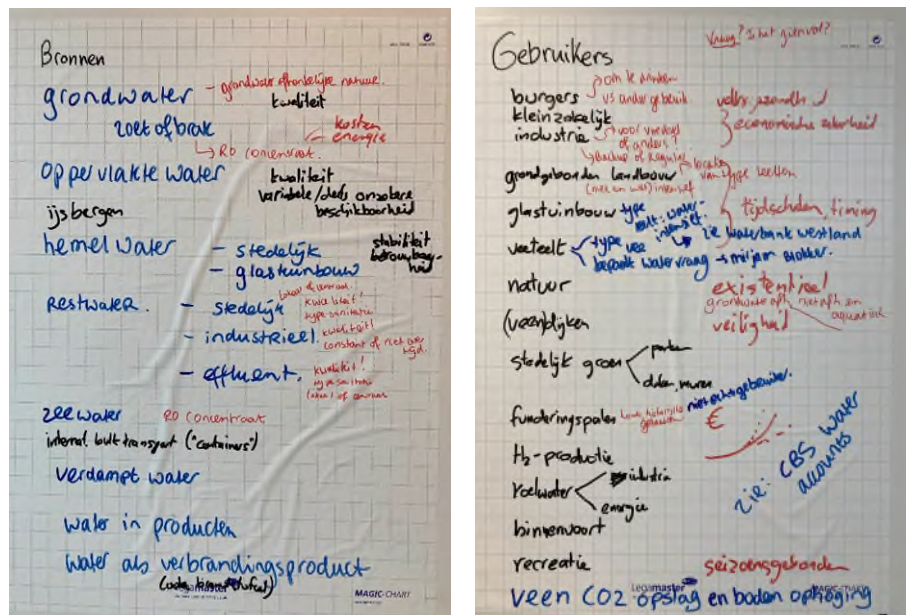
De opzet van de tweede ronde is weergegeven in Figuur 36.



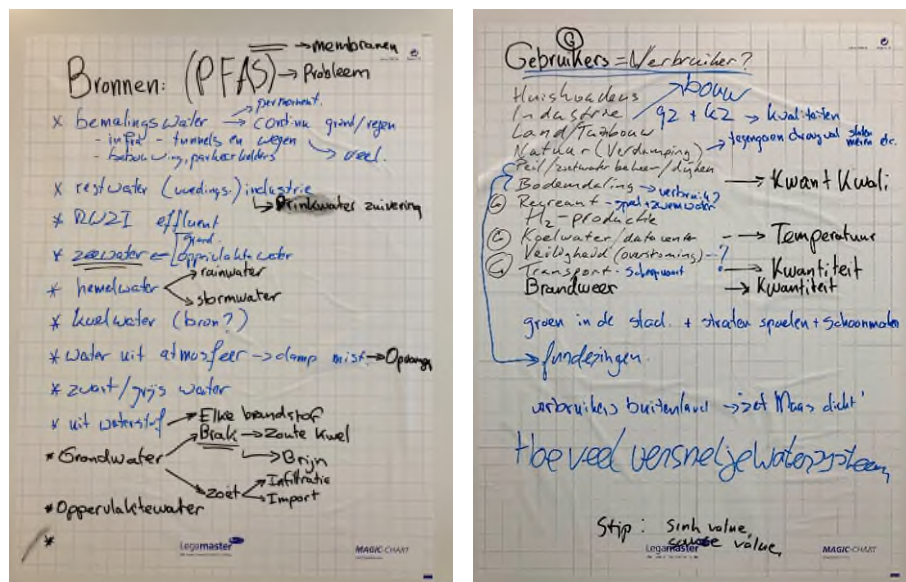
Figuur 36. Opzet van de tweede ronde van de workshop

I.II Opbrengsten

De gesprekken en ideeën zijn op postervellen vastgelegd. Zie Figuur 37 en Figuur 38 voor de opbrengsten van de eerste ronde.



Figuur 37. Opbrengsten eerste ronde voor groep 1 en 2



Figuur 38. Opbrengsten eerste ronde voor groep 3 en 4

Een samenvatting van de resultaten van ronde 1 wordt gegeven in Tabel 6 en Tabel 7 voor respectievelijk bronnen en eindgebruikers.

Tabel 6 Samenvatting van bronnen aangegeven tijdens de workshop

Bronnen	Aandachtspunten	Kijk verder dan alleen de kosten
Bemalingswater – komt van infrastructuur zoals wegen en tunnels maar ook in steden van parkeerkelders	- Is een permanente/continue bron - Aanzienlijke hoeveelheid	
Restwater uit de (voedings)industrie	- Stedelijk → kan lokaal of centraal zijn, Kwaliteit!, afhankelijk van type sanitatie - Industrieel → Kwaliteit!, niet per se constant over de tijd - Effluent → Kwaliteit!, afhankelijk van type sanitatie, kan lokaal of centraal zijn	
RWZI effluent		
Zeewater	- Is de uiteindelijke bestemming van grond en oppervlaktewater - Membranen nodig om bruikbaar te maken → zorgt voor RO concentraat	
Hemelwater	Op te delen in: - Regenwater (alleen van daken) en stormwater (alle oppervlaktes) Kan gebruikt worden in het stedelijk gebied en de glastuinbouw (stabiliteit en betrouwbaarheid is belangrijk)	
Koelwater	(bron?)	
Water uit atmosfeer	- Damp en mist opvangen	
Zwart/grijs water		
Rest van waterstofverbranding $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	- Eigenlijk de verbranding van elke brandstof	
Grondwater	- Brak grondwater door zoute kwel (membranen/ontzilting nodig) – gebruik zorgt voor RO-concentraat = kosten + energie - Zoetwater → komt van infiltratie/import - Natuur is afhankelijk van grondwater - Kwaliteit is een issue	Zie rapport: achtergrondrapportage alternatieve bronnen voor drinkwater Alternatieve Bronnen voor Drinkwater - KWR (kwrwater.nl)
Oppervlaktewater	- Kwaliteit is variabel, deels onzekere beschikbaarheid	
Ijsbergen	- Verscheppen	
Internationaal bulk transport	- “containers” met water verscheppen	
Water in producten		

Tabel 7 Samenvatting van gebruikers aangegeven tijdens de workshop.

Gebruikers → Onderscheid maken tussen <u>gebruik</u> en <u>verbruik</u>	Opmerkingen: Algemene opmerkingen – In hoeverre versnellen we het watersysteem, wat is de sink en source value
Huishoudens/burgers	- Volksgezondheid - Differentieer tussen drinken en ander gebruik
Industrie - Klein zakelijk - Grotere industrie	- Belangrijk voor economische zekerheid - De bouw gebruikt ook aanzienlijk veel water - Cementproductie gebruikt kwalitatief goed water - Voor voedsel of andere producten - Maak onderscheid tussen back-up water of regulier verbruik
Land en tuinbouw	- Type teelt zorgt voor specifieke waterintensiteit - <u>Zie waterbank Westland</u>: Animatie Waterbank Westland - Zout op afstand, zoet op voorraad (coastar.nl), Haalbaarheid van waterbank in Westland onderzocht (h2owaternetwerk.nl) Kan verschillende kwaliteiten gebruiken (GZ + KZ?)
Veeteelt	- Watervraag hangt af van type vee → Mirjam Blokker!
Natuur (verdamping)	- Tegengaan van droogval van sloten/meren/etc. - Existentieel voor behoud van natuur - Grondwater afhankelijk, niet afhankelijk of aquatisch
Peilbeheer/zoetwater beheer/dijken	
Bodemdaling - Funderingen → gekoppeld aan peilbeheer	- Is dit water verbruik of gebruik? → niet echt gebruik, maar wel belangrijk - Hout van historische gebouwen - Kosten zijn hoog als water niet beschikbaar is
Recreant (gebruik)	- Speel en zwemwater → goede kwaliteit, kwantiteit minder van belang - Seizoensgebonden
H ₂ productie	

Koelwater industrie/data centers (gebruik/verbruik)	- Kwaliteit is verbonden aan de temperatuur van het water - Industrie, maar ook voor energie
Veiligheid (overstromingen)	- (veen)dijken hebben water nodig
Transport → scheepvaart (gebruik)	- Binnenvaart
Brandweer	- Maakt kwaliteit/kwantiteit hier uit?
Groen in de stad	- Verdamping in parken, daken en groene muren
Straten spoelen/schoonmaken	
Verbruik in buitenland	- Rivieren naar Nederland kunnen dicht gezet worden
Opslag van CO ₂ in veen en bodemophoging	

Zie Figuur 39 en Figuur 40 voor de opbrengsten van de tweede ronde.

Continu met Continuen		Gebruikers		Nevenwinsten!	
Bronnen	Industrie	Landbouw		Drinkwater	
	Behandeling ↳ Specifiek ↳ Technisch mogelijk ↳ Schaak heel verschillend Zuivering moet nog bepaald worden ↳ Naar huidige zuivering			Continu → dus interessant ↳ reststroom → Brijn ↳ Kwaliteit niet continu	
		↳ Lozingskosten vermijden?			
Bewaking Polders	↳ Niet interessant voor landbouw ↳ Slechte kwaliteit	Gewassen aanpassen op kwaliteit ↳ Seizoen/Jaar afhankelijk		Reststroom → Brijn ↳ Continu Kwantiteit, Kwaliteit	

Figuur 39. Opbrengsten tweede ronde groep 1 en 2

RWZI effecten → Geen/Gel	Feit/Natuur		
	INDUSTRIE	LANDBOUW	Drink
	Belangen/Beleid		
RWZI effecten → huidige situatie	Kwaliteitsnormen → Historisch bepaald ↳ Herpoewerwegen d		
			

II Vertrekpunten voor de implementatie van waterkwaliteit in Water Matchmaker

Hoofdstuk 5 laat zien dat de meeste DSS-modellen voor waterverdeling zich vooral richten op waterkwantiteit. Waterkwaliteit is soms onderdeel van de simulatie, maar wordt over het algemeen achteraf berekend en speelt vaak geen rol in de optimalisatie. Een raamwerk voor de optimalisatie van waterverdeling is er in eerste instantie voor bedoeld dat eindgebruikers water ontvangen. Verschillende eindgebruikers kunnen echter verschillende wensen/vereisten op het gebied van waterkwaliteit hebben. Daarom moet de waterkwaliteit worden geïntegreerd in het te ontwikkelen raamwerk, zodat elke gebruiker water van de gewenste waterkwaliteit ontvangt.

Een bepaalde waterkwaliteit wordt meestal gewaarborgd door een specifieke waterbehandeling. Als het water dat wordt onttrokken echter al de vereiste kwaliteit heeft, is behandeling misschien niet nodig. Daarom is de eerste vraag die moet worden beantwoord: Wanneer is waterzuivering nodig?

Zuivering is nodig indien de waterkwaliteit die aan een bron wordt onttrokken slechter is dan de waterkwaliteit die de eindgebruiker nodig heeft. Als de waterkwaliteit die aan de bron wordt onttrokken gelijk of zelfs beter is dan de benodigde kwaliteit, kan het water in principe altijd worden gebruikt en is geen zuivering nodig. Voor productie van drinkwater zal dit echter niet het geval zijn, maar zal altijd een mate van zuivering noodzakelijk zijn.

Onze aanpak voor de integratie van waterkwaliteit in het modelmatig raamwerk is gebaseerd op de volgende stappen:

- 1 deel waterbronnen in op basis van waterkwaliteitsklassen;
- 2 stel vast of waterbehandeling nodig is voor het beoogde gebruik;
- 3 indien behandeling nodig is, definieer dan factoren die van invloed zijn op de zuivering en die redelijkerwijs in het model kunnen worden geïntegreerd, zoals kostenfuncties of andere parameterfuncties.

In de volgende paragrafen wordt in detail aan de hand van voorbeelden uitgelegd hoe de waterkwaliteit in de WMM kan worden geïntegreerd.

II.1 Waterkwaliteitsklassen

Als eerste stap koppelen we een waterkwaliteitsklasse aan elke waterbron, zowel conventioneel als alternatief. Iedere waterbron, zowel natuurlijk als antropogeen, heeft een eigen waterkwaliteit. In het raamwerk onderscheiden we zeven bronnen van water. We volgen een soortgelijke benadering als die van de (Connecticut Department of Energy and Environmental Protection, 2010).

We stellen een combinatie voor tussen de kaderregeling waterkwaliteit en de regelgeving voor waterhergebruik. In beide verordeningen zijn waterkwaliteitsklassen gedefinieerd. We combineren de classificatie uit deze wetgeving met de zeven onderscheiden waterbronnen om te komen tot een indeling in waterkwaliteitsklassen. Aan elke waterkwaliteitsklasse kan een toepassing worden gekoppeld (Connecticut Department of Energy and Environmental Protection, 2010). Zo zou grondwater van hoge kwaliteit kunnen worden gereserveerd voor de productie van drinkwaterkwaliteit, terwijl grondwater van gemiddelde kwaliteit zou kunnen worden gereserveerd voor industrieel gebruik. De waterkwaliteitsklassen kunnen ook worden uitgebreid om te bepalen waar

waterlozingen kunnen plaatsvinden. Gebieden met een goede waterkwaliteit zouden bijvoorbeeld niet geschikt zijn om waterlozingen van slechtere kwaliteit te ontvangen. Tabel 8 kan mogelijk worden gebruikt als een regulerende tabel, die relevante stakeholders in een bepaalde regio kan helpen om vast te stellen door wie, waar en hoe de waterbronnen zouden worden gebruikt.

Tabel 8 Waterkwaliteitsklassen

Klasse	Omschrijving kwaliteit	Toepassing	Beschrijving
A – Drinkwater	Drinkwaterkwaliteit	Drinkwater	EU 2020/2184 Bijlage I, Microbiologische, Chemische en indicator- en risicobeoordelingsparameters, als minimumeisen
B – Grondwater	Al het water onder het oppervlak van de grond inclusief in de verzadigde zone		
B.1- Grondwater	Uitstekend, geschikt voor de productie van drinkwater	Productie van drinkwater voor menselijke consumptie	Beschermd gebied voor de onttrekking van water volgens artikel 7 i van de EU 2000/60),
B.2- Grondwater	Goed, geschikt voor de productie van drinkwater	Water bestemd voor menselijke consumptie, industrie, aanvulling/zijrivier van/naar waterreservoir, agrarisch gebruik	Geclassificeerd als zeer goed of goed volgens EU 2000/60
B.3- Grondwater	Aangenomen dat het enige degradatie vertoont in vergelijking met B1 en B2 (d.w.z. grondwater in verstedelijkte gebieden)	Water bestemd voor de industrie, niet-drinkbare voorziening, basisdebiet van de beek, agrarisch gebruik (met beperkingen)	Geclassificeerd als matig volgens EU 2000/60
B.4-Grondwater	Grondwaterkwaliteit dat is beïnvloed door lozingen van afvalwater of brak/zout grondwater		Geclassificeerd als ontoereikend of slecht volgens EU 2000/60
C- Oppervlaktewater en overgangswateren ¹⁰ - Binnenwateren, met uitzondering van grondwater, en overgangswateren			
C.1 - Oppervlakte-/overgangswater	Uitstekend, geschikt voor de productie van drinkwater	Productie van drinkwater voor menselijke consumptie	Beschermd gebied voor de onttrekking van water volgens artikel 7 i van de EU 2000/60
C.2- Oppervlakte-/overgangswater	Goed, geschikt voor de productie van drinkwater	Water bestemd voor menselijke consumptie, industrie, aanvulling/zijrivier van/naar waterreservoir, agrarisch gebruik	geclassificeerd als zeer goed volgens EU 2000/60
C3 - Oppervlakte-/overgangswater	Veilig om te vissen en te zwemmen	Visserij, recreatie, natuur, industriële toelevering, agrarisch gebruik	geclassificeerd als zeer goed of goed volgens EU 2000/60
C4 - Oppervlaktewater/overgangswater	Aangenomen dat het enige verontreiniging heeft in vergelijking met C3	Water bestemd voor de industrie, niet-drinkbare voorziening, stroombasisstroom, agrarisch gebruik (met beperkingen)	geclassificeerd als matig volgens EU 2000/60
C5 - Oppervlaktewater/overgangswater	De kwaliteit verandert door lozingen van afvalwater (diffuse of puntlozing van afvalwater) of ernstige indringing van zoute water,		geclassificeerd als ontoereikend of slecht volgens EU 2000/60

¹⁰Oppervlaktewaterlichamen in de buurt van riviermondingen, die gedeeltelijk zout zijn vanwege de nabijheid van kustwateren, maar worden beïnvloed door zoetwaterstromen (definitie volgens EU 2000-60)

D - Kustwateren			
D 1- Kustwateren	Uitstekende tot goede kwaliteit	Visserij, recreatie, gezonde mariene habitat, commerciële oogst van schelpdieren (mogelijk gezuiverd), industriële levering	geclassificeerd als zeer goed of goed volgens EU 2000/60
D2 - Kustwateren	Aangenomen dat ze enige verontreiniging hebben in vergelijking met D1		geclassificeerd als matig volgens EU 2000/60
D3 - Kustwateren	Kwaliteit veranderd door lozingen van afvalwater (diffuse of puntlozingen van afvalwater) of antropogene activiteiten		geclassificeerd als ontoereikend of slecht volgens EU 2000/60
E- Gezuiverd huishoudelijk afvalwater			
E1 –Teruggewonnen water		Geschikt voor landbouwdoeleinden (voedselgewassen die rauw worden geconsumeerd)	Geclassificeerd als kwaliteit A volgens EU 2020/741
E2- Teruggewonnen water		Geschikt voor agrarisch gebruik (voedselgewassen die niet in direct contact komen met teruggewonnen water)	Geclassificeerd als kwaliteit B volgens EU 2020/741
E3- Teruggewonnen water		Geschikt voor agrarisch gebruik (voedselgewassen die niet in direct contact komen met teruggewonnen water)	Geclassificeerd als kwaliteit C volgens EU 2020/741
E4- Teruggewonnen water		Geschikt voor industrie, energie en zaai gewassen	Geclassificeerd als kwaliteit D volgens EU 2020/741
F- Gezuiverd industrieel afvalwater; momenteel niet toegestaan door de wet om als waterbron te worden gebruikt (buiten industriële installaties)			
G- Regenwater- Valt op daken en kan lokaal worden opgevangen; momenteel niet gereguleerd.			
H- Grijswater- Relatief schoon afvalwater van baden, gootstenen, wasmachines en andere keukenapparatuur, misschien lokaal toegepast; momenteel niet gereguleerd.			
I- Afstromend regenwater - Water dat van straatoppervlakken in rioleringen stroomt; meer vervuild dan regenwater; momenteel niet gereguleerd.			

II.II Noodzaak van zuivering

Om een antwoord te geven op de vraag "wanneer is zuivering nodig", hebben we een matrix opgesteld, waarbij de waterkwaliteitsklasse aan de bron is gekoppeld aan de vereiste waterkwaliteitsklasse voor de toepassing. De verticale as geeft de kwaliteitsklasse van de bron aan, de horizontale as de door de eindgebruiker vereiste kwaliteitsklasse. Een dergelijke matrix moet een afspiegeling zijn van de beslissingen van relevante stakeholders in het watersysteem, gebaseerd op de waterkwaliteitsklassen die in de betreffende regio beschikbaar zijn. Daarnaast kan de matrix ook worden gezien als de huidige kennis op het gebied van waterzuivering, zowel als het gaat om natuurlijke processen (Z1) als om door technologische waterbehandelingssystemen (Z2). Het opstellen van de matrix wordt idealiter gedaan door waterbehandelingsexperts uit alle relevante kennisgebieden zoals hydrologie, watertechnologie, ecologie en geologie.

Tabel 9 Zuiveringsmatrix: stelt vast of behandeling, natuurlijke (Z(1)) of door de mens gemaakt (Z(2)), noodzakelijk is om van de kwaliteit van het bronwater (verticaal) naar de vereiste kwaliteit van de toepassing (horizontaal) te gaan.

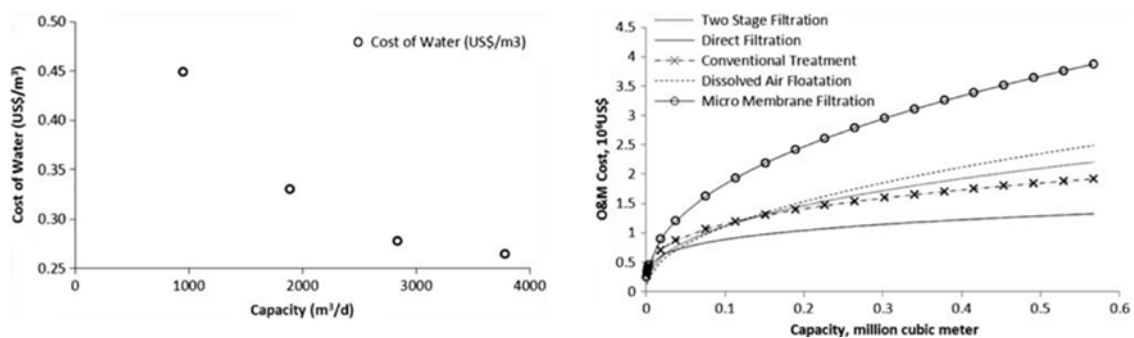
Toepassing Bronkwaliteit	A	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	E1	E2	E3	E4	F	G	H
B1	Z(2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B2	Z(2)	Z(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B3	-	Z(1)	Z(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B4	-	Z(1)	Z(1)	Z(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C1	Z(2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2	Z(2)	-	-	-	-	Z(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	Z(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C4	-	-	-	-	-	Z(1)	Z(1)	Z(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C5	-	-	-	-	-	Z(1)	Z(1)	Z(1)	Z(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D1	Z(2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D2	Z(2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Z(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Z(1)	Z(1)	-	-	-	-	-	-	-	-
E1	-	-	Z(2)	Z(2)	Z(2)	-	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	-	Z(2)	Z(2)	-	-	-	-	-	-	-
E2	-	-	Z(2)	Z(2)	Z(2)	-	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	-	Z(2)	Z(2)	-	-	-	-	-	-	-
E3	-	-	Z(2)	Z(2)	Z(2)	-	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	-	Z(2)	Z(2)	-	-	-	-	-	-	-
E4	-	-	Z(2)	Z(2)	Z(2)	-	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	-	Z(2)	Z(2)	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	Z(2)	Z(2)	-	-	-	Z(2)	Z(2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	-	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	Z(2)	-	-	-	-	-	-	-

Legenda: A- Drinkwater; B-Grondwater; C- Oppervlakte- en overgangswater; D- Kustwater; E- Gezuiverd huishoudelijk afvalwater; F- Gezuiverd industrieel afvalwater; G- Regenwater, H- Grijswater; Z(1) – zuivering door natuurlijke processen; beheersing van de bron van verontreinigende stoffen; enz.; Z(2)- zuivering met technologische processen, de behoefte aan behandeling is afhankelijk van de kwaliteit van de bron en de eindkwaliteit (classificatieklasse)

II.III Parameterfuncties

Een ingevulde cel in de matrix in Tabel 9 geeft aan of er een zuivering beschikbaar is om van de kwaliteit van het bronwater (verticaal) naar de vereiste kwaliteit van de toepassing (horizontaal) te gaan. Deze combinatie van bronkwaliteit en gewenste kwaliteit (elke ingevulde cel in de matrix) kan worden gezien als een parameterfunctie van genormaliseerde parameters zoals kosten, CO₂-voetafdruk of andere. Elke parameter wordt echter beïnvloed door verschillende factoren.

Om bijvoorbeeld drinkwater te produceren uit grondwaterkwaliteit (klasse B1 naar klasse A), zijn er verschillende factoren waarmee rekening moet worden gehouden, waaronder (Plappally et al., 2012): pompen; energie; tijd; hoeveelheid te behandelen water; zuiveringsprocessen; en locatie. Elke factor zal invloed hebben op de kosten.



Figuur 41. Kosten van water per waterbehandelingscapaciteit; b) De variatie van de exploitatie- en onderhoudskosten per geselecteerde technologie weergeeft (bron: Plappally et al (2012)).

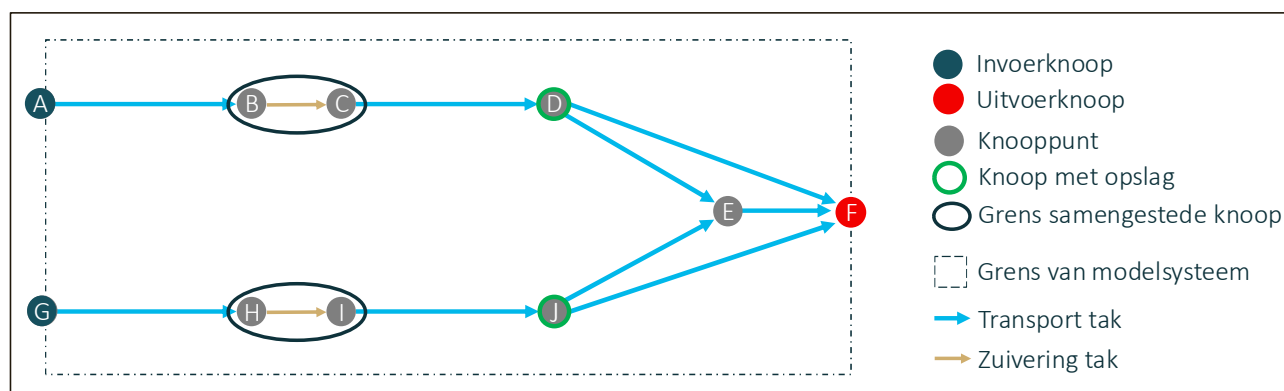
Door gebruik te maken van standaardkostenfuncties voor alle relevante factoren, zoals weergegeven in Figuur 41, kunnen de totale kosten voor behandeling worden toegerekend aan de productie van drinkwater uit grondwaterkwaliteit (klasse B1 tot en met A), die in de WMM kunnen worden gebruikt. Dezelfde procedure zou kunnen worden toegepast om de totale kosten (of andere relevante parameters voor het WMM-besluit) voor de resterende cellen van Tabel 2 te verkrijgen.

III Voorbeeld WMM inclusief opslag en alternatieve kostenfuncties

Deze bijlage beschrijft hoe opslag meegenomen kan worden binnen een WMM-optimalisatie. Het beschreven voorbeeld in deze bijlage verschilt van de demo omdat deze het product is van een iteratief proces waarin WMM voor zuivering en WMM voor opslag parallel ontwikkeld werden. De uiteindelijke versie van WMM voor opslag en zuivering zal uitgewerkt worden in vervolgonderzoek. Het voorbeeld in deze bijlage gebruikt dezelfde overkoepelende methodes als de demo, maar gebruikt geen verschillende kwaliteiten en versimpeld zuivering tot een enkele tak binnen een samengestelde knoop. Deze versimpeling maakt het makkelijker om te experimenteren met de manier waarop sets gedefinieerd worden voor de omgang met tijdstappen. Daarnaast optimaliseren we in eerste instantie op basis van de monetaire kosten en voegen hier vervolgens CO₂ uitstoot aan toe op basis van verschillende methodes. We beschrijven de situatie, de doelfunctie(s), en de uitkomsten maar laten de wiskundige formulering achterwege.

III.I Beschrijving

In deze bijlage werken we met 10 knopen: 2 bronnen (invoerknopen), 2 zuiveringslocaties op basis van samengestelde knopen, 2 knopen waar opslag kan plaatsvinden, 1 knooppunt, 1 gebruiker (uitvoerknoop). Deze knopen zijn verbonden met 11 takken (zie Figuur 42). De gekozen waarden zijn dusdanig gekozen om te illustreren hoe de optimalisatiemethode tot een ontwerp komt en hoe kleine verschillen voor een ander ontwerp kunnen zorgen. We werken met drie tijdstappen. Ter illustratie optimaliseren we alleen op basis van de waterbalans, en worden mogelijke vervuilingen/stoffen achterwege gelaten.



Figuur 42. Visualisatie van netwerk voor WMM demonstratie. De knopen D en J zijn interne knopen met de mogelijkheid om water op te slaan.

Het netwerk in Figuur 42 kan samengevat worden in drie tabellen. Tabel 10 geeft een overzicht van de takken in het netwerk gekenmerkt door een begin en eindknoop. Voor elk van de takken zijn een aantal parameter waarden ingevuld. De kosten voor tak (B, C) en (H, I) zijn relatief hoog omdat deze takken de zuivering vertegenwoordigen. De kosten voor deze zuiveringen verschillen onderling omdat de kwaliteit van het inkomende water verschilt. In dit voorbeeld gaan we ervan uit dat alle infrastructuur nog gebouwd moet worden en er dus geen maximumcapaciteit voor de infrastructuur is; de benodigde capaciteit zal blijken uit de optimalisatie. De opslagmogelijkheden per knoop zijn weergegeven in Tabel 11. Alleen de knopen D en J zijn locaties waar water opgeslagen kan worden, waar voorlopig nog geen maximumcapaciteit aan verbonden is. Alle andere knopen zijn niet geschikt voor opslag en hebben een in het model een opslagcapaciteit van nul. In Tabel 12 is de waterbeschikbaarheid en de watervraag

per knoop per tijdstap weergegeven. De waterbeschikbaarheid wordt weergegeven met een negatieve waarde en de watervraag met een positieve waarde. Een eerste stap is om de totale waterbeschikbaarheid te vergelijken met de totale watervraag. In totaal is er een overschot van 100 eenheden (rechtsonder in Tabel 12). Op tijdstap 2 is er een tekort van 110 eenheden, dat in principe voldaan kan worden met het overschot uit de eerdere tijdstap zolang de mogelijkheid voor opslag beschikbaar is.

Tabel 10 Overzicht van de takken in het netwerk en de waarden voor hun parameters.

Begin	Eind	Monetaire kosten (per eenheid volumestroom)	Vaste monetaire kosten (bij gebruik van tak)	Maximum capaciteit (volumestroom)	Type
A	B	1	30	∞	Transport
B	C	10	70	∞	Zuivering
C	D	1	10	∞	Transport
D	E	3	30	∞	Transport
E	F	4	40	∞	Transport
G	H	2	20	∞	Transport
H	I	15	100	∞	Zuivering
I	J	1	10	∞	Transport
J	E	3	30	∞	Transport
J	F	9	20	∞	Transport
D	F	8	30	∞	Transport

Tabel 11 Overzicht van de opslagmogelijkheden per knoop

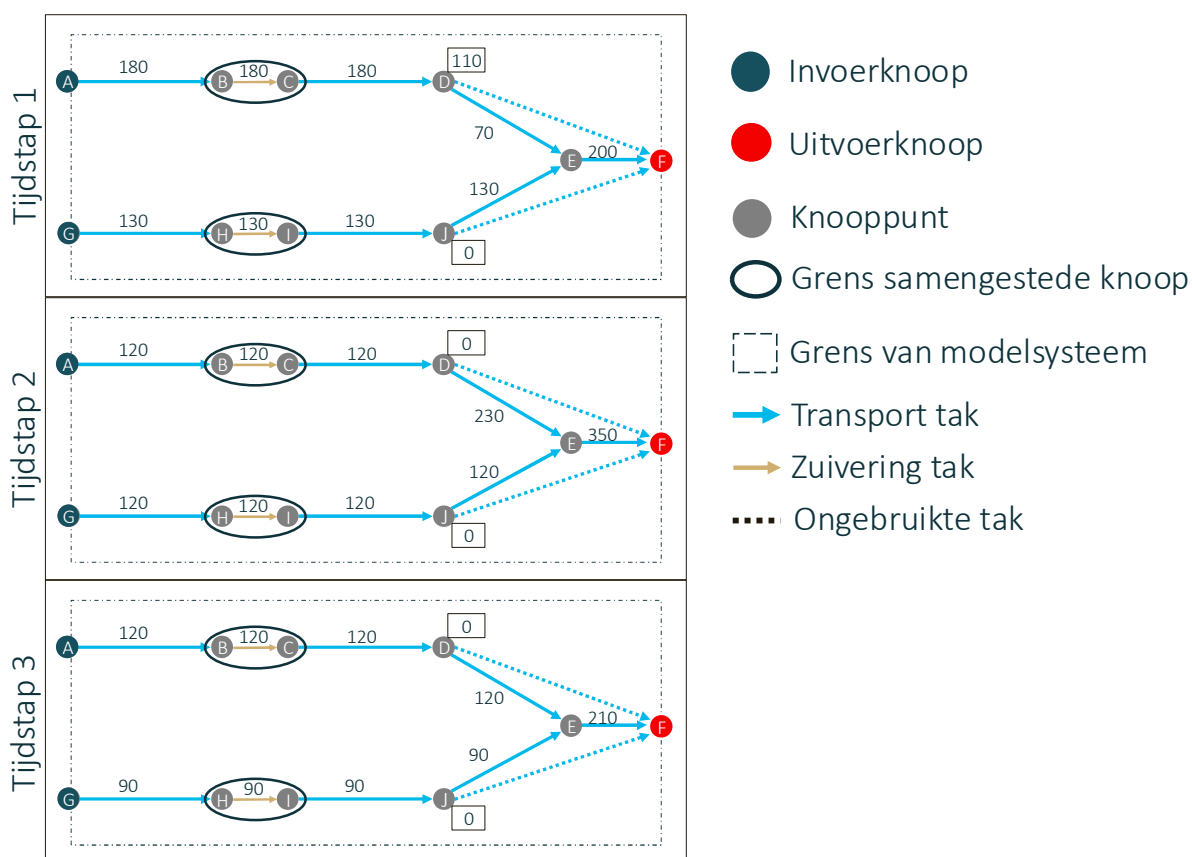
Knoop	Monetaire kosten (per eenheid volumestroom)	Vaste monetaire kosten (bij gebruik van de knoop)	Opslagcapaciteit
A	-	-	0
B	-	-	0
C	-	-	0
D	3	35	∞
E	-	-	0
F	-	-	0
G	-	-	0
H	-	-	0
I	-	-	0
J	4	45	∞

Tabel 12 Watervraag (-) en waterbeschikbaarheid (+)

Knoop	Tijdstap 1	Tijdstap 2	Tijdstap 3	Totaal
A	180	120	120	420
B	0	0	0	0
C	0	0	0	0
D	0	0	0	0
E	0	0	0	0
F	-200	-350	-210	-760
G	200	120	120	440
H	0	0	0	0
I	0	0	0	0
J	0	0	0	0
Totaal	180	-110	30	100

III.II Optimalisatie

Het bovenstaande systeem is geprogrammeerd in python en opgelost met de GLPK solver. Het optimale stroomschema voor elk van de tijdstappen is weergegeven in Figuur 43. De optimale oplossing onder deze invoerwaarden maakt geen gebruik van de takken (D,F) en (J,F), wat aangeeft dat het effectiever is om de waterstromen te mengen bij knoop E voordat het naar de gebruiker bij E gaat. Zoals voorspeld op basis van Tabel 12 is het nodig om water op te slaan tijdens de eerste tijdstap om aan de watervraag in de tweede tijdstap te kunnen voldoen, dit gebeurt bij knoop D. De benodigde capaciteit die geïnstalleerd moet worden om het netwerk te laten functioneren is de maximum waarde over de transport takken en de opslag tak over de drie tijdstappen.



Figuur 43. Optimale allocatie van waterstromen voor elke tijdstap. De waarden bij de takken vertegenwoordigen de volumestroom, de waarden in de kaders de hoeveelheid water in opslag aan het eind van de tijdstap.

Op basis van de ingevoerde parameters zijn de totale monetaire kosten voor het netwerk 17185. Het transport over de takken kost 16820, zie Tabel 13. De totale kosten voor opslag zijn onder de ingevoerde omstandigheden relatief laag, 365, zie Tabel 14.

Ook al zijn de kosten voor opslag relatief laag, ze zijn wel bepalend voor het ontwerp en gebruik van het systeem. Wanneer de operationele kosten voor opslag op knoop D stijgen van 3 naar 4 blijft het netwerkontwerp zoals weergegeven in Figuur 43. Wanneer deze kosten verder stijgen, ergens tussen de 4 en 5, is er een omslag en wordt de opslag bij knoop J gebruikt in plaats van knoop D. Op een vergelijkbare manier kan onderzocht worden wanneer het mengen op punt E niet meer loont ten opzichte van direct transport naar de gebruiker. Voor het zoeken naar dit soort omslagpunten kunnen algoritmes ontwikkeld worden die systematisch de parameterwaarden aanpassen. Dit is waardevol wanneer er geen uitsluitsel gegeven kan worden over de kostenfuncties voor de takken en de opslagkopen. Op deze manier kunnen vragen beantwoord worden als: wat is, globaal gezien, de relatie tussen opslagkosten en transportkosten om significante verschillen in het netwerkontwerp te zien? (zie Figuur 44)

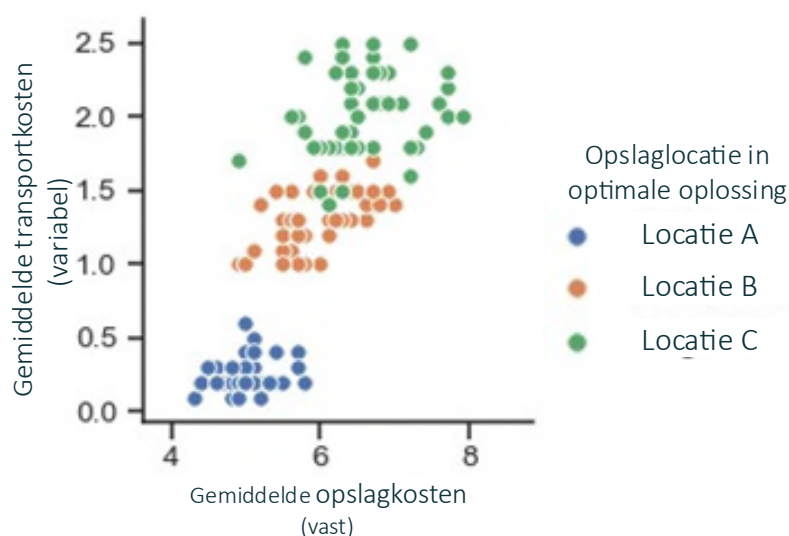
Tabel 13 Kostenopbouw over de takken van de optimale oplossing.

Tak	Monetaire kosten (per eenheid volumestroom)	Vaste monetaire kosten (bij gebruik van de tak)	Totaal
('A', 'B')	420	30	450
('B', 'C')	4200	70	4270
('C', 'D')	420	10	430
('D', 'E')	1260	30	1290
('D', 'F')	0	40	40
('E', 'F')	3040	20	3060

('G', 'H')	680	100	780
('H', 'I')	5100	10	5110
('I', 'J')	340	30	370
('J', 'E')	1020	0	1020
('J', 'F')	0	0	0
Totaal	16480	340	16820

Tabel 14 Kostenopbouw voor opslag op knoop D en J van de optimale oplossing.

Knoop	Monetaire kosten (per eenheid volumestroom)	Vaste monetaire kosten (bij gebruik van de knoop)	Totaal
D	330	35	365
J	0	0	0
Totaal	330	35	365



Figuur 44. Voorbeeld van een systematische aanpassing van parameterwaarden om globale conclusies over een netwerk te trekken.

Ter illustratie voegen we CO₂-uitstoot aan de doelfunctie (Tabel 15), en hanteren we een variabele weegfactor tussen de CO₂-uitstoot en de monetaire kosten om te onderzoeken welke invloed dit heeft op het systeemontwerp. Waar de monetaire kosten voor de tak (B,C) lager zijn dan voor (H,I) is dit voor de CO₂-uitstoot juist andersom.

Tabel 15 Overzicht van CO₂ uitstoot voor het gebruik van de takken en opslag in het netwerk.

Begin	Eind	CO ₂ uitstoot (per eenheid volumestroom)	CO ₂ uitstoot (bij gebruik van tak)	Knoop	CO ₂ uitstoot (per eenheid opslag)	CO ₂ uitstoot (bij gebruik van opslag)
A	B	3	40	A	-	-
B	C	40	60	B	-	-
C	D	3	30	C	-	-
D	E	4	50	D	150	600
E	F	8	100	E	-	-
G	H	4	30	F	-	-
H	I	15	75	G	-	-
I	J	2	25	H	-	-
J	E	4	55	I	-	-
J	F	3	60	J	150	450
D	F	3	45	-	-	-

De resultaten van de optimalisatie onder verschillende weegfactoren volgens de gewogen som (Hoofdstuk 7.3) methode zijn weergegeven in Tabel 16 en gevisualiseerd in Figuur 45. De gewichten worden als volgt weergegeven: een verdeling van 70% monetair en 30% CO₂ wordt weergegeven als → (0.7,0.3).

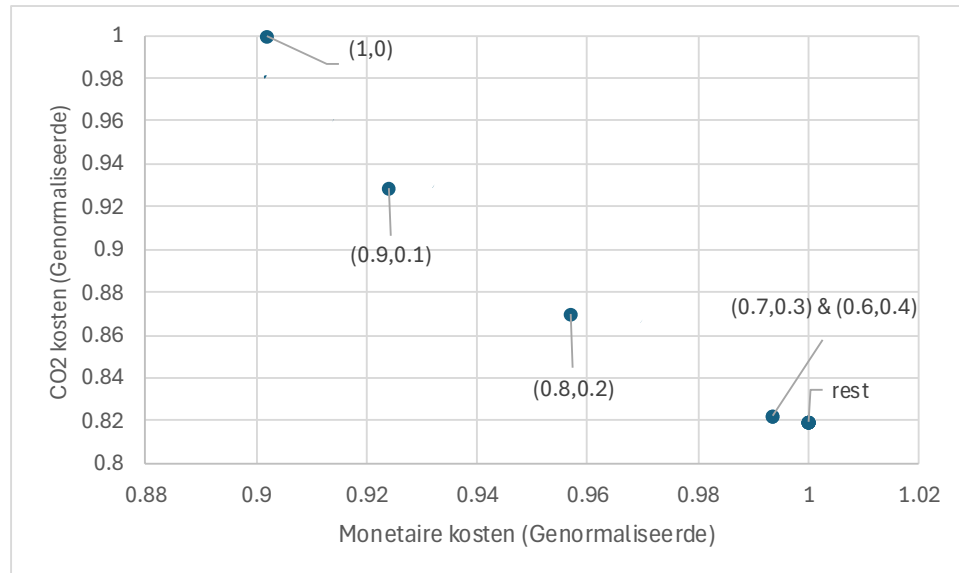
Globaal gezien zijn er drie situaties voor de gekozen gewichten.

- Voor een verhouding (1,0) is de optimale oplossing voor het netwerk gelijk aan de oplossing zonder CO₂-uitstoot; CO₂-uitstoot heeft een weegfactor van nul.
- Tussen (0.8,0.2) en (0.7,0.3) verschuift de onttrekkingen per tijdstap uit de bronnen van – Knoop A: 180, 120, 120 | Knoop G: 130, 120, 120 naar Knoop A: 110, 120, 90 | Knoop G: 200, 120, 120. Dit gaat gepaard met een aantal veranderingen in het gebruik van de transporttakken.
- Rond (0.5,0.5) weegt CO₂-uitstoot zwaar genoeg om de opslag te verplaatsen van knoop D naar knoop J.

Tabel 16 Optimale oplossingen voor het netwerk volgens de gewogen som methode. De kleur van de achtergrond geeft een soortgelijke configuratie van het netwerk aan.

Gewicht voor monetaire kosten	Gewicht voor CO ₂ uitstoot	Totale gewogen kosten (monetair + CO ₂)	Monetaire kosten	CO ₂ uitstoot
1	0	17185	17185	53145
0.9	0.1	20780	17605	49360
0.8	0.2	23829	18235	46205
0.7	0.3	26366	18935	43705
0.6	0.4	28843	18935	43705
0.5	0.5	31305	19055	43555
0.4	0.6	33755	19055	43555
0.3	0.7	36205	19055	43555
0.2	0.8	38655	19055	43555
0.1	0.9	41105	19055	43555
0	1	43555	19055	43555

De optimale oplossingen op basis van de toegekende gewichten zijn gevisualiseerd in Figuur 45. De verschillende combinaties aan gewichten levert geen rechte lijn aan oplossingen op. De milieuwinst per extra geïnvesteerde euro is hoger aan de linker kant van de grafiek vergeleken met de rechterkant. Of andersom, de kostenreductie per eenheid extra toegestane milieudruk is hoger aan de linker dan de rechter kant van de grafiek.



Figuur 45. Visualisatie van de gewogen som methode waarmee monetaire kosten en CO₂ uitstoot met elkaar vergeleken worden. Elke stip vertegenwoordigt een optimale oplossing volgens de gekozen gewichten (gewicht Monetair, gewicht CO₂).