

Wido Derks, Jasper van Voorst, Martin Knotters, redactie. Met bijdragen van Mischa Beckers, Thomas Berends, Sjoerd Boersma, Bob Brederveld, Hans Cappon, Marijn Gülpen, Joske Houtkamp, Kizjè Marif5 Iarima Silva Mendonça, Arjen van Nieuwenhuijzen, Maria van Schaik, Erik Schrier, Jip de Vries



Een digital twin voor het waterbeheer

Wido Derks¹, Jasper van Voorst², Martin Knotters³, redactie. Met bijdragen van Mischa Beckers⁴, Thomas Berends⁵, Sjoerd Boersma⁶, Bob Brederveld⁷, Hans Cappon⁴, Marijn Gülpen³, Joske Houtkamp³, Kizjè Marif⁵, Iarima Silva Mendonça⁴, Arjen van Nieuwenhuijzen⁸, Maria van Schaik⁴, Erik Schrier⁹, Jip de Vries³

1 Waterschap Limburg

2 Waterschap Vallei en Veluwe

3 Wageningen Environmental Research

4 HZ University of Applied Sciences

5 Nelen & Schuurmans

6 Biometris

7 NIOO-KNAW

8 Witteveen+Bos

9 Royal Eijkelpark

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en gefinancierd door TKI-Deltatechnologie project WENR31, WUR-projectcode 5200046985.

Wageningen Environmental Research
Wageningen, april 2025

Gereviewd door:

Marije Stronks, Beleidsadviseur Digitale Transformatie, het Waterschapshuis
Geerten Hengeveld, Program manager, NIOO-KNAW

Akkoord voor publicatie:

Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider van Bodem, Water en Landgebruik

Rapport 3406

ISSN 1566-7197



Nelen &
Schuurmans



Wido Derks, Jasper van Voorst, Martin Knotters, redactie. Met bijdragen van Mischa Beckers, Thomas Berends, Sjoerd Boersma, Bob Brederveld, Hans Cappon, Marijn Gülpen, Joske Houtkamp, Kizjè Marif, Iarima Silva Mendonça, Arjen van Nieuwenhuijzen, Maria van Schaik, Erik Schrier, Jip de Vries, 2025. *Een digital twin voor het waterbeheer*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3406. 128 blz.; 67 fig.; 6 tab.; 18 ref.

Digital twins voor het waterbeheer werden ontwikkeld, gericht op waterkwaliteit, droogte en waterzuivering. De ontwikkelde digital twins variëren in niveau van 'volwassenheid': van het vastleggen van gegevens, het structureren van informatie, kennis vergaren, meer begrip, meer inzicht tot uiteindelijk de wijsheid die nodig is om een systeem te sturen. Brondata werden verzameld, methoden voor dataverwerking werden geïmplementeerd en resultaten werden gevisualiseerd ter ondersteuning van besluitvorming. Bij het ontwerp stonden de eisen die de gebruikers stellen centraal. Aandacht is besteed aan de visualisatie en benutting van informatie over onzekerheid.

Digital twins for water management were developed, focusing on water quality, drought and water treatment. The digital twins vary in level of 'maturity': recording data, structuring information, gathering knowledge, developing understanding, insight and ultimately the wisdom needed to manage a system. Source data were collected, data processing methods were implemented and results were visualized to support decision making. The design was based on the requirements of the users of digital twins. Attention was paid to the visualization and utilisation of information about uncertainty.

Trefwoorden: maturity levels, deterministisch model, stochastische simulatie, machinelearning, artificial intelligence

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/691076> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2025 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een kwaliteitsmanagementsysteem volgens de ISO 9001. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd volgens de norm ISO 14001. Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3406 | ISSN 1566-7197

Ontwerp omslag: Ronnie van Kempen (WENR)

Inhoud

Verantwoording	7
Woord vooraf	9
Samenvatting	11
1 Inleiding	21
1.1 Achtergrond en probleemstelling	21
1.2 Doel	21
1.3 Opbouw van het rapport	22
2 Theoretisch raamwerk	23
3 Thema Waterkwaliteit	25
3.1 Inleiding	25
3.2 Aanpak	25
3.3 Resultaten	28
3.3.1 Gegevens en informatie	28
3.3.2 Verrijken van informatie: modelleren	28
3.3.3 Begrip: scenario's doorrekenen	33
3.4 Conclusies, geleerde lessen	34
4 Thema Droogte	35
4.1 Inleiding	35
4.2 Aanpak	36
4.2.1 Stappenplan	36
4.2.2 Pilotgebied	36
4.3 Resultaten	37
4.3.1 Inzicht in gebruikersgroepen en relatie binnen de organisatie	37
4.3.2 Data & modelarchitectuur	38
4.3.3 Digital-twin toepassing voor droogte	38
4.4 Conclusies, geleerde lessen	40
5 Thema Zuivering	41
5.1 Inleiding	41
5.2 Aanpak	42
5.2.1 Algemene aanpak voor de modellering	42
5.2.2 Aanpak voor het aanvoerstelsel	43
5.2.3 Aanpak zuivering	44
5.3 Resultaten	47
5.3.1 Resultaten aanvoerstelsel	47
5.3.2 Scenario's aanvoerstelsel	49
5.3.3 Resultaten zuivering	50
5.3.4 Scenario's zuivering	54
5.4 Conclusies, geleerde lessen	56
6 Verdieping Brondata	57
6.1 Inleiding	57
6.2 Aanpak	58
6.3 Resultaten	61
6.4 Conclusies, geleerde lessen	63
6.4.1 Conclusies	63

	6.4.2 Aanbevelingen en geleerde lessen	65
7	Verdieping dataverwerking	67
	7.1 Inleiding	67
	7.2 Thema Droogte, Waterschap Limburg	68
	7.2.1 Inleiding	68
	7.2.2 Aanpak	68
	7.2.3 Resultaten	69
	7.2.4 Aanbevelingen en conclusies	71
	7.3 Thema droogte: Vallei en Veluwe	72
	7.3.1 Inleiding	72
	7.3.2 Aanpak	72
	7.3.3 Resultaten	72
	7.3.4 Aanbevelingen en conclusies	73
	7.4 Thema Zuivering	73
	7.4.1 Inleiding	73
	7.5 Gitlab	74
	7.6 Conclusies, geleerde lessen	74
8	Verdieping visualisatie en besluitvorming	75
	8.1 Inleiding	75
	8.2 Aanpak	75
	8.2.1 Gebruikersperspectief	75
	8.2.2 Requirementsanalyse en ontwerp	76
	8.2.3 Besluitvorming en visualiseren van onzekerheid	76
	8.2.4 Vertrouwen in modelresultaten	76
	8.3 Resultaten	77
	8.3.1 Workshops requirementsanalyse	77
	8.3.2 Ontwikkelde dashboards	78
	8.3.3 Toetsing en evaluatie van de dashboards	81
	8.3.4 Serious game: Vertrouwen in modelresultaten	82
	8.3.5 Workshop Besluitvorming met digital twins	82
	8.3.6 Workshop Kwantificeren en visualiseren van onzekerheid	83
	8.4 Conclusies, geleerde lessen	84
	8.4.1 Conclusies	84
	8.4.2 Geleerde lessen	86
9	Algemene conclusie, geleerde lessen en aanbevelingen	87
	9.1 Algemene conclusie	87
	9.2 Algemene geleerde lessen	87
	9.2.1 Organisatie en uitvoering project digital twin voor het waterbeheer	87
	9.2.2 Inhoud en functionaliteiten van digital twins	88
	9.2.3 Benutting digital twin bij besluitvorming	88
	9.3 Algemene aanbevelingen	88
	9.3.1 Organisatie en uitvoering project digital twin voor het waterbeheer	88
	9.3.2 Inhoud en functionaliteiten van digital twins	89
	9.3.3 Benutting digital twin bij besluitvorming	89
	Literatuur	90
Bijlage 1	Systeemanalyse waterkwaliteit Zijdewetering	91
Bijlage 2	Architectuur datastromen en modellen thema Droogte	100
Bijlage 3	Serious game over vertrouwen in de Digital Twin: voorbeelden van de spelmaterialen (scenario, rollenkaart en stemkaart)	101
Bijlage 4	Samenvatting van de afsluitende evaluatie van de Droogte-dashboards	103

Bijlage 5	Overzichtsvisualisatie Digital Twin Waterkwaliteit	105
Bijlage 6	Doorloop ('walkthrough') Droogte-dashboard Waterschap Limburg	109
Bijlage 7	Verslag van de workshop 'Besluitvorming met Digital Twins'	113
Bijlage 8	Verslag van de workshop Kwantificeren en visualiseren van onzekerheid	123

Verantwoording

Rapport: 3406

Projectnummer: 5200046985

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Beleidsadviseur Digitale Transformatie, het Waterschapshuis

naam: ir. Marije Stronks

datum: 4 maart 2025

functie: Program manager, NIOO-KNAW

naam: Dr. Geerten Hengeveld

datum: 4 maart 2025

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Dr. ir. Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 4 maart 2025

Woord vooraf

Het project 'Digital twin voor Waterbeheer', dat in 2021 van start ging en waar dit rapport verslag van doet, is uitgevoerd door een consortium bestaande uit:

- Waterschap Vallei en Veluwe
- Waterschap Limburg
- Vitens
- Stowa
- Het Waterschapshuis
- Witteveen+Bos
- Nelen & Schuurmans
- OnePlanet/IMEC
- HZ University of Applied Sciences
- Royal Eijkelpark
- Wageningen University & Research

Het project is onderdeel van 'Topconsortia voor Kennis en Innovatie Deltatechnologie' (TKI). Een TKI-project brengt publieke en private partners samen om technologie te ontwikkelen ten voordele van Nederland. Het consortium werkte samen met het NWO-project AquaConnect, de overheidsstichting Geonovum, het Informatiehuis Water, Waterschap Drents Overijsselse Delta en Kennisbasisproject 41 'Digital Twins' van het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur. De auteurs bedanken deze partners hartelijk voor de prettige en constructieve samenwerking.

Verschillende projectleden verlieten het project door het aanvaarden van een andere functie. De auteurs van dit rapport bedanken hen hartelijk voor hun inzet bij het project. Joost Iwema (Wageningen Environmental Research, nu Aequator) willen we met name noemen. Hij heeft het grootste deel van dit project met veel enthousiasme geleid. Mirjam Hack (Wageningen Environmental Research) heeft het stokje van hem overgenomen en we bedanken voor haar inzet om tot een afronding van dit project te komen. Wij bedanken Marije Stronks (Waterschapshuis) en Geerten Hengeveld (NIOO) voor hun nuttige opmerkingen bij het reviewen van dit rapport.

Samenvatting

Inleiding

De primaire doelstelling van het project is om te leren op welke manier de inzet van een digital twin (een digitale versie van een systeem in de werkelijkheid) ons inzicht in het watersysteem kan vergroten. Het project kent drie thema's: Waterkwaliteit, Droogte en Zuivering, met elk een aantal eigen subdoelen en de volgende overkoepelende doelen:

1. Het verschaffen van duidelijkheid hoe een digital twin kan worden toegepast in een organisatie en welke factoren belangrijk/cruciaal zijn in het proces.
2. Het verkennen en testen van de mogelijkheden in de toepassing van nieuwe technologieën in een digital twin voor het optimaliseren van data(stromen) en het ontdekken van nieuwe verbanden.
3. Het verkrijgen van inzicht in de impact die een digital twin kan hebben in het besluitvormingsproces van waterbeheerders op zowel strategisch als tactisch en operationeel niveau.
4. Het verkennen van innovatieve visualisatietechnieken voor het in beeld brengen van data en modelresultaten die aansluiten bij de specifieke gebruiker en kunnen bijdragen aan een goede besluitvorming.

Drie werkgroepen verrichtten verdiepend onderzoek: Brondata, Dataverwerking, en Visualisatie en Besluitvorming.

Theoretisch raamwerk

Het theoretisch raamwerk wordt gevormd door een matrix van *maturity levels*:

- Maturity level 1: gegevens vastleggen, waardoor de verschillende gebruikers gebruikmaken van dezelfde sets aan data.
- Maturity level 2: informatie structureren, waarin de inzet van data voor specifieke vraagstukken wordt gestructureerd en geautomatiseerd.
- Maturity level 3: kennis vergaren door verrijkte gegevens. Door de inzet van validatietechnieken en het opvullen van 'witte vlekken' kan de toestand van het watersysteem beter in beeld worden gebracht. Door gegevens met elkaar te combineren, kunnen nieuwe verbanden worden gelegd tussen thema's en in de geografische ruimte.
- Maturity level 4: begrip van het watersysteem. Door de toevoeging van scenario's (als-dan-situaties) aan de digital twin komt het systeemgedrag onder aangepaste omstandigheden/maatregelen in beeld.
- Maturity level 5: inzicht door gegevensanalyse en data-optimalisatie. Met technieken als machinelearning (ML) en Artificial Intelligence (AI) kunnen nieuwe verbanden worden ontdekt en de data(stromen) geoptimaliseerd. Dit levert (nog) meer inzicht op in systeemgedrag en effectueert de besluitvorming.
- Maturity level 6: wijsheid door sturing op basis van begrip. Op dit niveau heeft de digital twin volledige systeemcontrole en kan worden ingezet in de operationele sturing.

Kennis en informatie over onzekerheid worden niet gebruikt in de bovenstaande aanduidingen van *maturity levels*, er wordt uitgegaan van modellen die geen informatie over onzekerheid bieden. Als theoretisch kader voor het omgaan met onzekerheid bij een digital twin voor het waterbeheer is een indeling naar structuur en complexiteit van beslisproblemen gemaakt, zijn verschillende onzekerheidscomponenten onderscheiden en is een overzicht gemaakt van strategieën om met onzekerheid om te gaan.

Thema Waterkwaliteit

Subdoelen van de digital twin voor het thema Waterkwaliteit zijn:

1. het verkrijgen van inzicht in de actuele situatie wat betreft oppervlaktewaterkwaliteit voor het hele watersysteem in een pilotgebied (zowel KRW-lichamen als overige wateren);
2. het relateren van de actuele situatie aan de hiervoor bepalende systeemkenmerken en processen wat moet leiden tot een antwoord op de vraag 'waarom is het zoals het is?';
3. het beoordelen van de actuele situatie aan de hand van geldende (ecologische) waterkwaliteitsdoelen en het beoordelen van de hiervoor bepalende (ecologische sleutel)factoren;
4. het verbeteren van het meet- en monitoringsnetwerk met betrekking tot de waterkwaliteit;
5. het thema Waterkwaliteit streeft naar een digital twin in maturity level 3 (Kennis). Gebruikers kunnen op grond hiervan tot systeembegrip komen.

De ontwikkeling van de digital twin voor waterkwaliteit spitste zich toe op het stroomgebied van de Zijdwetering bij Ede en begon met een raamwerk dat het functioneren van het watersysteem kwalitatief beschrijft. Vervolgens werden metingen en modellen geïnventariseerd en werden de ecosysteemcomponenten en hun onderlinge relaties gekwantificeerd, op basis van (realtime) meetgegevens en (biofysische) procesmodellen of statistische/ML-modellen. Bij de evaluatie van metingen en modellen op hun bruikbaarheid voor de digital twin, stond het verkrijgen van een gebiedsdekkend beeld centraal. De ontwikkeling van een digital twin verschaftte inzicht in de actuele situatie wat betreft oppervlaktewaterkwaliteit voor het hele watersysteem in het pilotgebied Zijdwetering (zowel KRW-lichamen als overige wateren). De vraag 'waarom is het zoals het is?', is nog niet beantwoord. Daarvoor moet de actuele situatie aan de hiervoor bepalende systeemkenmerken en processen worden gerelateerd. Aan de hand van geldende (ecologische) waterkwaliteitsdoelen zijn de actuele situatie en de hiervoor bepalende (ecologische) sleutelfactoren beoordeeld. De ontwikkeling van een digital twin voor de waterkwaliteit in het pilotgebied Zijdwetering leidde niet tot verbetering van het meet- en monitoringsnetwerk met betrekking tot de waterkwaliteit. Maturity level 3 is wat betreft het pilotgebied Zijdwetering bereikt.

Thema Droogte

Aan een digital twin voor het thema Droogte is gewerkt bij Waterschap Vallei en Veluwe en Waterschap Limburg. De subdoelen zijn:

1. het verkrijgen van inzicht in de actuele en te verwachten droogtesituatie in een vooraf gedefinieerd pilotgebied tijdens het droogteseizoen en deze droogte kwantificeren en kwalificeren (oordeelsvorming);
2. het identificeren en in beeld brengen van achterliggende oorzaken in geval van ernstige droogte;
3. het waarschuwen voor aankomende knelpunten met betrekking tot droogte;
4. het verkrijgen van inzicht in de effectiviteit van enkele vooraf geselecteerde beheermaatregelen in een specifiek pilotgebied om daarmee beter onderbouwde besluiten te nemen;
5. voor het thema Droogte streven we daarmee naar een digital twin in maturity level 4 (Begrip).

De stapsgewijze aanpak bestond uit het uitschrijven van de use case rond de aanleiding vanuit het perspectief van de droogtecoördinator, de identificatie van beoogde gebruikers (persona's), een workshop visualisatie en besluitvorming, een data- en modelinventarisatie, afstemmen van data- en modelarchitectuur, het opzetten van datastromen, het ontwikkelen van modellen, de bouw van een dashboard, iteratie met gebruikers, workshop besluitvorming met het ontwikkelde dashboard, en rapportage en vastlegging van codes van modellen, datastromen en dashboard.

Het pilotgebied in Waterschap Limburg is het stroomgebied van De Groote Molenbeek in het noorden van Limburg. In Waterschap Vallei & Veluwe liggen vier pilotgebieden: ten westen van Bunschoten-Spakenburg, ten zuiden van Nijkerk, ten noorden van Heerde en ten oosten van Oosterwolde.

De data- en modelarchitectuur zijn geïmplementeerd in een operationele cloud-omgeving waarin modelsimulaties worden gemaakt voor scenario's op basis van actuele gegevens en verwachtingen. Deze geven inzicht in de droogteverwachtingen tot twaalf weken vooruit en geven een vergelijking met referentie op basis van situaties uit het verleden.

Geconcludeerd wordt dat er bij waterschappen weinig hydrologen en datascientists beschikbaar zijn, en dat zij beperkte tijd hebben om mee te werken aan de ontwikkeling van de digital twin. Ook wordt geconcludeerd dat het handelingsperspectief bij droogte minimaal is: het effect van een beregeningsverbod en/of verhoging van stuwen is in circa 14 dagen minimaal. Daarom is er behoefte om tot drie maanden vooruit te kunnen kijken, maar door de onzekerheid rondom meteorologische verwachtingen en de doorvertaling daarvan is het momenteel moeilijk dergelijke vooruitzichten te geven. Waterschapshydrologen waren aanvankelijk sceptisch over de digital twin. Gaandeweg veranderde dit, maar bij volgende digital-twinprojecten moeten zij wel betrokken worden bij ontwerp, ontwikkeling en toetsing en moeten hun vragen worden beantwoord.

Geconcludeerd wordt dat voor opschaling van punt- naar gebiedsniveau een goed bruikbare definitie van opschaling nodig is om betrouwbare uitspraken te kunnen doen, zodat er voldoende vertrouwen is in het gebruik van informatie op stroomgebiedsniveau bij besluitvorming.

Thema Zuivering

De ontwikkeling van een digital twin richtte zich op optimalisatie van de rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) en werd opgesplitst in het aanvoerstelsel en de RWZI zelf. Hierbij waren de volgende scenario's van belang:

1. het minimaliseren van energie- en chemicaliënverbruik;
2. het bufferen van het rioolwater tijdens aanvoer met regen (RWA), zodat de volumes over een langere periode worden verspreid;
3. het evalueren van het effect van afkoppelen van regenwater om op een langere termijn de effluentkwaliteit onder bepaalde grenswaarden te krijgen.

Voor zowel het aanvoerstelsel als de RWZI is met de relevante ruwe metingen een exploratieve data-analyse uitgevoerd. Vervolgens is de dataset opgesplitst in een trainings- of kalibratieset en een validatieset. De trainingsset werd gebruikt voor het vinden en selecteren van voorspellende variabelen op basis van de metingen (feature engineering en selectie), waarbij de gekozen variabelen zijn gebruikt om de modellen te trainen. Daarna is het model geëvalueerd met de validatieset. Als het model nog niet aan de vereiste prestatiecriteria voldeed, werden het model of de geselecteerde variabelen nader onderzocht.

Dit werd herhaald totdat de gewenste modelprestatie werd bereikt. De nauwkeurigheid van de voorspelling werd statistisch geëvalueerd en het beste model zou vervolgens worden geïmplementeerd en weergegeven op een dashboard.

Tot nu toe zijn alle modellen alleen gebruikt met historische metingen. De volgende stap is het model te gebruiken voor realtimevoorspellingen, op basis van realtime voorspelde neerslagmetingen, debietmetingen en relevante waterkwaliteitsparameters. Die stap is in dit project niet gemaakt.

Verschillende metingen werden gebruikt om via ML verbanden te vinden tussen verschillende variabelen in het systeem van het aanvoerstelsel, met als hoofddoel het voorspellen van het debiet van het influent op de RWZI. Voor het voorspellen van effluentwaterkwaliteitsparameters en het evalueren van scenario's zijn sensormetingen van onder andere influent-debiet en waterkwaliteitsparameters gebruikt bij het trainen en valideren van drie ML-algoritmen.

De hybride van een ML en een deterministisch model blijkt het meest nauwkeurig en is ook robuust voor neerslagonzekerheden, in tegenstelling tot het deterministische model, dat hier sterk door wordt beïnvloed. De regressiealgoritmen die bij het onderdeel zuivering werden toegepast, blijken goed in staat om de metingen te reproduceren.

Geconcludeerd wordt dat het heel goed mogelijk is een digital twin te maken van een RWZI, inclusief het aanvoerstelsel. De patronen bij droog weer en regen zijn goed te voorspellen, waarbij juist de eerdere metingen aan een variabele het bepalendst bleken voor een goede schatting in de (nabije) toekomst. Daartoe blijkt machinelearning heel geschikt gereedschap te bieden. Het beoogde Maturity Level 6, Wijsheid, waarbij de digital twin kan ingrijpen in het systeem om processen te verbeteren, is niet bereikt, omdat deze digital twin nog niet realtime en ook niet parallel aan het werkelijke systeem draait. De toegepaste modellen geven wel Begrip (Maturity level 4) en Inzicht (Maturity level 5), zodat beslissingen gemaakt kunnen worden op basis van berekende scenario's. Voor Wijsheid (Maturity level 6) is het vooral nodig dat reacties op verstoringen of aanpassingen in het systeem gevalideerd kunnen worden.

Een eerste geleerde les is dat onderscheid gemaakt moet worden tussen de seizoenen, omdat in de winter water sneller naar de zuivering gaat bij eenzelfde hoeveelheid neerslag dan in de zomer. Een tweede les is dat hybriden van fysische en ML-modellen betere resultaten kunnen opleveren dan niet-gecombineerde modellen. Ten derde moet duidelijk zijn welke variabelen afhankelijk zijn en welke onafhankelijk. Ten slotte zijn systeemkennis van het aanvoerstelsel en de zuivering en kennis van machinelearning samen nodig om een begrijpelijke digital twin te ontwerpen.

Verdieping Brondata

De verdiepingsgroep Brondata had tot taak de volgende vragen te beantwoorden:

1. Welke data zijn aanwezig?
2. Welke data zijn noodzakelijk, maar ontbreken?
3. Zijn de data bruikbaar, of zijn er nog bewerkingen nodig voor toepassing?
4. Kunnen data gecombineerd worden, zodat nieuwe, tot dan toe ontbrekende data ontstaan?

De doelen zijn als volgt verder aangescherpt:

1. Inventarisatie van waar welke databronnen en -stromen beschikbaar zijn en onder welke voorwaarden.
2. Inventarisatie van beschikbare dataformaten en hoe deze op elkaar aansluiten.
3. Vastleggen van resolutie en frequentie van data en eisen/randvoorwaarden van de digital twin voor het waterbeheer.
4. Verwerken van ruwe data naar bruikbare gegevens.

Voor de thema's Zuivering, Droogte en Waterkwaliteit in het algemeen, en specifiek voor de twee deelnemende waterschappen, is een initiële lijst gemaakt met databronnen. Deze generieke lijst is itererend bijgesteld, op basis van de use cases die door de themagroepen zijn opgesteld.

De datakwaliteit is initieel beschreven voor compleetheid, consistentie, nauwkeurigheid en actualiteit. De metrics kunnen bijvoorbeeld gebruikt worden in dashboards om de kwaliteit van de data (komende vanuit databronnen) te monitoren.

De validiteit van de gebruikte data wordt getoetst door te beoordelen of het meetpunt op de juiste plaats staat en zo ja, of het meetpunt in lijn is met het onderzoeksdoel, of de metingen valide zijn voor de betreffende toepassing en of de databron valide is in relatie tot data uit bijvoorbeeld hydrologische modellen of andere gegevensbronnen, zoals topografische waarden, landgebruik of andere niet gemeten data die nodig zijn in een digital twin.

Voor vrijwel alle parameters of eigenschappen van de desbetreffende databronnen zijn waarden bekend, maar voor een aantal (cruciale) parameters ontbreken soms actuele waarden. De meetfrequentie is vaak wel aanwezig, maar de validiteit van de waarde is soms lastig te achterhalen. Als de databron een sensor is, dan is de nauwkeurigheid ingevuld conform de specificatie van de sensor. Als de meetmethode niet is vastgesteld, zijn er meerdere waarden voor nauwkeurigheid ingevuld, passend bij de mogelijke meetmethoden. Als de bron een model is, kon vaak geen waarde worden ingevuld, omdat de onnauwkeurigheid van dat gebruikte model niet bekend was.

Tijdens de uitwerking van de use cases bleken veel data bruikbaar te zijn en enkele moesten nog bewerkt worden voor de toepassing. In het algemeen geldt dat voor een vloeiende koppeling tussen brondata, dataverwerking en (dus) visualisatie gelijke tijdschalen, validiteit, digitale uitwisselbaarheid en procesgerichtheid (met betrekking tot use case/doel) essentieel zijn. Tijdens het project is niet gesignaleerd dat data gecombineerd moesten worden voor het opvullen van ontbrekende data. Verder wordt geconcludeerd dat voor de meetdata verschillende validatieprotocollen worden gebruikt, wat kan leiden tot verschillen in de nauwkeurigheid van de valide data en verschillen in de trends van de meetreeksen. Veel waterschappen meten waterkwaliteit discontinu met handmeters en waterkwantiteit continu.

Geconcludeerd wordt dat het doel van inventarisatie van beschikbare databronnen en -stromen en dataformaten is bereikt. Naar de aansluiting van de verschillende formats is geen verder onderzoek verricht, maar dit wordt deels ondervangen doordat bij dataverwerking ruwe data gereed worden gemaakt voor modellering of andere verwerking. Het doel om resolutie en frequentie van data vast te leggen en te beoordelen of deze aan de eisen voldoen die de digital twin voor het waterbeheer daaraan stelt is niet gehaald, omdat deze eisen nog niet waren vastgelegd. Ten slotte wordt geconcludeerd dat het een werkbare scheiding van taken is als het thema Brondata verantwoordelijk is voor het beheer van de inventarisatie van databronnen, en het thema Dataverwerking verantwoordelijk is voor de verwerking van de ruwe data.

Aanbevolen wordt:

1. data-uitwisseling te laten voldoen aan wet- en regelgeving voor behoud van privacy en cyberveiligheid;
2. validatie te standaardiseren als er verschillende validatieprotocollen voor verschillende datastromen zijn;
3. bij gebruik van modellen de ontbrekende onnauwkeurigheden in te vullen;
4. afspraken te maken over het managen van de brondata en het opzetten van de juiste infrastructuur;
5. te zorgen voor continue levering van de brondata, wat ook een stabiele omgeving voor dataverzameling inhoudt;
6. brondata uit te wisselen met andere waterschappen en buurlanden.

De verdiepingsgroep Brondata noemt als geleerde les dat de ontwikkeling van een digital twin beter 'klein' had kunnen worden begonnen, uitgaande van een vastgesteld systeemdiagram, met een heel simpele use case, met databronnen waarvan waarden voor attributen of direct inzichtelijk waren, of makkelijk opvraagbaar. Op die manier hadden de databronnenlijst en attributenlijst iteratief (agile) kunnen worden opgebouwd, in plaats van via prioritering afbouwen. Nu leidde het vaststellen van attributen zoals 'onnauwkeurigheid meetinstrument' en 'meetfrequentie' tot heel veel discussie en was er moeilijk grip te krijgen op de vraag of data uit een sensor kwamen of uit een model.

De verdiepingsgroep Brondata ziet kansen in de samenwerking met de verdiepingsgroep Dataverwerking. Dit heeft veel opgeleverd en is sterk aan te raden, ook met dashboard-ontwerpers en bouwers. Dit helpt om dataverzameling en dataverwerking af te stemmen op beslissingsondersteuning. Een andere kans is er op het gebied van standaarden. Wanneer inventarisatielijsten van data geprioriteerd, volledig en eenduidig zijn, is het een goed moment om te kijken of het voldoet aan een passende of noodzakelijke standaard.

Verdieping Dataverwerking

De verdiepingsgroep Dataverwerking werkte aan technische oplossingen voor vraagstukken bij de thema's. De vraagstukken uit het thema droogte waren voor Waterschap Limburg:

1. Hoe op één locatie de verwachte grondwater*afvoer* te simuleren met behulp van een model dat is gekoppeld aan data;
2. Hoe op één locatie de verwachte grondwater*stand* te simuleren met behulp van een model dat is gekoppeld aan data.

Voor Waterschap Vallei en Veluwe was de vraag voor het thema droogte hoe een verbeterde bodemvochtverwachting te verkrijgen is met behulp van een ML-model.

Voor het thema Zuivering waren de vraagstukken:

1. Hoe kan het verwachte inkomende debiet naar de waterzuivering gesimuleerd worden, gegeven de regenval op verschillende locaties rondom de waterzuivering?
2. Hoe de verwachte waterkwaliteit in de waterzuivering te simuleren?
3. Hoe de verwachte waterkwaliteit in het effluent van de waterzuivering te simuleren?

De technische oplossingen bestaan uit verwachtingsmodules, gekoppeld aan verleden-tijd-datastromen. Een verwachtingsmodule geeft een toekomstige verwachting van een variabele (bijvoorbeeld grondwaterstand), gegeven een weersverwachting. De ontwikkelde verwachtingsmodules genereren alle een verwachting (tijdreeks) voor één locatie, maar zijn zo opgezet dat het relatief gemakkelijk is deze te gebruiken voor andere locaties. De interactie tussen verschillende locaties wordt niet direct gemodelleerd.

Een aantal verwachtingsmodules bestaat uit een fysisch procesmodel, aangevuld met een ML-model om de fout tussen het procesmodel en de gemeten werkelijkheid te verkleinen. Alle ontwikkelde verwachtingsmodules zijn deterministisch: ze geven één verwachting, een 'best estimate'. De onzekerheid daaromheen is nog niet meegenomen, maar het is wel van belang om dit in de toekomst te doen, zodat je de extremen niet mist en je risicoanalyses kunt uitvoeren. Het kwantificeren van onzekerheid is relatief gemakkelijk te realiseren met de huidige opzet van de modules.

De verwachtingsmodules voor Waterschap Limburg en Waterschap Vallei en Veluwe zijn online geïmplementeerd. Dat wil zeggen dat elke dag verleden-tijd-data worden gebruikt om de module te (her)kalibreren, waardoor een verandering in het klimaat langzaam wordt meegenomen.

Bij de module voor Waterschap Limburg wordt momenteel een decision tree (ML-model) gebruikt ter aanvulling op een fysisch procesmodel. Het is de moeite waard om te onderzoeken of andere type ML-modellen een betere verwachting kunnen leveren. Het is goed om andere scenario's te onderzoeken (naast het nu aanwezige droog, nat en normaal scenario). Meerdere verschillende historische weertijdreeksen kunnen bijvoorbeeld gebruikt worden om bijhorende verwachtingen te genereren, waaruit een gemiddelde en betrouwbaarheidsintervallen bepaald kunnen worden. Dit heeft als voordeel dat het ML-model alleen realistisch weer aangeboden krijgt en geen artificieel weer. Het nadeel van het aanbieden van artificieel weer is dat een ML-model deze niet heel goed kan extrapoleren. Verwachtingen kunnen worden gegenereerd voor locaties. De volgende stap is om ook tussen deze locaties een verwachting te genereren. Hiertoe moet een algoritme voor ruimtelijke interpolatie worden opgenomen in de module.

Voor het thema droogte bij Waterschap Vallei en Veluwe is één verwachtingsmodule ontworpen. Het ML-model in de module is stochastisch, waardoor onzekerheid kan worden meegenomen in de gegenereerde verwachting. Het initiële idee was om een fysisch procesmodel samen met een ML-model te gebruiken om een verwachting te genereren. Door technische problemen is het fysisch procesmodel uiteindelijk uit de module gehaald. Aanbevolen wordt een combinatie van fysisch procesmodel en machinelearning model te gebruiken, zodat de kennis die zit opgeslagen in een fysisch procesmodel wordt aangevuld met een ML-model voor de missende dynamica. Het model is momenteel gekoppeld aan .csv-bestanden, maar zou aan een server met historische data moeten worden gekoppeld. Het aantal locaties (4) waar een verwachting wordt gegenereerd, moet worden uitgebreid. Daarnaast is het belangrijk om de module uit te breiden met extrapolatie van verwachtingen naar locaties waar geen metingen zijn gedaan.

De gepresenteerde verwachtingsmodules moeten worden gezien als initiële modules (prototypes) die op verschillende punten kunnen worden verbeterd. De belangrijkste geleerde lessen zijn:

1. dat het zeer leerzaam is om met verschillende bedrijven/organisaties/personen samen te werken;
2. dat bij een R&D-project beter een aantal programmeurs en een groepsleider een initiële voorspelmodule (digital twin) ontwikkelen die daarna met managers/bestuurders wordt besproken dan dat er van bovenaf wordt gestuurd;
3. dat er te weinig dataspecialisten aanwezig waren om ideeën concreet uit te werken en dat dit tijdens meetings ook te weinig aan de orde kwam;
4. dat bij veel 'algemene' meetings te weinig concrete actiepunten werden besproken, wat ten koste ging van het enthousiasme van programmeurs;
5. dat de beschikbare uren verdeeld waren over een te grote groep personen, waardoor een project prioriteit verliest en een bijzaak wordt naast andere projecten.

Verdieping Visualisatie en Besluitvorming

De doelen van de verdiepingsgroep Visualisatie en Besluitvorming zijn:

1. het onderzoeken van de rol van digital twins in het besluitvormingsproces binnen het waterbeheer;
2. het ontwikkelen van visualisatieconcepten voor digital twins voor het waterbeheer en prototypes voor de pilot twins.

Belangrijke uitgangspunten zijn de informatiebehoefte van de gebruikers, technische aspecten en het ontwerp- en ontwikkelproces. Het betrekken van beoogde gebruikers vanaf het begin van ontwikkeling is essentieel om helderheid te krijgen over de vraagstelling van de waterschappen en verwachtingen ten aanzien van de digital twin.

Hoewel het doel van deze digital twin het leveren van betrouwbare informatie voor besluitvorming is, zullen altijd inherente onzekerheden aanwezig zijn in zowel de data als de modellen, waarmee gebruikers van digital twins op verschillende manieren kunnen omgaan bij besluitvorming.

De verdiepingsgroep werkte vanuit een gebruikersperspectief (user-centered design principles) in plaats van een 'data-driven' aanpak. Vanaf het begin zijn er workshops georganiseerd met projectvertegenwoordigers van de waterschappen om de beoogde gebruikers van de digital twin te identificeren, te onderzoeken welke vragen zij met de digital twin willen beantwoorden, welke besluitvormings- of planningsprocessen daarbij horen, welke informatie daarvoor nodig is en aan welke eisen de data moeten voldoen. Daarnaast zijn eisen opgesteld voor de functionaliteit van de interface en visualisatie. Gebruikerseisen zijn verwerkt in ontwerpschetsen en samen met de gebruikers en softwareontwikkelaars verder uitgewerkt. Voorafgaand aan de workshops zijn enkele gebruikersscenario's geformuleerd, die concrete vragen beschrijven waarvoor gebruikers met behulp van een digital twin op zoek gaan naar antwoorden of oplossingen. De workshops leidden tot verslagen waarin requirements ten aanzien van data, functionaliteit en visualisatie zijn beschreven en tot schetsen en voorbeelden van mogelijke dashboards. Daarnaast kwamen nieuwe vragen en behoeften aan het licht met betrekking tot de benodigde informatie.

Om een beeld te krijgen van hoe gebruikers van de digital twin nu omgaan en in de toekomst om zouden kunnen gaan met onzekerheid bij besluitvorming, hebben betrokkenen van het project en externe deskundigen in oktober 2023 hierover in een workshop 'Besluitvorming met Digital Twins' gesproken. Een tweede workshop, voor projectleden, vond plaats in september 2024, met als doel een antwoord te vinden op de vraag: hoe kwantificeren en visualiseren we onzekerheid in de digital twin voor het waterbeheer? Een spel is ontwikkeld om beter te begrijpen hoe de beoogde gebruikers van de waterschappen in de praktijk omgaan met modelresultaten. Het spel maakt duidelijk of de gebruikers op de adviezen van de digital twin vertrouwen of zich laten leiden door hun eigen kennis en inschattingen en nieuwe informatie die in het spel worden ingebracht.

Tijdens het project bleek het lastig om de ontwerpstrategie te volgen, bijvoorbeeld omdat data al werden geïnventariseerd en bewerkt voordat alle casussen waren bepaald en uitgewerkt. Daardoor sloten de aangeleverde data in enkele casussen niet aan bij de gebruikersvragen, waardoor de doelen van de dashboards moesten worden bijgesteld. De verdeling van activiteiten over verschillende organisaties en personele wisselingen bemoeilijkten de afstemming en planning, leidden tot vertragingen en verstoorde de continuïteit. Een voorgenomen aanpak met zogeheten sprints, zoals in IT-projecten vaak wordt toegepast, is uiteindelijk niet gelukt omdat dit een onderzoeksproject betrof waarbij verschillende organisaties soms maar een kleine rol hadden.

Ten aanzien van besluitvorming wordt geconcludeerd dat er een sterke tendens is om onzekerheid te verminderen door zo veel mogelijk nieuwe data te verzamelen, terwijl dit niet noodzakelijkerwijs leidt tot betere besluitvorming. Dat informatie over onzekerheid nuttig is bij het nemen van beslissingen wordt ingezien, ook dat benutting van deze informatie de doelmatigheid van beslissingen kan vergroten. Geconcludeerd wordt dat een digital twin onzekerheid niet mag verhullen, maar waar mogelijk kwantitatieve informatie over onzekerheid moet geven, moet laten zien welke data beschikbaar zijn, welke ontbreken en wat de kwaliteit van de data is.

Er is een risico is dat de nadruk te veel op kwantitatieve data komt te liggen, terwijl niet alles kwantificeerbaar is en op dezelfde manier beoordeeld kan worden. Een digital twin biedt de kans om andere soorten gegevens te benutten, zoals resultaten van bijvoorbeeld inspecties en kwalitatieve beoordelingen, naast empirische/kwantitatieve data. Het principe 'meten is weten' bleek echter een sterke rol te spelen in dit domein en kwalitatieve data of kennis worden als minder betrouwbaar en belangrijk beschouwd. Verschillende soorten data of informatie die op een andere manier getoond moeten worden dan in een getal, grafiek, of punt op een kaart, worden nu niet getoond in dashboards, zoals waarnemingen van visuele inspecties, ecologische schade of kennis van lokale omstandigheden. Dit geeft een risico op vertekening. Geconcludeerd wordt dat de definitie van een digital twin voor discussie blijft zorgen. Ook de rol van een digital twin in de organisatie blijft een onderzoeksvraag. Geconcludeerd wordt dat de producten van dit project een kleine bijdrage leveren aan de integratie van verschillende vakgebieden binnen een waterschap. Het is ten dele gelukt door de lagen van de waterschapsorganisatie heen te kijken, zodat de digital twin niet vooral door bijvoorbeeld hydrologen wordt gebruikt, maar al een doorkijk kan geven naar vraagstukken op andere niveaus, die soms meer politiek kunnen zijn. Betrokkenheid van vertegenwoordigers van de hogere management- en bestuurslagen kwam nauwelijks tot stand, maar de hydrologen, adviseurs en dataexperts van de waterschappen die deelnamen aan de workshops brachten zelf de langetermijndoelen in. Om de hogere management- en bestuurslagen in een project meer te betrekken, zouden vertegenwoordigers vanaf aanvang een duidelijke rol moeten krijgen in de projectgroepen en activiteiten.

Geleerde lessen en aanbevelingen zijn:

1. Volg bij de ontwikkeling van een digital twin een IT-strategie zoals Agile-development en incrementeel ontwerp, omdat dit bijdraagt aan efficiëntie en een product dat goed aansluit op gebruikersbehoeften en technische eisen.
2. Reserveer voldoende budget voor de interface-ontwikkeling, waarbij de front-end-ontwikkelaar voldoende ervaring moet hebben met gebruikersonderzoek, rekening moet houden met gebruikerseisen en bestaande applicaties van het waterschap en waarbij hier vroegtijdig over wordt gecommuniceerd.
3. Wijs een producteigenaar vanuit het waterschap aan om de eindverantwoordelijkheid te dragen en keuzes over data en interface te maken, voor consistentie en voortgang.
4. Betrek een statisticus bij het opstellen van het projectvoorstel, vooral het formuleren van probleemstelling, doel en onderzoeksvragen. Dit kan bijdragen aan de structuur van een besluitvormingsvraagstuk en de beschikbaarheid van de informatie die nodig is bij besluitvorming.
5. Zet het onderwerp onzekerheid goed in een projectvoorstel, zet het vanaf het begin op de agenda en wijs het toe aan mensen/rollen in het project, die er ook over rapporteren.
6. Kwantificeer bij dataverzameling en bij dataverwerking met modellen de onzekerheid, zodat deze kan worden gevisualiseerd.
7. Waterschappen zouden zich kunnen bezinnen over de rol van doelmatigheid bij besluitvorming, omdat kwantitatieve informatie over onzekerheid essentieel is bij het nemen van doelmatige beslissingen.
8. Het structureren van vraagstukken waarover een beslissing moet worden genomen, is een effectieve manier om de juiste tool in te zetten en zo tot een weloverwogen beslissing te komen.
9. Structureer bij en door het gebruik van een digital twin besluitvormingsvraagstukken zo goed mogelijk en vermijd onnodige complexiteit, teneinde de informatie over onzekerheid zo goed mogelijk te benutten bij de besluitvorming.

Algemene conclusie, geleerde lessen en aanbevelingen

Het primaire doel van het project was om te leren op welke manier de inzet van een digital twin ons inzicht in het watersysteem kan vergroten. De lange doorlooptijd en personeelsswisselingen bij deelnemende organisaties gaven uitdagingen aan het project. De technische ontwikkeling van een digital twin is meer gebaat bij een kortere doorlooptijd. Bij dit project liepen de discussies over definities en de rol van een

digital twin tegelijkertijd met de technische ontwikkeling. De discussies over definities kunnen echter beter bij de start van het project worden gevoerd. Zodra er duidelijke kaders en cases zijn, kan de daadwerkelijke ontwikkeling worden opgestart. In het brede consortium was veel kennis aanwezig, maar dit kostte ook de nodige afstemming en het bleek een uitdaging om het geheel efficiënt te laten werken. Dit verdient in de projectstructuur meer aandacht. Het maken van één digital twin voor het waterbeheer bleek qua beschikbare data en modellen een brug te ver. Per thema is wel een losse digital twin ontwikkeld waarbij er kansen liggen om de thema's Zuivering en Waterkwaliteit te koppelen. Al met al was het een uitdagend, maar leerzaam project met waardevolle inzichten en toepasbare resultaten.

Geleerde lessen over de organisatie en uitvoering project digital twin voor het waterbeheer:

1. Taal en taalgebruik bleken een belangrijke rol te hebben gespeeld bij het verloop van het project en bij de producten die het project heeft opgeleverd. De duidelijk uitgewerkte beeldspraak van een tweeling kan een gemeenschappelijke taal bieden waarmee spraakverwarring als gevolg van jargon kan worden voorkomen. Bij de digital twin voor het waterbeheer bleek de beeldspraak, ondanks de lange aanloop, toch onvoldoende te zijn uitgewerkt, waardoor de verschillende (ook regelmatig nieuwe) betrokkenen er verschillende uitleg en invulling aan gaven in elk hun eigen jargon.
2. De samenwerking met verschillende bedrijven/organisaties/personen bleek zeer leerzaam te zijn.
3. Bij verschillende thema's en verdiepingsgroepen werd – terugkijkend – geconcludeerd dat beter 'klein' had kunnen worden begonnen aan de ontwikkeling van een digital twin voor het waterbeheer, verdeeld over minder personen, zodat deze er meer prioriteit aan hadden kunnen geven.
4. De weinige hydrologen en datascientists die beschikbaar zijn bij waterschappen hebben beperkte tijd om mee te werken aan de ontwikkeling van de digital twin, maar zowel systeemkennis als kennis van machinelearning zijn nodig om een begrijpelijke digital twin te ontwerpen.
5. Bij de ontwikkeling van de digital twin werd er vanaf het begin onvoldoende rekening mee gehouden dat onzekerheid moet worden gekwantificeerd.
6. In alle use-cases bleek dat het ontwikkelen van een digital twin ook vraagt dat je heel gericht onderzoekt welke kernvragen je wilt beantwoorden. Het bleek dat het kan helpen om met mensen uit verschillende disciplines het vraagstuk te beschrijven in een stroomschema of bouwplaat, die zichtbaar maakt welke data op welke manier worden gecombineerd tot de output uit de digital twin.

Geleerde lessen over de inhoud en functionaliteiten van digital twins:

1. Combinaties (hybrides) van fysische procesmodellen en machine-learningmodellen kunnen betere resultaten opleveren dan niet-gecombineerde modellen.
2. Voor een vloeiende koppeling tussen brondata, dataverwerking en (dus) visualisatie zijn gelijke tijdschalen, validiteit, digitale uitwisselbaarheid en procesgerichtheid (met betrekking tot use case/doel) essentieel.
3. Data-uitwisseling moet voldoen aan wet- en regelgeving voor behoud van privacy en cyberveiligheid.
4. Belangrijk is of een digital twin wordt toegepast in een omgeving met een beperkt aantal parameters of in een omgeving die is omgeven van de onzekerheden.
5. Bij de digital twins worden vaak meerdere datastromen gecombineerd tot een nieuwe output. Hierbij is gebleken dat het goed is om ook na te gaan welk type onzekerheid of foutmarge je accepteert in je uitkomst. Er ontstaat namelijk een risico als je onzekerheid op onzekerheid stapelt.

Geleerde lessen over de benutting van een digital twin bij besluitvorming:

1. Om betrouwbare uitspraken te doen op basis van gegevens en modeluitkomsten van bijvoorbeeld het grondwaterniveau, die zijn opgeschaald van punt- naar gebiedsniveau, is het belangrijk om over een goed bruikbare definitie voor opschaling te beschikken.
2. Voor het ondersteunen van besluitvormingsprocessen is het belangrijk te weten wie met de output van de digital twin moeten werken en welk type informatie nodig is om tot besluitvorming te komen.
3. Geconstateerd wordt dat er vaak behoefte is om de uitkomst uit een digital twin meer te verbinden aan bijvoorbeeld kosten-batenafwegingen of uit te drukken in een kans van optreden.

Aanbevelingen voor de organisatie en uitvoering project digital twin voor het waterbeheer:

1. Hanteer in projecten voor applicatieontwikkeling, zoals digital twins, een IT-strategie zoals agile-development en incrementeel ontwerp. Dit zorgt voor flexibiliteit, frequente feedback en betere gebruikersafstemming. Deze aanpak bevordert een efficiënt proces en een product dat goed aansluit op gebruikersbehoeften en technische eisen. User-centered design en toetsing van de producten is essentieel.
2. Wijs een producteigenaar vanuit het waterschap aan om de eindverantwoordelijkheid te dragen en keuzes over data en interface te maken, voor consistentie en voortgang.
3. Betrek een statisticus bij het opstellen van het projectvoorstel, ook bij het formuleren van probleemstelling, doel en onderzoeksvragen. Dit bevordert de vertaling van beslisproblemen in statistische beslismodellen (zoals statistische toetsen), voeding van deze beslismodellen met de benodigde gegevens en kwantificering van onzekerheid.
4. De samenwerking tussen de verdiepingsgroepen Brondata met Dataverwerking heeft veel opgeleverd en is ook sterk aan te raden met dashboard-ontwerpers en -bouwers. Dit helpt om dataverzameling en dataverwerking af te stemmen op beslissingsondersteuning.
5. Pak de ontwikkeling van een digital twin programmatisch en niet projectmatig aan, met meer onafhankelijkheid van deelprojecten een scheiding van productontwikkeling en onderzoek.
6. Werk in kleine dedicated teams aan gericht gereedschap dat daadwerkelijk gebruikt kan worden.
7. Zorg voor voldoende capaciteit.
8. Pas de werkvorm, planning en capaciteit aan de inhoud van (deel)projecten aan.

Aanbevelingen voor de inhoud en functionaliteiten van digital twins:

1. Uitwisseling van brondata met andere waterschappen en buurlanden is een uitdaging omdat gewerkt wordt met andere datasystemen. Het is essentieel om dit nader af te stemmen met waterschappen en buurlanden België en Duitsland.
2. Zorg bij verschil in validatieprotocollen voor verschillende datastromen voor standaardisatie van de validatie.
3. Bedenk goed wat voor een type vraag je met een digital twin wilt bedienen. Is dit een optimalisatievraagstuk, dan moet je vooral kijken naar de typen data die je nodig hebt om de optimalisatie door te voeren. Vooral voor zuiveringsprocessen is dit een vraagstuk dat meer en meer in de belangstelling komt.

Aanbeveling voor de benutting van een digital twin bij besluitvorming:

1. Structureer bij en door het gebruik van een digital twin besluitvormingsvraagstukken zo goed mogelijk en vermijd onnodige complexiteit. Voor de benutting van een digital twin bij besluitvorming is het structureren van besluitvormingsvraagstukken een effectieve manier om de juiste tool in te zetten en zo tot een weloverwogen beslissing te komen.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en probleemstelling

Waterschappen zijn regionaal verantwoordelijk voor de waterkwantiteit (voldoende water en droge voeten), waterkwaliteit (schoon water) en waterveiligheid (veilige dijken). Om hun operationele taken uit te kunnen voeren, moeten waterschappen voortdurend beschikken over actuele informatie over de toestand van het watersysteem. Om hierin te voorzien, hebben zij uitgebreide monitoringsnetwerken ingericht. Daarnaast kunnen zij beschikken over informatie uit andere bronnen, zoals visuele inspectiedata. De ontwikkelingen op het gebied van monitoring en betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van informatie verlopen snel, bijvoorbeeld door de ontwikkeling van nieuwe sensoren, steekproefopzetten en verwerkingsmethoden. Het ontbreekt veel waterschappen echter aan tools om deze informatiebronnen optimaal te benutten bij de gebiedsgerichte, operationele sturing en het opstellen van strategische adviezen hiervoor.

Ook blijken de beschikbare tools vaak onvoldoende geschikt te zijn om beslissingen te ondersteunen die tijdens calamiteiten moeten worden genomen. Bovendien is de presentatie van informatie niet altijd afgestemd op de behoeften van de vraagsteller. Daardoor bestaat het risico dat informatie verkeerd wordt geïnterpreteerd, wat kan leiden tot beslissingen die niet efficiënt en effectief zijn.

Verder vinden op dit moment de dataverzameling, de uitbreiding van monitoringsnetwerken en de dataverwerking, bijvoorbeeld in modellen, vaak vraaggestuurd en versnipperd plaats. Een totaaloverzicht met een integrale afstemming hierin ontbreekt, wat kan leiden tot desinvesteringen en het suboptimaal gebruik van de beschikbare data.

Samengevat is het probleem dat de verschillende ontwikkelingen op het gebied van dataverzameling, dataverwerking en presentatie van informatie bij waterschappen onvoldoende met elkaar samenhangen en onvoldoende zijn afgestemd op het ondersteunen van beslissingen in zowel het operationele waterbeheer (inclusief calamiteiten) als het strategische waterbeheer. Ondertussen zijn buiten het waterbeheer digital twins 'booming'. Een digital twin is, aldus Wikipedia, een digitaal model van een beoogd of feitelijk fysiek product, systeem of proces uit de echte wereld (een fysieke tweeling) dat dient als de feitelijk niet te onderscheiden digitale tegenhanger ervan voor praktische doeleinden, zoals simulatie, integratie, testen, monitoring en onderhoud. De vraag is of zo'n digitale tweeling ook kan worden gemaakt van een watersysteem dat door een waterschap wordt beheerd, zodanig dat deze bijdraagt aan betere beslissingen in het waterbeheer. Het werkveld op het vlak van waterbeheer is breed, maar omvat in hoofdzaak drie hoofdtaken: het beheer van kwantiteit van water, de kwaliteit van oppervlaktewater en het zuiveren van afvalwater. In dit project is gekozen om op alle drie deze werkvelden door middel van use cases de toepassing van een digital twin te onderzoeken.

1.2 Doel

De primaire doelstelling van het project is om te leren op welke manier de inzet van een digital twin ons inzicht in het watersysteem kan vergroten.

Het project kent drie thema's: waterkwaliteit, droogte en zuivering. Elk thema heeft een aantal subdoelen, die worden vermeld bij de beschrijving van de betreffende thema's, zie paragraaf 1.3.

De drie thema's hebben een aantal overkoepelende doelen, te weten:

1. het verschaffen van duidelijkheid hoe een digital twin kan worden toegepast in een organisatie en welke factoren belangrijk/cruciaal zijn in het proces;
2. het verkennen en testen van de mogelijkheden in de toepassing van nieuwe technologieën in een digital twin voor het optimaliseren van data(stromen) en het ontdekken van nieuwe verbanden;
3. het verkrijgen van inzicht in de impact die een digital twin kan hebben in het besluitvormingsproces van waterbeheerders op zowel strategisch als operationeel niveau;

-
4. het verkennen van innovatieve visualisatietechnieken voor het in beeld brengen van data en modelresultaten die aansluiten bij de specifieke gebruiker en kan bijdragen aan een goede besluitvorming.

Verdiepend onderzoek werd verricht door drie werkgroepen, te weten Brondata, Dataverwerking en Visualisatie en Besluitvorming.

1.3 Opbouw van het rapport

Hoofdstuk 2 geeft het theoretisch raamwerk van het project. Hoofdstuk 3, 4 en 5 geven per thema (resp. waterkwaliteit, droogte, zuivering) een beschrijving van:

1. subdoelen;
2. aanpak;
3. resultaten. Afhankelijk van het nagestreefde maturity level een beschrijving van
 - a. de verzamelde informatie;
 - b. de opgedane kennis;
 - c. het gerezen begrip;
 - d. het verkregen inzicht;
 - e. de gegroeide wijsheid;
4. conclusies, geleerde lessen voor het betreffende thema.

Hoofdstuk 6, 7 en 8 doen verslag van het verdiepende onderzoek door respectievelijk de werkgroepen Brondata, Dataverwerking en Visualisatie en Besluitvorming, volgens dezelfde opbouw als bij de drie thema's, eveneens met conclusies en geleerde lessen voor de betreffende verdieping. Hoofdstuk 9 bevat een algemene conclusie en algemene, geleerde lessen.

2 Theoretisch raamwerk

Bij het realiseren van de doelen van dit project is de matrix van maturity levels (Figuur 1) het uitgangspunt geweest. Deze matrix, gepresenteerd door Metcalfe (2020) en beschreven door Metcalfe e.a. (2023), biedt een theoretisch raamwerk met als doel de volgende vragen te beantwoorden:

1. Waartoe is een digital twin in staat (capaciteiten)?
2. Wat doet een digital twin (welke capaciteiten worden benut)?

Metcalfe e.a. (2023) ontwikkelden dit theoretische raamwerk om ontwikkelaars en belanghebbende partijen te helpen overeenstemming te vinden over de doelen en capaciteiten van digital twins. Zij onderkennen dat het begrip 'digital twin' geen formele expliciete definitie kent, wat ertoe leidt dat verschillende disciplines het begrip uiteenlopend definiëren. Er kunnen dus verschillende soorten digital twins zijn. Metcalfe e.a. (2023) beschouwen uit praktisch oogpunt een definitie van een digital twin geldig wanneer deze aan de volgende criteria voldoet:

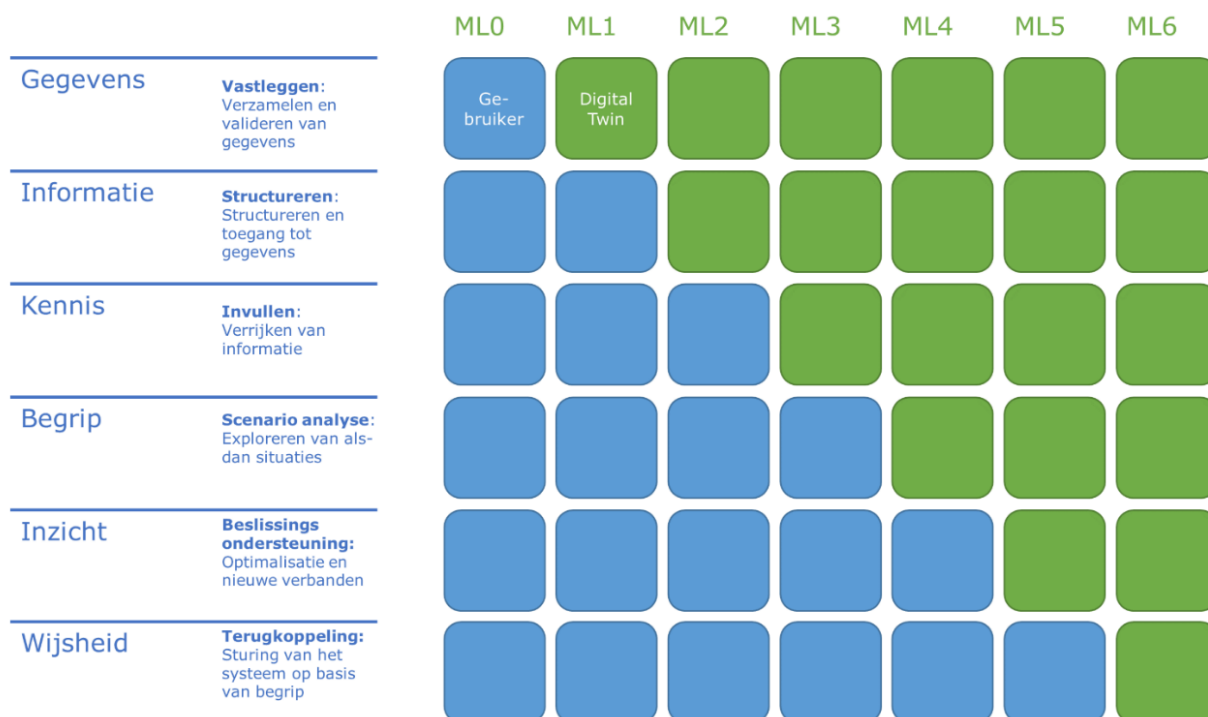
- De digital twin is een virtuele representatie, replica of simulatie van een feitelijk of mogelijk fysiek 'eigendom' (En: asset), in (bijna) continue tweerichtingscommunicatie met zijn tegenhanger, om een actieve rol te spelen in planning, besluitvorming en procescontrole door het geven van feedback.
- De digital twin zal in de eerste plaats datagedreven zijn en in staat zijn tot, of het vermogen hebben tot, het voorspellen van toekomstige trends of ontwikkelingen over een bepaalde periode. Hier hoeft feedback geen geautomatiseerd proces te zijn, maar eenvoudigweg integratie van de resultaten van de digital twin in een besluitvormingsproces.

Samengevat zijn er zijn vier overeenkomsten tussen de verschillende soorten digital twins: (1) een fysiek 'eigendom'; (2) een virtuele representatie; (3) tweerichtingscommunicatie; en (4) een of andere vorm van feedback.

- Gegeven bovenstaande criteria waaraan een digital twin moet voldoen, zijn in dit project de volgende maturity levels onderscheiden (Figuur 1) op basis van Metcalfe e.a. (2023):
- **Maturity level 1: gegevens** vastleggen, waardoor de verschillende gebruikers gebruikmaken van dezelfde sets aan data.
- **Maturity level 2: informatie** structureren, waarin de inzet van data voor specifieke vraagstukken wordt gestructureerd en geautomatiseerd.
- **Maturity level 3: kennis** vergaren door verrijkte gegevens. Door de inzet van validatietechnieken en het opvullen van 'witte vlekken' kan de toestand van het watersysteem beter in beeld worden gebracht. Door gegevens met elkaar te combineren, kunnen nieuwe verbanden worden gelegd tussen thema's en in de geografische ruimte.
- **Maturity level 4: begrip** van het watersysteem. Door de toevoeging van scenario's (als-dan-situaties) aan de digital twin komt het systeemgedrag onder aangepaste omstandigheden/maatregelen in beeld.
- **Maturity level 5: inzicht** door gegevensanalyse en data-optimalisatie. Met technieken als Machinelearning (ML) en Artificial Intelligence (AI) kunnen nieuwe verbanden worden ontdekt en de data(stromen) geoptimaliseerd worden. Dit levert (nog) meer inzicht op in systeemgedrag en effectueert de besluitvorming.
- **Maturity level 6: wijsheid** door sturing op basis van begrip. Op dit niveau heeft de digital twin volledige systeemcontrole en kan worden ingezet in de operationele sturing.

De maturity levels die Metcalfe e.a. (2023) onderscheiden, gaan uit van ML-modellen en fysische, proces-gebaseerde modellen die de fysieke werkelijkheid niet exact beschrijven; er is dus onzekerheid. Kennis en informatie over onzekerheid wordt niet gebruikt in de bovenstaande aanduidingen van maturity levels. Ook in de genoemde criteria waaraan de definitie van een digital twin moet voldoen, komt kennis en informatie over onzekerheid niet voor. Maturity level 5, wijsheid, en ook de lagere maturity levels, bevatten dus in principe niet de Socratische wijsheid die betrekking heeft op het besef van de grenzen van kennis. Deze wijsheid kan echter waardevol zijn bij het nemen van beslissingen. Morgan en Henrion (1990) laten zien dat de Socratische ratio (dat is de verhouding tussen de verwachte waarde van benutten van informatie over onzekerheid en de verwachte waarde van perfecte informatie) groter dan 1 kan zijn. Wehrens e.a. (2021) geven een theoretisch kader voor het omgaan met onzekerheid bij een digital twin voor het waterbeheer.

Onderdelen hiervan zijn een indeling naar structuur van beslisproblemen, componenten van onzekerheid en strategieën om met onzekerheid om te gaan. Voor dat laatste gebruiken Wehrens e.a. (2021) de uitwerking van de monstermetafoor (Smits, 2006; Van der Sluijs, 2005) door Poortvliet e.a. (2019).



Figuur 1 Digital twin maturity level raamwerk.

3 Thema Waterkwaliteit

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de aanpak en resultaten van het (deel)project digital twin waterkwaliteit. De digital twin voor waterkwaliteit is ontwikkeld voor de casus 'Zijdewetering' in het beheergebied van Waterschap Vallei en Veluwe. Hierbij werd, evenals bij de andere digital twins, gewerkt vanuit een generiek raamwerk met gebieds- en thema-specifieke data, modellen en visualisatietechnieken, aangevuld met nieuwe digitale technologieën.

Waterschap Vallei en Veluwe wil met behulp van de digital twin voor waterkwaliteit meer inzicht krijgen in de werking van de processen in het waterlichaam van de Zijdewetering om sturingsmogelijkheden te identificeren. Specifieke doelen van de digital twin voor waterkwaliteit zijn:

- het verkrijgen van inzicht in de actuele situatie wat betreft oppervlaktewaterkwaliteit voor het hele watersysteem in een pilotgebied (zowel KRW-lichamen als overige wateren);
- het relateren van de actuele situatie aan de hiervoor bepalende systeemkenmerken en processen, hetgeen moet leiden tot een antwoord op de vraag 'waarom is het zoals het is?';
- het beoordelen van de actuele situatie aan de hand van geldende (ecologische) waterkwaliteitsdoelen en het beoordelen van de hiervoor bepalende (ecologische sleutel)factoren;
- het verbeteren van het meet- en monitoringsnetwerk met betrekking tot de waterkwaliteit.

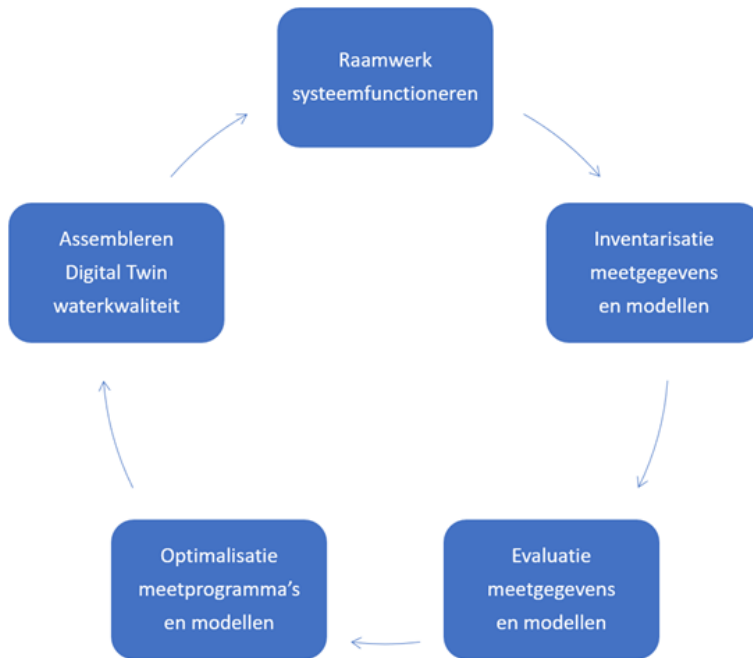
Gestreefd wordt naar een digital twin in maturity level 3 (Kennis, zie hoofdstuk 2 en Figuur 1). Dit is minder ambitieus dan bij de andere twee digital twins, omdat de beschikbaarheid, frequentie van data en voorspellende waarde van data beperkter zijn. De nadruk ligt op het verzamelen en valideren van gegevens, het structureren en toegankelijk maken van gegevens en het verrijken van informatie door gegevens te combineren. Gebruikers kunnen op grond hiervan tot systeembegrip komen. De digital twin voor waterkwaliteit beoogt qua bouwstenen generiek van opzet te zijn, maar focust op de processen die van belang zijn voor de vorming van ammoniak. Dit betekent dat met relatief kleine aanpassingen in de digital twin ook andere type waterkwaliteitsvragen kunnen zijn geanalyseerd. We werken van grof naar fijn en gaan zo veel mogelijk uit van bouwstenen die eerder met succes zijn toegepast.

3.2 Aanpak

Om de digital twin (ecologische) waterkwaliteit te ontwikkelen zijn de volgende stappen cyclisch doorlopen (Figuur 2):

1. **Raamwerk functioneren watersysteem.** In het raamwerk wordt het functioneren van het watersysteem kwalitatief beschreven, de componenten die het systeem bevat en de relaties tussen deze componenten.
2. **Inventarisatie metingen en modellen.** Vervolgens zijn de ecosysteemcomponenten en hun onderlinge relaties gekwantificeerd. Deze kwantificering is gebaseerd op (realtime) meetgegevens en (biofysische) procesmodellen of statistische/ML-modellen. Er wordt geïnventariseerd voor welke parameters gegevens beschikbaar zijn of ontsloten kunnen worden en welke modellen ingezet kunnen worden om processen te beschrijven.
3. **Evaluatie metingen & modellen.** In de derde stap zijn de benoemde datastromen en modellen geëvalueerd op hun bruikbaarheid voor de digital twin. Kunnen ze bijvoorbeeld operationeel ingezet worden, leveren ze de benodigde informatie op en zijn ze voldoende uitwisselbaar en koppelbaar? Centraal staat hierbij het verkrijgen van een gebiedsdekkend beeld.
4. **Optimalisatie/verrijking gegevensstromen en modellen.** In stap 4 beschrijven we oplossingsrichtingen voor de gesignaleerde knelpunten in stap 3 en geven aan waar aanvullende metingen, aanpassingen van meetprogramma's of aanvullende model-modules nodig zijn om meer inzicht te krijgen in het functioneren van het watersysteem.

5. **Ontwikkeling digital twin.** Om de digital twin te assembleren, zijn koppelingen gemaakt tussen de selectie van informatiestromen en modellen die het best passen op het raamwerk dat het watersysteem beschrijft. De digital twin wordt zo veel mogelijk gebaseerd op generieke principes van het systeem-functioneren zodat deze breed toepasbaar is en in verschillende stroomgebieden kan worden ingezet. Om echter de ontwikkeling te faciliteren, wordt in eerste instantie de digital twin wel toegespitst op een specifiek stroomgebied.



Figuur 2 Cyclische ontwikkeling digital twin waterkwaliteit.

Raamwerk watersysteem

Om beter inzicht te krijgen in de werking van watersystemen voeren waterschappen watersysteemanalyses uit. Vaak bestaan deze uit beschrijvingen van de afzonderlijke componenten van het systeem: hydrologie, geomorfologie, stofstromen etc. Voor waterkwaliteit is het belangrijk dat de componenten in samenhang worden beschouwd en dat het geheel als uitgangspunt wordt genomen. Hiervoor zijn de laatste jaren twee methoden ontwikkeld, te weten de ESF- en de SESA-methode:

- ESF: Ecologische Sleutelfactoren
- SESA: Systeemgerichte Ecologische Stressanalyse

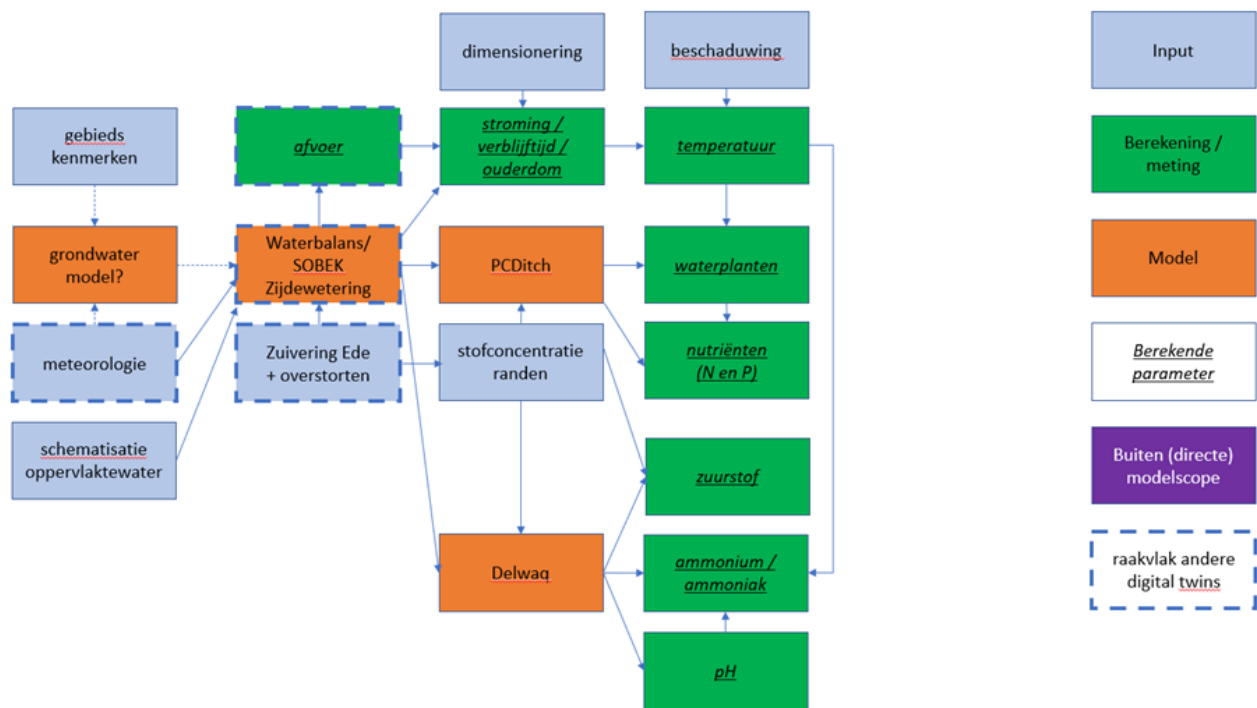
In beide methoden is er aandacht voor de samenhang tussen de waterkwaliteit in een watersysteem en de omgeving en wordt een overzicht gegeven van relevante factoren. Bij de ESF-methode is er veel energie gestoken in het kwantificeren van randvoorwaarden op het watersysteem. Hiervoor zijn ook bestaande tools verbeterd. Voorbeelden zijn de STOWA-waterbalans en de ecologische modellen PCLake (voor meren en plassen) en PCDitch (voor lijnvormige wateren). Bij de SESA-methode is er veel energie gestoken in het beoordelen van de stress op een watersysteem aan de hand van een stressscore, waarbij bijvoorbeeld morfologische, hydrologische en chemische stress zijn gekwantificeerd.

In de digital twin waterkwaliteit bouwen we verder op basis van deze twee methoden. Belangrijk uitgangspunt hierbij is dat we de digital twin waterkwaliteit zo veel mogelijk baseren op informatie over de randen van het watersysteem en valideren met metingen. Dit is in lijn met hoe de genoemde modellen binnen de ESF-methode zijn toegepast. Belangrijke voordelen zijn:

- de digital twin is niet afhankelijk van metingen in het watersysteem;
- de benadering helpt om meer inzicht te krijgen in:
 - het operationeel beheer (met name het inlaatbeheer);
 - relevante processen;

- de bouwstenen en parameters van modellen zijn robuust, omdat ze ieder op zichzelf gevalideerd zijn en reeds bewezen zijn in tal van studies voor waterbeheerders;
- de digital twin is modulair op te bouwen en steeds verder uit te breiden, ook na dit project. Een voorbeeld is dat er op basis van de STOWA-waterbalans en de ecologische modellen PCLake en PCDitch een (prototype) waterkwaliteitsstresstest voor het berekenen van gevolgen van klimaatverandering is ontwikkeld en een (prototype) model voor het berekenen van broeikasgasemissies uit oppervlaktewater.

Het resultaat is een zo volledig mogelijk schema met ingreep-effectrelaties, waarbij geredeneerd wordt vanuit de randen van het watersysteem (de ondergrond, het landschap en het klimaat) en het beheer, zie Figuur 3.



Figuur 3 Voorbeeld van een (basis)schematisatie van het watersysteem, waarbij geredeneerd wordt vanuit de randen van het watersysteem (de ondergrond, het landschap en het klimaat) en het beheer. Hierbij wordt expliciet onderscheid gemaakt in de input (zoals de meteorologie vanuit KNMI-gegevens en gebiedskenmerken zoals de bodemopbouw) en de modellen die een vertaling maken naar de voor de waterkwaliteit relevante informatie (zoals het grondwatermodel, de waterbalans en een waterkwaliteitsmodel als PCDitch of Delwaq). De resultaten uit de modellen (berekende parameters) kunnen vervolgens worden vergeleken met metingen (zoals de afvoer, de stroming, de temperatuur en het zuurstofgehalte).

Inventarisatie metingen en modellen

In deze stap zijn de ecosysteemcomponenten en hun onderlinge relaties geparametriseerd en gekwantificeerd. Geïnteriseerd wordt welke meetgegevens en modellen beschikbaar zijn of ontsloten zouden kunnen zijn om de processen in het watersysteem te beschrijven. De (a)biotische informatie die als invoer dient voor de systeemanalyse (hydrologie, morfologie, punt- en diffuse bronnen van stoffen etc.) is hierbij het uitgangspunt. Hierop wordt op twee manieren voortgebouwd:

1. (Gebieds breed) door het ontsluiten van meetgegevens op een gestructureerde wijze (bijvoorbeeld gekoppeld aan ESF's). Hiervoor wordt gekeken naar de huidige meetnetten van de waterbeheerders. In dit kader zijn bijvoorbeeld continu-meetpunten interessant (debiet, zuurstof, temperatuur), omdat deze een hoge informatiedichtheid hebben, soms zelfs realtime.
2. (Casusspecifiek) door meer detailinformatie te genereren door gebruik te maken van passende modellen, bijvoorbeeld waterstromen (waterbalans) en de diffuse aanvoer van nutriënten.

Pilotgebied

Het pilotgebied voor deze digital twin is het Zijdedeweteringsysteem. Dit systeem is een KRW-waterlichaam en ontvangt veel water vanuit de Zuivering Ede. Er zijn veel vragen rond de waterkwaliteit en effectiviteit van maatregelen. Het is een relatief veel bemeten systeem. Vanwege de raakvlakken met de zuivering en hoge meetdichtheid maakt dit een goede pilot voor de digital twin voor waterkwaliteit. Het systeem is voor deze pilot in twee peilvakken onderverdeeld. De volledige systeemanalyse is te vinden in Bijlage 1.

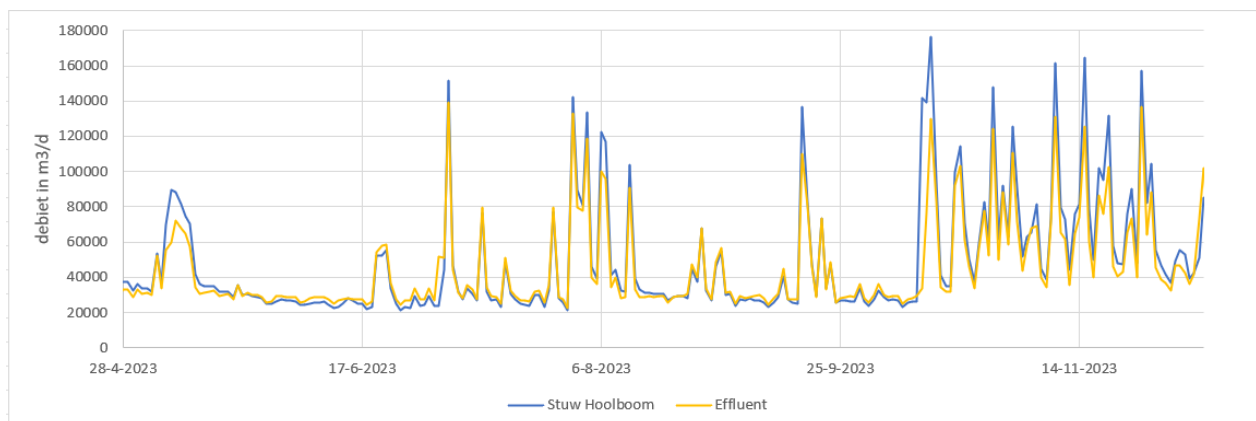
3.3 Resultaten

Volgens de bovengeschetste aanpak is een digital twin uitgewerkt voor het pilotgebied Zijdedewetering, zie Bijlage 1. Hieronder volgt een discussie van de resultaten per maturity level van de digital twin.

3.3.1 Gegevens en informatie

De eerste stap voor de digital twin is het vastleggen en structureren van bestaande gegevens, wat leidt tot een aantal visualisaties. In Figuur 55 is de databeschikbaarheid voor de modellering van het peilvak Zijdedewetering te zien. Niet alle benodigde gegevens zijn even frequent beschikbaar. Dit geeft inzicht in de betrouwbaarheid van de data als input van de modellering en dit heeft gevolgen voor de betrouwbaarheid van de resultaten uit de modellering.

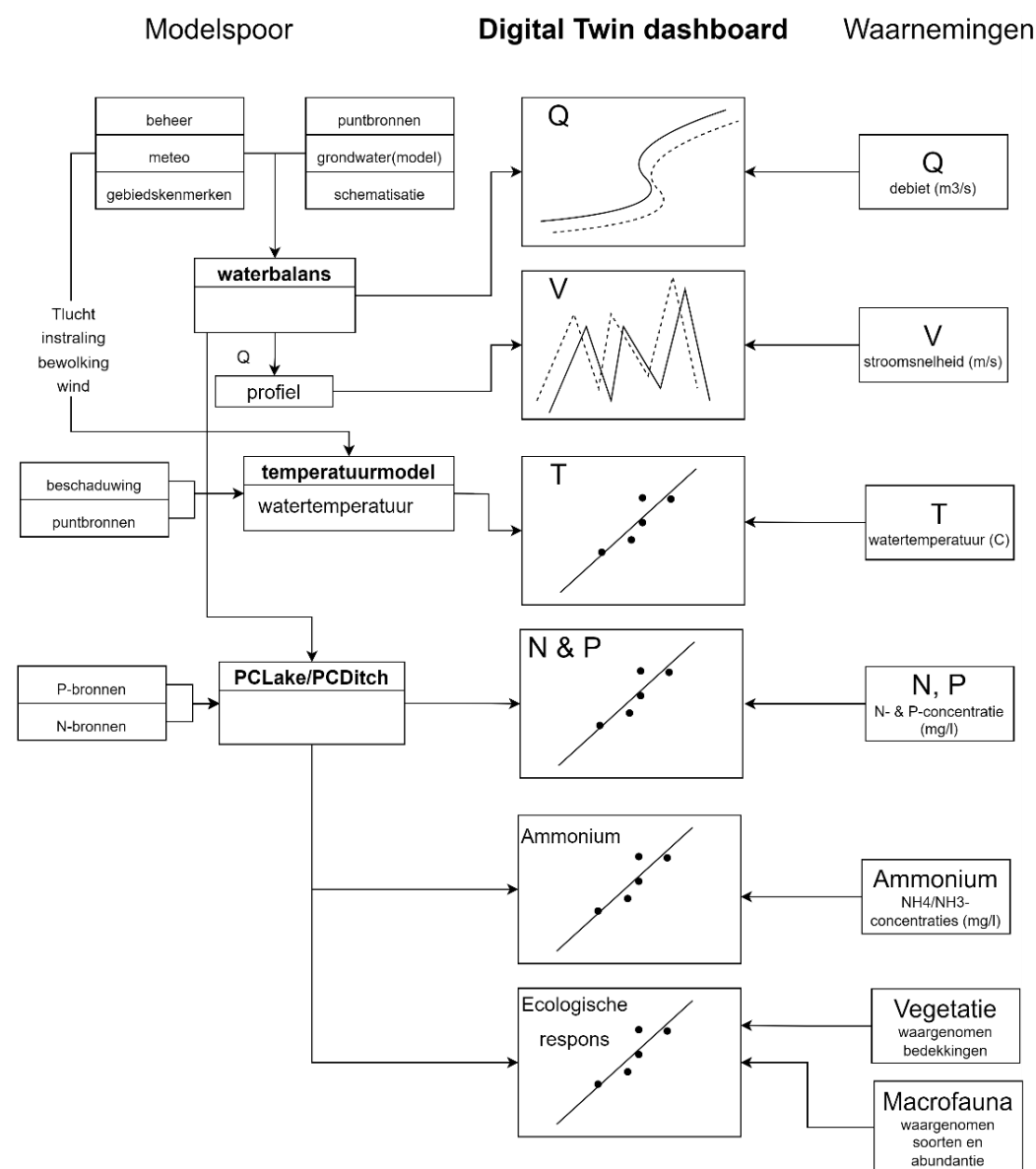
Figuur 4 laat een vergelijking zien van de metingen aan debiet van het effluent en de gemeten debieten bij de stuw Hoolboom, die halverwege het systeem ligt. Te zien is dat de afvoer van het effluent de grootste bron is van het systeem. In bepaalde gevallen is het debiet van het effluent hoger dan het debiet van de stuw. Dit geeft mogelijk inzicht in de meetonauwkeurigheden in het systeem.



Figuur 4 Vergelijking afvoer effluent met afvoerdebiet stuw Hoolboom.

3.3.2 Verrijken van informatie: modelleren

Het volgende maturity level van de digital twin is het verrijken van informatie. We doen dit in dit project met behulp van modelleringen. Figuur 5 laat de technische implementatie van de digital twin zien. Aan de linkerkant staan de modelcomponenten die gebruikt zijn om het systeem te modelleren op basis van onafhankelijke data. De waarnemingen als modelresultaten worden gecombineerd in het digital twin dashboard om inzicht te krijgen in de sturende factoren voor de waterkwaliteit. Afwijkingen tussen modellering en meting leveren inzicht op doordat het vragen oproept: waarom zijn de metingen anders dan de verwachte waarden? Waarin wijkt mijn daadwerkelijke systeem af van de modelleringen?



Figuur 5 Technische implementatie digital twin waterkwaliteit.

Opwerken model-input

Om het model te voeden, zijn de ruwe gegevens opgewerkt tot inputgegevens. Dit is uitgevoerd door het opwerken van de debieten met de waterbalans. Vervolgens zijn de debietgegevens samen met waterkwaliteitsgegevens opgewerkt naar nutriëntenvrachten. Dit zijn belangrijke *forcing factors* (sturende parameters in de vorm van tijdreeksen) voor het model PCDitch (zie Figuur 47 tot en met Figuur 54).

Resultaten waterkwaliteitsmodelleringen

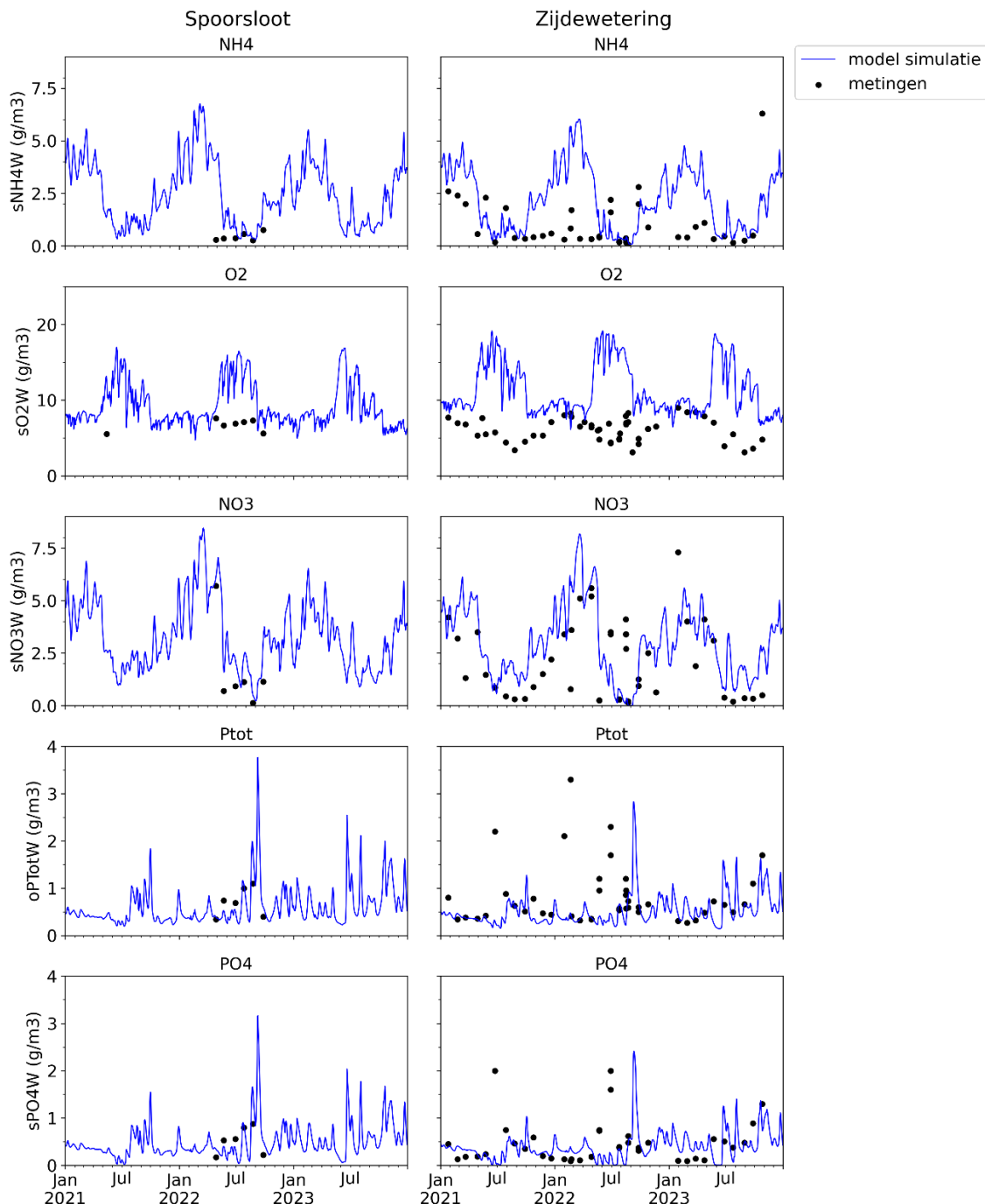
Het model PCDitch wordt doorgerekend met de berekende invoeren. Vervolgens kunnen er allerlei resultaten uitgevoerd en bekeken worden. Hieronder wordt ingegaan op de belangrijkste resultaten, meer informatie is te vinden in Bijlage 1.

Stofconcentraties

De berekende concentraties van fosfor, stikstof en zuurstof uit PCDitch zijn in Figuur 6 vergeleken met de metingen van dezelfde stoffen voor zowel de Spoorsloot als de Zijdedewetering. De metingen in de Spoorsloot zijn beperkter dan in de Zijdedewetering, waardoor het lastiger is om de gemodelleerde resultaten met de metingen te vergelijken. In de Zijdedewetering zijn de metingen op verschillende punten genomen, terwijl in de modellering wordt uitgegaan van een gemengd bakje.

Het valt op dat de berekende waarden voor NO_3 qua ordegrrootte en dynamiek de metingen heel goed volgen. P-totaal en PO_4 komen over het algemeen ook goed overeen, maar de pieken worden op andere momenten gemeten dan berekend. Dit zou ook met de hoeveelheid metingen te maken kunnen hebben, waardoor bepaalde korte gebeurtenissen worden gemist in de modellering.

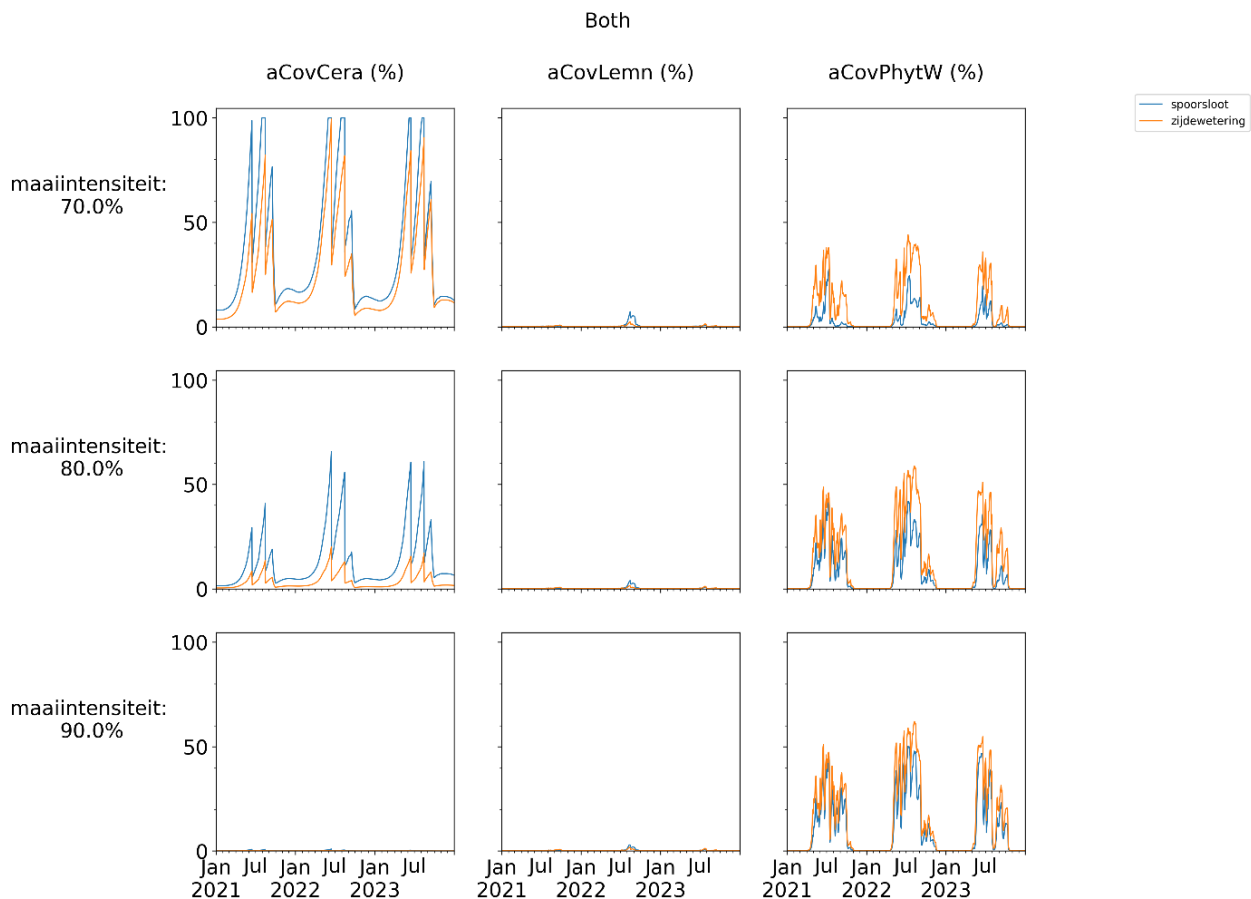
De concentraties van NH_4 en O_2 doen het wat minder goed. In de Spoorsloot lijkt NH_4 wel goed overeen te komen, maar daar zijn slechts een deel van het jaar metingen beschikbaar. De seizoensdynamiek kan hiermee dus niet worden gevalideerd. In de Zijdwetering is er in 2021 een goede overeenkomst, maar wordt de concentratie NH_4 in de jaren erna overschat in de winter. De zuurstofconcentratie wordt eigenlijk altijd overschat. Dit kan komen omdat er te veel ondergedoken waterplanten worden gemodelleerd.



Figuur 6 Resultaten van de modelleringen Spoorsloot (links) en Zijdwetering (rechts). De modelleringen zijn als een doorgetrokken blauwe lijn weergegeven, de metingen zijn als zwarte punten in de grafieken gezet. Te zien is dat niet alle parameters even goed gemodelleerd worden. Blijkbaar snappen we het systeem nog niet compleet.

Vegetatie

Om het systeem zo goed mogelijk te kunnen benaderen, zijn niet alleen de debieten en belastingen uit de waterbalans relevant, maar moeten ook parameters in PCDitch worden aangepast. Een belangrijke parameter die hier nog extra wordt uitgelicht, is de intensiteit van het maaien. Er wordt nu aangenomen dat er twee keer per jaar wordt gemaaid (op 15 juni en 15 augustus). In het model is met verschillende intensiteiten gemaaid om te kijken wat het best met de toestand buiten overeenkomt. Daar wordt in de Spoorsloot een lage bedekking aan ondergedoken waterplanten waargenomen, terwijl deze in de Zijdwetering zijn verdwenen. Daar worden wel drijfslagen van algen (floating alga beds: flab) waargenomen. In het model verschilt de bedekking van waterplanten behoorlijk met de intensiteit van het maaien. Figuur 7 geeft een overzicht hiervan, waarin aCovCera staat voor de bedekking met *Ceratophyllum* (grof hoornblad), aCovLemn voor de bedekking met *Lemna* (kroos) en aCovPhytW voor de bedekking met algen. Grof hoornblad is de enige soort ondergedoken vegetatie die door het model wordt berekend. Bij een maai-intensiteit van 70% worden in zowel de spoorsloot als de Zijdwetering bedekkingen van (bijna) 100% ondergedoken waterplanten berekend, terwijl bij een maai-intensiteit van 90% nauwelijks waterplanten worden berekend. De maai-intensiteit van 80% zit daarin, met bedekkingen tot 60% in de Spoorsloot, en veel lagere bedekkingen in de Zijdwetering. De bedekking met algen is daarentegen juist hoger in de Zijdwetering dan in de Spoorsloot. In alle gevallen is ervan uitgegaan dat kroos snel doorspoelt en daardoor nooit een grote bijdrage kan leveren aan het systeem. De modellering bij een maai-intensiteit van 80% past het best bij de toestand die in het veld is waargenomen. Daarmee is voor alle volgende analyses verder gewerkt met een maai-intensiteit van 80%.

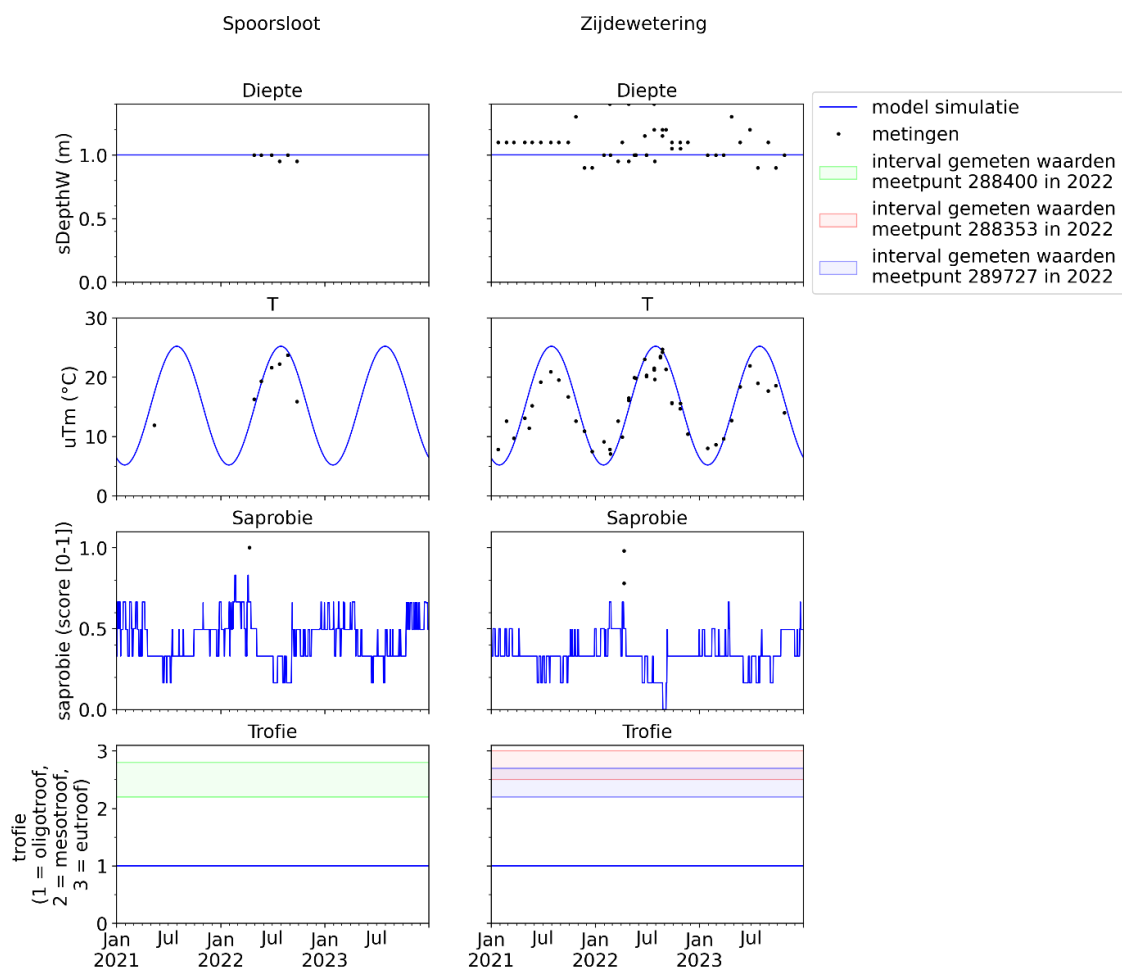


Figuur 7 Het effect van de maai-intensiteit op de bedekking van grof hoornblad (aCovCera), kroos (aCovLemn) en drijfslagen van algen (aCovPhytw) in de Spoorsloot en de Zijdwetering.

Ecologische respons

Uit de berekende ammoniumconcentratie, zuurstofconcentratie en vegetatie biomassa is een ecologische respons berekend voor macrofauna (saprobie, de hoeveelheid (afbreekbare) organische stof in oppervlaktewater) en vegetatie (trofie). Deze berekende waarden zijn in Figuur 8 vergeleken met de

ecologische respons op basis van observaties uit paragraaf 3.3.1. De diepte en temperatuur zijn in dezelfde figuur weergegeven. In het geval van trofie was alleen bekend in welk jaar de observaties zijn gedaan en niet op welke datum. Deze metingen zijn dus vertaald naar een minimum- en maximumwaarde per meetpunt. De metingen waren alleen in 2022 beschikbaar, dus het interval is voor 2022 weergegeven. De gemodelleerde waarden voor saprobie zijn afhankelijk van de gemodelleerde ammonium- en zuurstofconcentraties. Beide concentraties waren in de Spoorsloot en de Zijdwetering overschat (paragraaf 3.3.2). Op basis van observaties is voor saprobie slechts één meetpunt in de Spoorsloot beschikbaar, en twee in de Zijdwetering. Op basis van deze gelimiteerde meetgegevens lijkt de saprobie in zowel de Spoorsloot als de Zijdwetering onderschat. Deze lagere stressscore is gedeeltelijk het resultaat van de overschatte zuurstofconcentraties. De overschatte ammoniumconcentratie zou juist weer voor een hogere stressscore moeten zorgen, maar dat is niet terug te zien in de saprobie. Dit komt omdat de gemeten en berekende concentraties vaak binnen dezelfde categorie vallen voor de koppeling (zie Bijlage 1). De gemeten trofiegraad geeft een nog groter verschil weer. Terwijl de metingen schommelen tussen een mesotroof en eutroof systeem voor beide sloten, wordt een oligotroof systeem gemodelleerd. Deze ecologische respons hangt in het model af van de vegetatie- en algenbiomassa. Een vergelijking met de vegetatiebedekking in het veld kan niet worden gemaakt, omdat deze waarnemingen niet zijn gerapporteerd. Het zou interessant zijn om eerst de berekende vegetatiebedekking met metingen te vergelijken, omdat de trofie hiervan is afgeleid. Voor zowel trofie als saprobie geldt dat de gemodelleerde waarden afwijken van de gemeten waarden. Dit kan een doorwerking zijn van de concentraties ammonium en zuurstof en van de vegetatiebiomassa, maar kan ook liggen aan de koppeling tussen deze concentraties en de ecologische respons. De gemodelleerde respons is op een andere manier berekend dan de ecologische respons op basis van observaties.

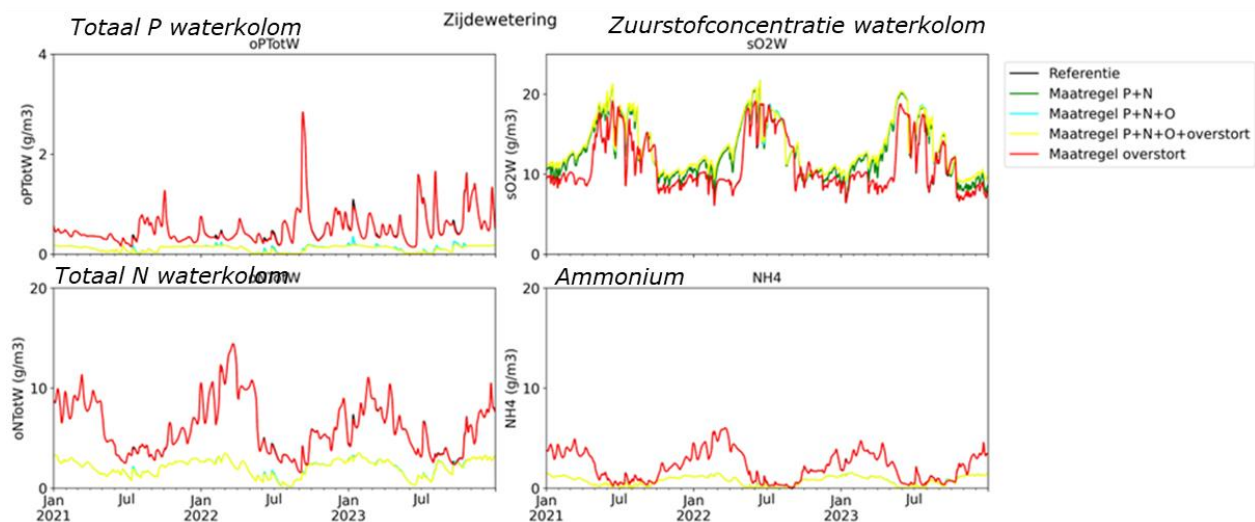


Figuur 8 Diepte, temperatuur, saprobie en trofie op basis van waarnemingen en modellering.

3.3.3 Begrip: scenario's doorrekenen

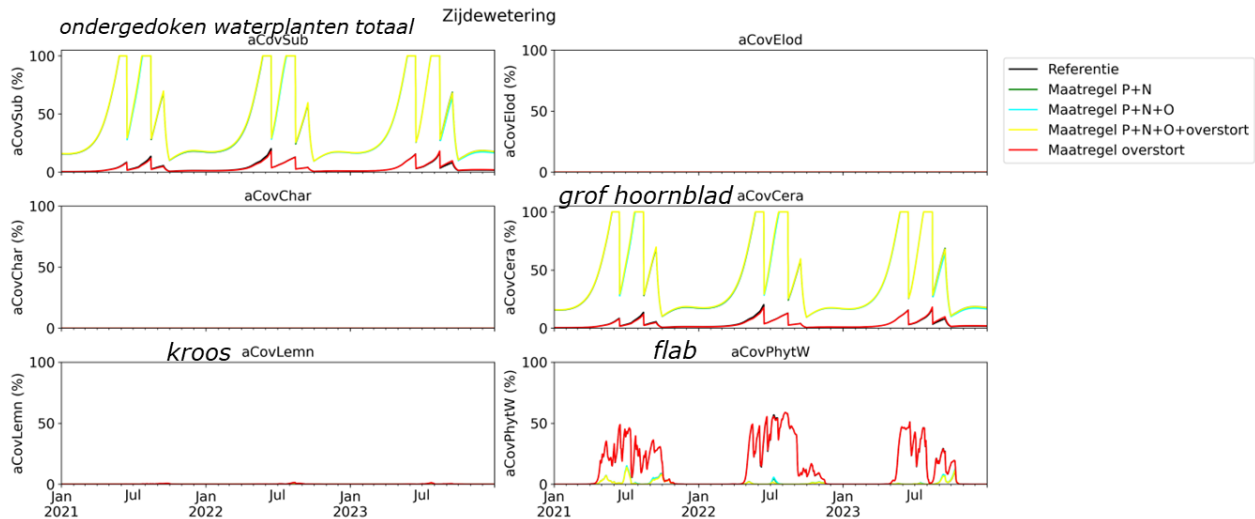
Tot nu toe zijn alleen de resultaten van het referentiescenario vergeleken met de metingen en ecologische respons op basis van waarnemingen. In deze paragraaf wordt ook het effect van maatregelen gemodelleerd. Hoe meer beschikbare data en hoe beter de systeemkennis, hoe beter het effect van maatregelen kan worden berekend. Toch kan het ook bij een minder goede fit zinnig zijn om richtinggevend naar de maatregelen te kijken. In deze subparagraaf worden alleen figuren van de Zijdwetering weergegeven. Het effect van maatregelen op de Spoorsloot geeft eenzelfde beeld als op de Zijdwetering.

Figuur 9 laat zien dat de overstortmaatregel alleen (rood) slechts een heel beperkt effect heeft op zowel nutriëntenbelasting als zuurstofconcentratie ten opzichte van de referentiesituatie (zwart). Maatregelen op de nutriëntenconcentratie van het effluent (groen) hebben het grootste effect. De P-concentratie in de Zijdwetering neemt flink af en laat geen pieken meer zien. Ook totaal-N en ammonium gaan naar beneden, maar daar blijft wel een seizoensdynamiek zichtbaar. Ook de zuurstofconcentraties gaan met de seizoensdynamiek duidelijk mee omhoog. Als daaraan maatregelen op zuurstof en/of de overstort worden toegevoegd, wordt het effect nog iets versterkt.



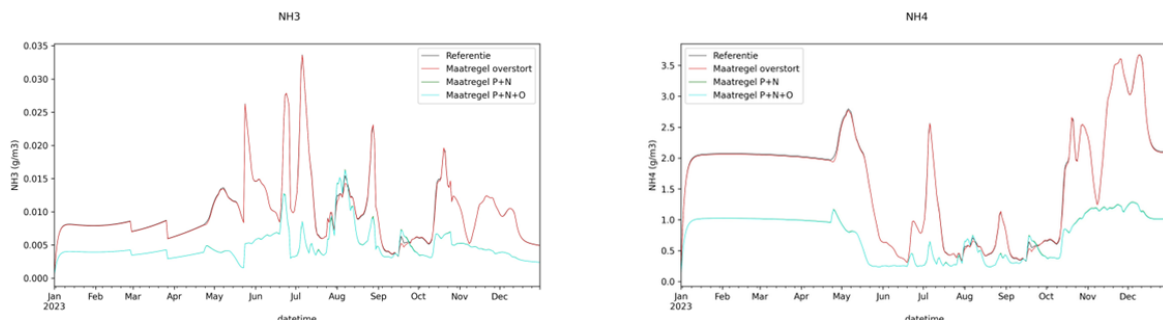
Figuur 9 Het effect van verschillende maatregelen op nutriënten- en zuurstofconcentraties in de Zijdwetering.

Deze effecten werken door op de vegetatiebedekking (Figuur 10). Er is een duidelijk verschil tussen de situatie met weinig submerse vegetatie (aCovSub) en 50% algenbedekking (aCovPhytW) in de referentie en met alleen de overstortmaatregel ten opzichte van een situatie met 100% submerse vegetatiebedekking in de zomer met zeer weinig algen wanneer maatregelen op de nutriëntenconcentraties van het effluent worden genomen, eventueel in combinatie met maatregelen op zuurstof of de overschotten. Desalniettemin bestaat de submerse vegetatie bij alle scenario's alleen uit grof hoornblad (aCovCera) en zijn geen andere soorten gemodelleerd.



Figuur 10 Het effect van verschillende maatregelen op de bedekking van ondergedoken waterplanten (aCovSub), bestaande uit waterpest (aCovElod), kranswieren (aCovChar) en grof hoornblad (aCovCera), kroos (aCovLemn) en drijfblagen van algen (aCovPhytW) in de Zijdwetering.

Uiteindelijk leiden de modelleringen tot berekende ammonium- en ammoniakconcentraties (Figuur 11). Te zien is dat er volgens het model handelingsperspectief is en maatregelen positieve effecten kunnen sorteren. Een volgende stap in de digital twin is het uitvoeren van maatregelen, het observeren van verschillen tussen gemodelleerd versus gemeten en het bijstellen van de digital twin. Hierbij gaat het maturity level van de digital twin weer een niveau omhoog (level 5, inzicht).



Figuur 11 Vergelijking gemodelleerde NH_3 - & NH_4 -concentraties onder verschillende gesimuleerde maatregelen.

3.4 Conclusies, geleerde lessen

1. Door de ontwikkeling van een digital twin is inzicht verkregen in de actuele situatie wat betreft oppervlaktewaterkwaliteit voor het hele watersysteem in een pilotgebied Zijdwetering (zowel KRW-lichamen als overige wateren). Dit leidde tot nieuwe inzichten en argumenten rondom de uitdagingen in dit gebied en daarmee is het een succesvol onderdeel van dit project.
2. De vraag 'waarom is het zoals het is?' is nog niet beantwoord. Daarvoor moet de actuele situatie aan de hiervoor bepalende systeemkenmerken en processen worden gerelateerd.
3. Aan de hand van geldende (ecologische) waterkwaliteitsdoelen zijn de actuele situatie en de hiervoor bepalende (ecologische) sleutelfactoren beoordeeld.
4. Het meet- en monitoringsnetwerk met betrekking tot de waterkwaliteit is in het kader van de ontwikkeling van een digital twin voor de waterkwaliteit in het pilotgebied Zijdwetering niet verbeterd.
5. Maturity level 3 (Kennis, zie hoofdstuk 2) is wat betreft het pilotgebied Zijdwetering bereikt.

4 Thema Droogte

4.1 Inleiding

Droogte speelt een belangrijke rol binnen het werk van waterschappen. Een periode van meteorologische droogte (weinig regen en hoge verdamping) heeft belangrijke effecten op de hydrologische situatie, landbouw en natuur binnen het beheergebied van een waterschap:

- droogval van beken, met gevolgen voor waterecologie en waterkwaliteit;
- schade aan landbouw en natuur door lage grondwaterstanden en lage bodemvochtgehaltes en lage beschikbaarheid van bodemvocht in de wortelzone.

Waterschappen monitoren de actuele situatie nauwlettend in het droogteseizoen. Zo maakt Waterschap Limburg voor droogtemonitoring momenteel gebruik van een droogte-dashboard in haar centrale regiekamer. Dit dashboard kijkt naar de feitelijke droogtesituatie op een moment zelf en bevat ook veel data in tijdreeksen die terugkijken. Tijdens een droogteperiode is een regieteam 'droogte' operationeel, dat het verloop van droogte volgt. Dit team maakt een scenario aan de hand van de beschikbare meteodata. Die gaan op dit moment maximaal zeven tot tien dagen vooruit. Omdat een droogteperiode zich vaak over langere tijd openbaart en om meer handelingsperspectief te houden, is het doel om de in dit project ontwikkelde voorspelmodule in te zetten in een droogteteam met experts dat tijdens langdurige droogte de ontwikkeling ervan volgt. Daar waar we nu niet meer dan ongeveer één week vooruit kunnen kijken, willen we met de digital twin onderzoeken of we scenario's kunnen maken voor vier, acht of twaalf weken vooruit. Waterschap Vallei & Veluwe biedt haar peilbeheerders een soortgelijke informatievoorziening aan. Binnen dit project is een digital twin ontwikkeld die peilbeheerders en agrariërs ondersteunt, op basis van grondwaterdata en bodemvochtdata en simulatie daarvan middels fysisch-gebaseerde en data-gedreven modellen. Bepaalde delen van deze digital twin zullen nog niet af en operationeel zijn na afronding van dit project, daarom maken we voor bepaalde onderdelen alleen schetsen en schematische figuren. Andere onderdelen zullen verder ontwikkeld zijn, maar voor operationeel gebruik nog verbeterd moeten worden. Waar dit nodig is en hoe de doorontwikkeling zou kunnen, geven wij aan. Naast deze activiteiten voeren wij activiteiten uit die specifiek gericht zijn op de verbinding met andere ontwikkelingen binnen Waterschap Vallei en Veluwe.

De doelstelling van de droogtecasus voor de waterschappen was daarom te onderzoeken of een voorspelmodule voor droogte haalbaar is en kan helpen als ondersteunende informatiebron bij besluitvorming over in te zetten maatregelen. Bij Waterschap Limburg dient deze voorspelmodule te helpen bij:

- het bepalen van kritische grenzen van debieten in het beekstelsel (droogval, operationeel peilbeheer);
- het bepalen van effecten van mogelijke beheermaatregelen (zoals van uitstel van maaien en het aanpassen van stuwpeilen);
- het in kaart brengen van effecten langdurige droogte (op tactisch en operationeel niveau) door middel van scenario's (vier, acht, twaalf weken vooruit);
- het doen van uitspraken op stroomgebiedniveau en op specifieke puntlocaties.

Bij Waterschap Vallei & Veluwe dient de voorspelmodule te helpen bij:

- het bepalen van de verwachte grondwaterstanden en bodemvochtgehalte middels een model;
- met het model het in kaart brengen van effecten van langdurige droogte (op tactisch en operationeel niveau) door middel van scenario's (vier, acht, twaalf weken vooruit);
- het presenteren van uitkomsten aan de centrale regie en peilbeheerders, waarbij ook de onzekerheid onderbouwd wordt weergegeven.

Bovenstaande zaken zijn ondersteunend in de tactische en strategische beslissingen, bijvoorbeeld rondom het instellen van beregenings- of onttrekkingsverboden, op tactisch niveau om te bepalen in welke stroomgebieden de noodzaak of urgentie het grootst is en op operationeel niveau voor bijvoorbeeld het bijstellen van waterpeilen. Dit kan naast een onttrekkingsverbod ook inzicht geven in een geschikt moment om water vast te houden.

De voorspelmodule, die gezien kan worden als het rekenhart van een digital twin, heeft een vinger-aan-de-pols- en een signaleringswaarde. De digital twin wordt als ondersteunende informatiebron benut naast een regulier droogte-dashboard en staat daarmee niet op zichzelf voor het inzetten van maatregelen. De digital twin dient ruimtelijk en in de tijd een beeld te geven van de actuele en de te verwachte droogte en bijvoorbeeld helpen om te prioriteren in maatregelen of gebieden, bijvoorbeeld bij de ecologisch kwetsbare beeksystemen. Verwachting is dat op deze manier in de toekomst meer maatwerk kan worden geleverd omdat droogte zich niet in alle stroomgebieden even snel ontwikkelt. Tevens is het doel om meer handelingsperspectief te krijgen door de langetermijnsenario's.

In het kort zijn de subdoelen voor het thema Droogte als volgt:

- Het verkrijgen van inzicht in de actuele en te verwachten droogtesituatie in een vooraf gedefinieerd pilotgebied tijdens het droogteseizoen en deze droogte te kwantificeren en kwalificeren (oordeelsvorming).
- Het identificeren en in beeld brengen van achterliggende oorzaken in geval van ernstige droogte.
- Het waarschuwen voor aankomende knelpunten met betrekking tot droogte.
- Het verkrijgen van inzicht in de effectiviteit van enkele vooraf geselecteerde beheermaatregelen in een specifiek pilotgebied om daarmee beter onderbouwde besluiten te nemen.
- Voor het thema Droogte streven we daarmee naar een digital twin in maturity level 4 (Begrip).

4.2 Aanpak

Dit project was een verkenning voor beide waterschappen waarbij de *use case* voor Waterschap Limburg al bij aanvang beschreven was en bij Waterschap Vallei & Veluwe verkend werd tijdens het project. Toch is bij beide waterschappen een gelijk stappenplan gevolgd, waarbij in Vallei & Veluwe na een voorstudie een nieuwe *use case* is opgepakt, omdat een uitwerking van de oorspronkelijke niet haalbaar was binnen dit project.

4.2.1 Stappenplan

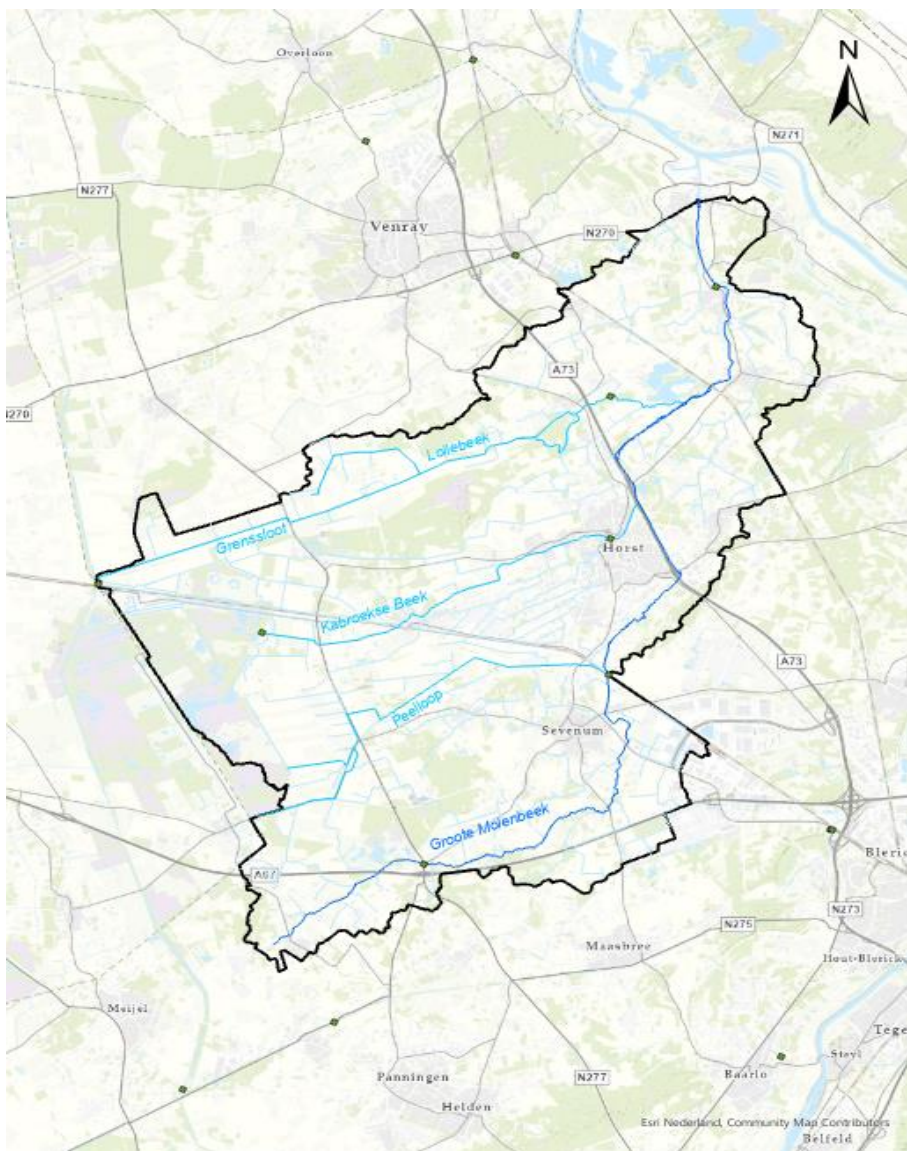
Het stappenplan bestond uit:

- uitschrijven van de *use case* rond de aanleiding vanuit het perspectief van de droogtecoördinator;
- identificatie van beoogde gebruikers in de vorm van persona's;
- een workshop visualisatie en besluitvorming -> ontwerp dashboard;
- data- en modelinventarisatie;
- afstemmen van data- en modelarchitectuur;
- opzetten van datastromen;
- ontwikkelen van modellen;
- bouwen van een dashboard;
- iteratie met gebruikers;
- een workshop besluitvorming met het ontwikkelde dashboard;
- vastlegging rapportage, code modellen, code datastromen, code dashboard.

4.2.2 Pilotgebied

Waterschap Limburg heeft als pilot het stroomgebied van De Groote Molenbeek in het noorden van Limburg (Figuur 12) gekozen, met de volgende argumenten:

- Het betreft een van de grotere beeksystemen in Noord-Limburg in een intensief landbouwgebied met overwegend zandbodems. Droogte werkt hier sterker door dan in andere delen van het werkgebied van Waterschap Limburg.
- Door de combinatie van zandbodems en intensief landbouwkundig grondgebruik zullen de effecten van droogte zich hier het sterkst manifesteren.
- Van het gebied zijn in verhouding tot andere stroomgebieden relatief veel data beschikbaar.



Figuur 12 Ligging van het stroomgebied van de Groote Molenbeek.

Waterschap Vallei & Veluwe heeft gekozen voor de volgende peilgebieden in het beheergebied:

- Ten westen van Bunschoten-Spakenburg
- Ten zuiden van Nijkerk
- Ten noorden van Heerde
- Ten oosten van Oosterwolde

4.3 Resultaten

4.3.1 Inzicht in gebruikersgroepen en relatie binnen de organisatie

In workshops met waterschappen zijn gebruikersgroepen geïdentificeerd voor deze use case. Binnen de organisatiestructuur van Waterschap Limburg leidde dit tot de volgende groepen:

1. *Centrale Regiekamer (CRK)*. Voert kwaliteitscontroles uit op binnenkomende data en wil zich in de toekomst ook richten op het duiden van informatie. Dit houdt in dat waarschuwingen uitgezet kunnen worden over naderende situaties voor wateroverlast of extreme droogte, waarop de organisatie besluiten kan nemen voor bijvoorbeeld opschaling naar de crisisorganisatie. In de CRK werken mensen van de monitoringswacht, meetnetbeheerders, hydrologen en een tactisch peilbeheerder.

2. *Regieteam Droogte*. Wanneer tijdens een groeiseizoen een droogteperiode ontstaat, wordt een 'Regieteam Droogte' opgezet. De hoofdverantwoordelijkheid van dit regieteam is uitvoering van operationele droogtebestrijding en advies geven aan de bestuurders over het nemen van maatregelen, zoals het instellen van beregeningsverboden en bepaalde acties zelf uitzetten. Hiertoe volgt het regieteam het verloop van de droogte en de maatregelen (deels uit een droogtebestrijdingsplan) die worden uitgerold. Bij een langdurige droogteperiode worden onder regie van het regieteam Droogte gerichte droogte-inspecties gehouden. Het regieteam bestaat uit hydrologen, de droogtecoördinator, een ecooloog en een communicatieadviseur.
3. *Verantwoordelijk lid van het Dagelijks Bestuur voor droogte (portefeuillehouders overleg PHO)*. Tijdens een droogteperiode wordt de betrokken bestuurder regelmatig geïnformeerd over de feitelijke toestand en de inzet van maatregelen en het mediabeeld. We verwachten dat de vraag naar visuele duiding van het droogtebeeld toeneemt bij management en bestuur.
4. *Afgeleide gebruikersgroepen*: inspecteurs in het operationeel peilbeheer, de communicatie in de afhandeling van allerlei droogtevragen en persvragen. Bij zeer ernstige droogte zal ook de bestuurlijke aandacht toenemen en zullen scenario's op een eenvoudige manier gepresenteerd moeten worden aan het Dagelijks Bestuur en mogelijk ook het Algemeen Bestuur. Op dit moment zal de digital twin geen kant-en-klare scenariokaarten of dashboards kunnen leveren die als zelfstandig product geschikt zijn voor dergelijke informatievoorziening, maar wel signaleringskaarten die in de besluitvorming over de inzet van maatregelen en prioritering van maatregelen benut kunnen worden.

Waterschap Vallei & Veluwe kent de volgende gebruikersgroepen voor deze casus:

1. *Peilbeheerders en coördinatoren peilbeheer*. Peilbeheerders sturen waterpeilen op operationeel niveau in samenwerking met de coördinator, gebruikers op basis van historische gegevens en voorspellingen. Afhankelijk van de situatie gaat besluitvorming via de calamiteitsituatie (opschaling droogte of wateroverlast).
2. *Centrale regie*. Vergelijkbaar met Waterschap Limburg, met uitzondering van de controle van data. Dit doen de databeheerders en is geen onderdeel van de centrale regiekamer zoals dit bij Waterschap Limburg wel het geval is.
3. *Calamiteitenorganisatie*. Bij een (dreigende) situatie waarin de calamiteitenorganisatie is opgeschaald, kan de output van de digital twin gebruikt worden om besluitvorming te ondersteunen of verbeteren.
4. *Waterbeeldoverleg (continu, droogte en nattigheid)*. Het waterbeeldoverleg is vergelijkbaar met het regieteam Droogte van Waterschap Limburg, maar fungeert bij Vallei en Veluwe het hele jaar door. Dit team komt tweewekelijks bij elkaar en kijkt ook naar natte periodes.
5. *Management (WMT)*. Ontvangt elke maand een overzicht met prestaties, afwijkingen, energiegebruik. De informatie uit digital twin kan hierin ondersteunend zijn.

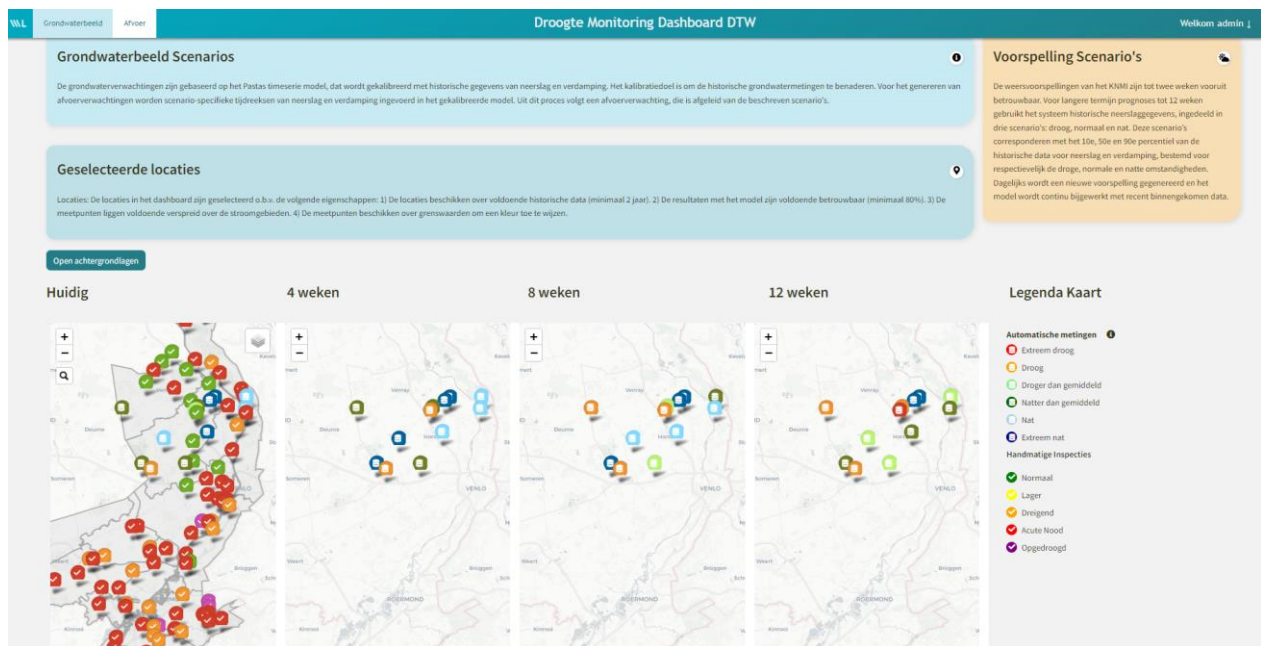
4.3.2 Data & modelarchitectuur

De architectuur voor de datastromen en benodigde modellen is uitgewerkt in een interactieve sessie tot een blokkenschema. In Bijlage 2 is het resultaat van deze sessie weergegeven van Waterschap Limburg, die uitgewerkt is op een zogeheten Miro-bord. In hoofdstuk 7 wordt specifiek ingegaan op modelcomponenten en benodigde data.

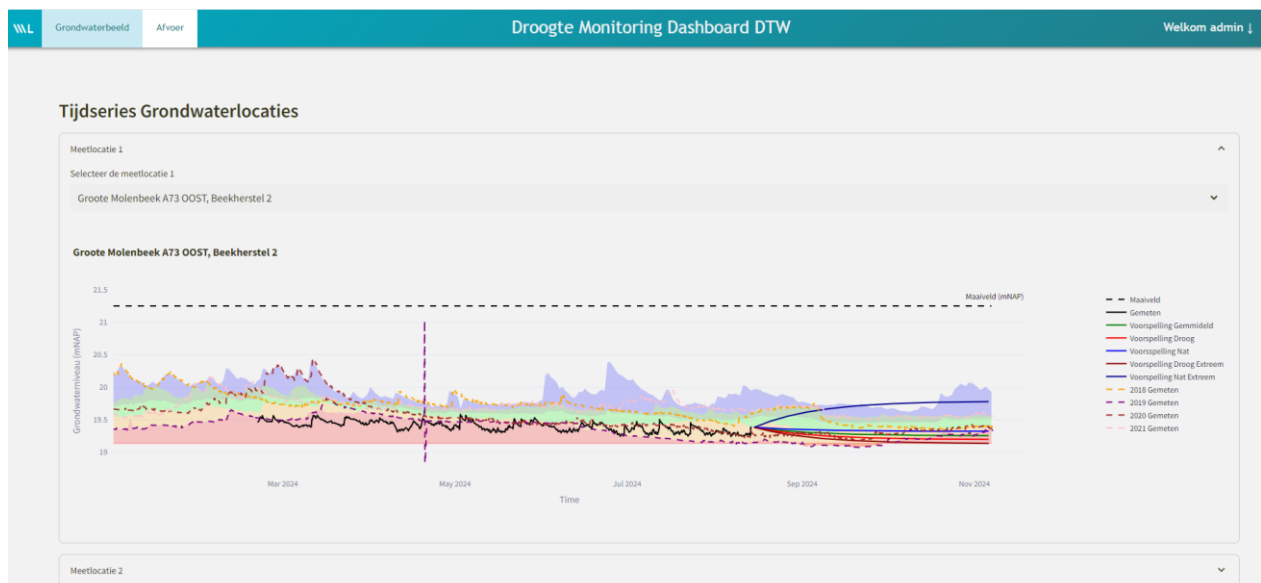
4.3.3 Digital-twin toepassing voor droogte

De data- en modelarchitectuur is geïmplementeerd in een operationele cloudomgeving, waarbinnen modellen automatisch simulaties voor scenario's maken op basis van actuele gegevens en verwachtingen. De uitkomsten van de simulaties, drie scenario's voor de situatie droog, gemiddeld en nat, geven inzicht in de droogteverwachtingen tot twaalf weken vooruit. Een uitkomst van een simulatie is pas waardevol en bruikbaar in verhouding tot een referentie om te duiden hoe condities zich verhouden tot situaties uit het verleden. Het Droogtemonitoring Dashboard is gekoppeld op het cloudplatform om actuele informatie beschikbaar te maken aan een of meerdere gebruikersgroepen. Figuur 13 geeft een screenshot weer waarin op meetlocaties de verwachtingen zijn weergegeven op kaart voor de huidige toestand en vier, acht en twaalf weken vooruit. De kleur van de iconen duidt daarbij de toestand in vergelijking tot historische situaties. Figuur 14 geeft de grafiek met de metingen en de simulaties voor de drie scenario's en enkele

kenmerkende historische jaren. De droogteverwachtingen zijn zowel voor grondwaterstanden als voor beekafvoeren beschikbaar in het online dashboard.



Figuur 13 Screenshot waarin op meetlocaties de verwachtingen zijn weergegeven op kaart voor de huidige toestand en vier, acht en twaalf weken vooruit. De kleuring van de iconen duidt daarbij de toestand in vergelijking tot historische situaties.



Figuur 14 Metingen en simulaties voor de drie scenario's en enkele kenmerkende historische jaren.

4.4 Conclusies, geleerde lessen

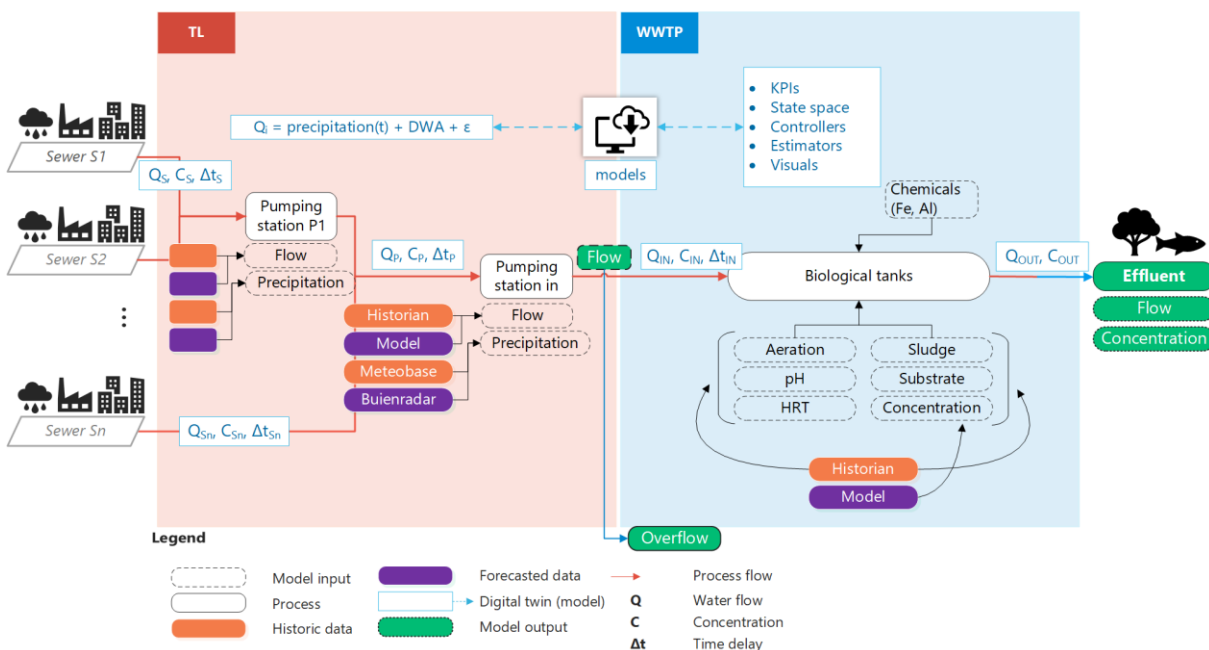
Vanuit het Thema Droogte zijn de volgende conclusies en geleerde lessen gekomen:

- Hydrologen en datascientists zijn weinig beschikbaar bij waterschappen en zij die dat wel zijn, hebben beperkte tijd om mee te werken aan de ontwikkeling van de digital twin.
- Het handelingsperspectief bij droogte is minimaal. Een waterschap kan bijvoorbeeld een beregeningsverbod instellen en/of stuwen verhogen, maar dat effect is op een korte termijn van ongeveer 14 dagen minimaal. Daarom bestaat de behoefte om tot drie maanden vooruit te kunnen kijken. Vanwege de onzekerheid rondom meteorologische verwachtingen en de doorvertaling daarvan door hydrologische en andersoortige modellen, is het momenteel echter moeilijk bruikbare vooruitzichten op een zo lange termijn te geven.
 - Droogteverwachtingen zijn gevraagd voor een langere periode vooruit (graag tot drie maanden), daarvoor zijn geen forceringen in de vorm van meteorologische verwachtingen beschikbaar. Deze lopen enkel tot tien dagen vooruit. Er komen wel meteorologische verwachtingen voor de langere termijn, en voor nu zijn klimatologische waarden toegepast in de modellen.
- De hydrologen van de waterschappen stonden vooral bij aanvang sceptisch tegenover wat zij zagen als 'het volgende initiatief' tegen droogteproblematiek. Gaandeweg veranderde dit, maar voor volgende hydrologische digital-twin-projecten moet hier rekening mee worden gehouden. Betrek de hydrologen bij ontwerp, ontwikkeling en toetsing en zorg dat hun vragen worden beantwoord.
- Opschaling van gegevens en modeluitkomsten van bijvoorbeeld grondwaterniveau: je hebt een goed bruikbare definitie van opschaling nodig voor opschaling van punt- naar gebiedsniveau om betrouwbare uitspraken te kunnen doen op gebiedsniveau. Betrouwbaar betekent hier dat er ook voldoende vertrouwen is in het gebruik van informatie op stroomgebiedsniveau voor gebruik bij besluitvorming. Factoren die hier (mogelijk) een rol bij spelen:
 1. data zijn beschikbaar maar moeilijk opschaalbaar;
 2. bij projecten wordt van tevoren vaak geen inventarisatie gedaan (haalbaarheidsstudie met data-analyse) van wat meetdata daadwerkelijk kunnen opleveren (wat de informatiewaarde is).Een methode is iteratief te analyseren of doelen en data bij elkaar passen.

5 Thema Zuivering

5.1 Inleiding

Dit onderdeel van het project Digital twin voor het Waterbeheer richt zich op de digital twin van de RWZI (rioolwaterzuiveringsinrichting). Dit onderzoek werd opgesplitst in twee delen (Figuur 15): het aanvoerstelstel, dat wil zeggen alle pijpleidingen die het afvalwater van de verschillende rioolgemaal of middelen vrij verval naar de RWZI transporteren, en de RWZI zelf, waar het eigenlijke waterzuiveringsproces plaatsvindt.



Figuur 15 Modelopbouw van het zuiveringssysteem. Het aanvoerstelstel is het rode gedeelte (links), de rioolwaterzuivering het blauwe gedeelte (rechts). Het voorspelde debiet van het aanvoerstelstel wordt als invoer gebruikt voor het model van de RWZI.

Bij dit thema heeft Waterschap Vallei en Veluwe (WVV) aangegeven geïnteresseerd te zijn in modellen die zouden kunnen helpen bij het optimaliseren van de RWZI. Hiervoor zijn de volgende scenario's van belang:

1. Het minimaliseren van energie- en chemicaliënverbruik van de zuivering.
2. Het bufferen van het rioolwater tijdens aanvoer met regen (RWA), zodat het water tijdens RWA zo veel mogelijk in het systeem wordt vastgehouden, zodat de volumes over een langere periode worden verspreid. Het schatten van de totaal-N-concentratie in het effluent wordt daardoor een kwestie van het herverdelen van de totaal-N-vracht over een langere periode.
3. Het evalueren van het effect van afkoppelen van regenwater om op een langere termijn de effluentkwaliteit onder bepaalde grenswaarden te krijgen (een maximum van 1 mg/L N-totaal dat tijdens DWA meestal gehaald wordt in plaats van 20 mg/L tijdens RWA).

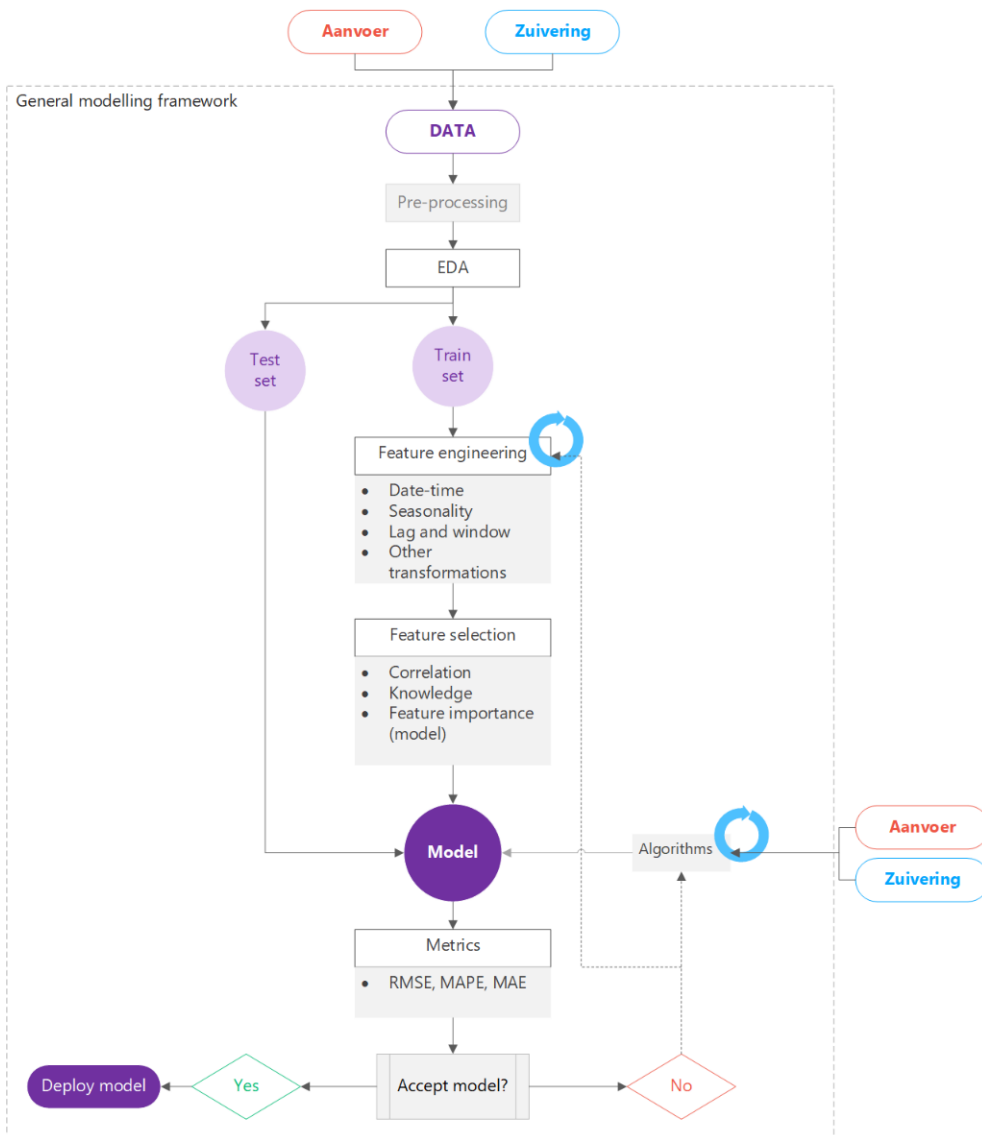
Bij RWZI Ede wordt het zuiveringsproces zo geregeld dat het effluent voldoet aan de wet- en regelgeving. Hierdoor is het onbekend (en niet zichtbaar in de metingen) hoe het systeem zou reageren als de beluchters anders worden aangestuurd of als de chemicaliën anders worden gedoseerd. In data-gedreven modellen (de ML-algoritmen) is het dus onmogelijk om de effluentkwaliteitsparameters (afhankelijke variabelen) afhankelijk te maken van specifieke variabelen zoals energieverbruik (beluchters en pompen) en chemicaliëngebruik (chemische fosfaatverwijdering) als er geen variatie in deze factoren zichtbaar is in de metingen. Daarom worden alleen de scenario's rond het bufferen en afkoppelen van regenwater naar RWZI Ede geëvalueerd. De aanpak en de resultaten per scenario voor zowel het aanvoerstelstel als de zuivering zijn per onderdeel weergegeven in de volgende paragrafen.

5.2 Aanpak

5.2.1 Algemene aanpak voor de modellering

In dit project is voor beide onderdelen, het aanvoerstelsel en de zuivering, dezelfde algemene modelleringsaanpak gehanteerd (Figuur 16). Per onderdeel is met de relevante ruwe metingen (uitgelicht in de desbetreffende paragraaf) een verkennende data-analyse (Exploratory Data Analysis, EDA) uitgevoerd om de patronen en relaties in de metingen te begrijpen. Vervolgens is de dataset opgesplitst in een trainingskalibratieset (80% van de data) en een validatieset (20%). De trainingsset werd gebruikt voor het vinden en selecteren van voorspellende variabelen op basis van de metingen (feature engineering en selectie), waarbij de gekozen variabelen zijn gebruikt om de modellen te trainen. Daarna is het model geëvalueerd met de validatieset. Als het model nog niet aan de vereiste prestatiecriteria voldeed, werd het model (of de geselecteerde variabelen) nader onderzocht.

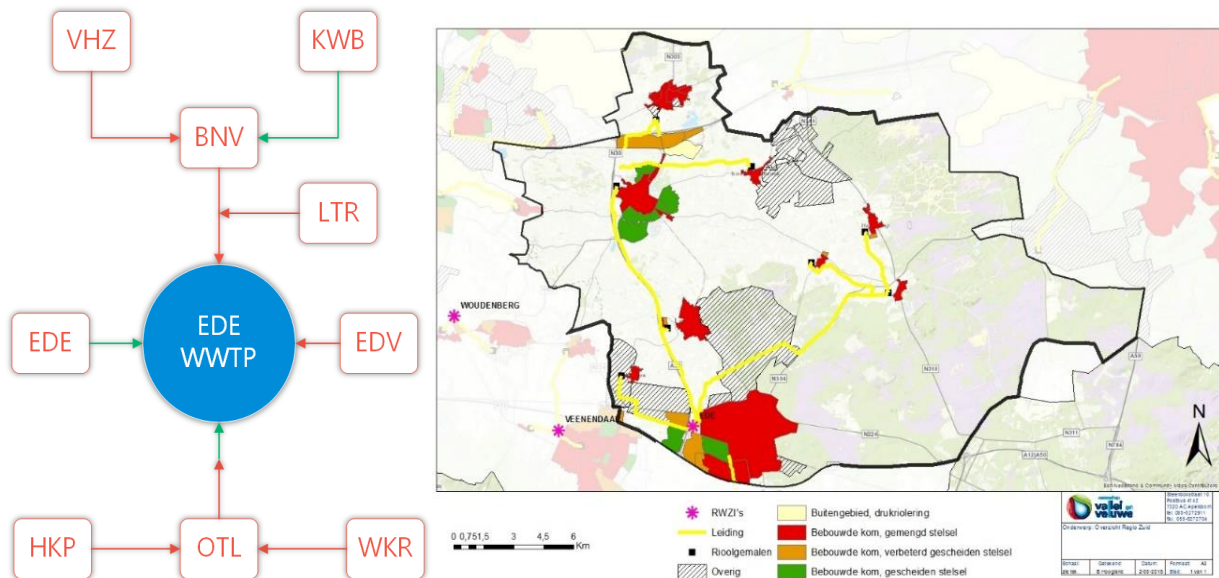
Deze twee processen, feature engineering + selectie en afstemmen van de algoritmen (de blauwe cirkelvormige pijlen in Figuur 16), werden continu herhaald totdat de gewenste modelprestatie werd bereikt. De nauwkeurigheid van de voorspelling werd geëvalueerd aan de hand van statistische indicatoren, zoals de root mean square error (RMSE), de mean absolute error (MAE) en de mean absolute percentage error (MAPE). Het beste model zou vervolgens worden geïmplementeerd en weergegeven op een dashboard. Tot nu toe zijn alle modellen alleen gebruikt met historische metingen. De volgende stap is het model te gebruiken voor realtimevoorspellingen, op basis van realtime voorspelde neerslagmetingen, debietmetingen en relevante waterkwaliteitsparameters. Die stap is in dit project niet gemaakt.



Figuur 16 Stroomschema van de algemene modelleringsaanpak (general modelling framework).

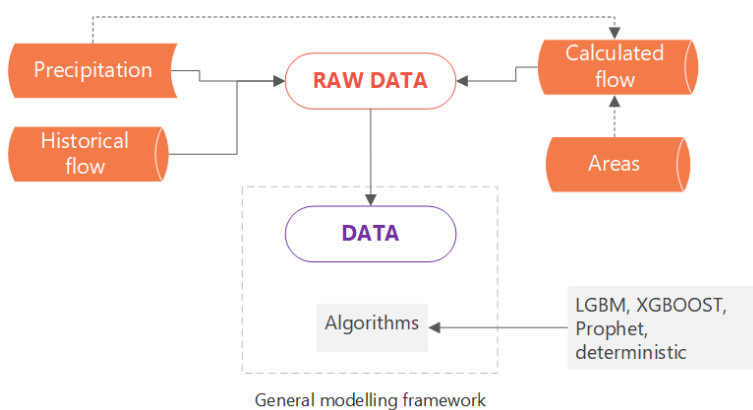
5.2.2 Aanpak voor het aanvoerstelsel

De gebruikte casus in dit onderzoek was RWZI Ede. Het aanvoerstelsel van RWZI Ede strekt zich uit van de gemeente Ede tot het natuurgebied de Hoge Veluwe in het oosten en de gemeente Barneveld met bijbehorende kernen in het noorden (Figuur 17).



Figuur 17 Aanvoerstelsel van RWZI Ede (beheerd door WV). Toelichting - Rode pijl: persleiding, Groene pijl: vrij verval.

Verschillende metingen voor en op RWZI Ede werden gebruikt om via machinelearning verbanden te vinden tussen verschillende variabelen in het systeem. Om tot een goed voorspellend model te komen, is het van belang inzicht in deze metingen krijgen en vandaaruit kenmerken (features) te selecteren, die de vereiste output van de RWZI het beste beschrijven. Dit proces, weergegeven in Figuur 18, wordt iteratief uitgevoerd, totdat de voorspelling goed genoeg is.

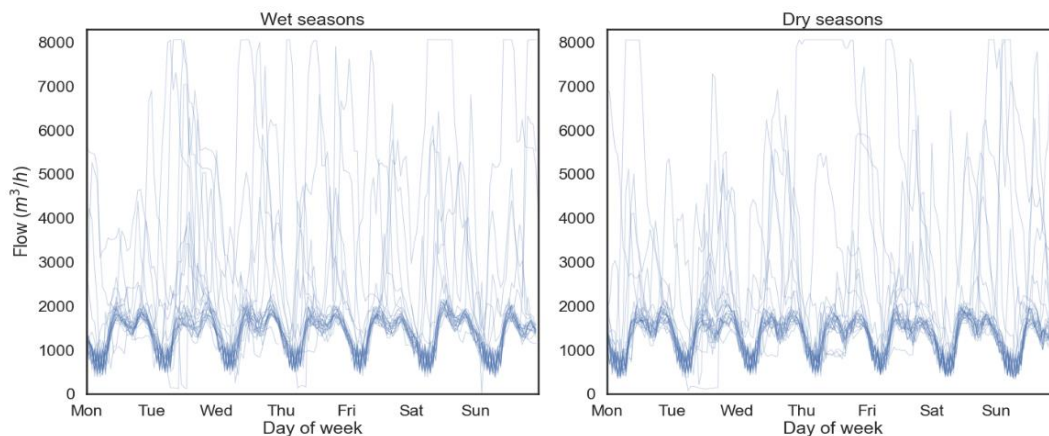


Figuur 18 Invoerdata en algoritmen voor het aanvoerstelsel.

Het hoofddoel voor het model van het aanvoerstelsel was het voorspellen van het debiet van het influent op de RWZI. De belangrijkste componenten van het debiet zijn de droogweeraanvoer (DWA), en de regenwateraanvoer (RWA) met de daarbij behorende onzekerheden. Daarom werden deze twee componenten het meest onderzocht in de gegevensanalyse. Het proces begon met een verkennende gegevensanalyse (exploratory data analysis, EDA), een aanpak om de onderliggende structuur van de

gegevens op te helderen, zoals het vinden van patronen en relaties tussen de variabelen, die vervolgens verder kunnen worden onderzocht en gebruikt in de modellen.

Figuur 19 laat zien dat het influentdebiet van de zuivering een sterk dagelijks patroon heeft. Daarbovenop zijn ook de pieken in het debiet als gevolg van neerslag te zien. In het natte seizoen (winter) komen de pieken in het debiet veel vaker boven het dagelijkse patroon uit dan in het droge seizoen (zomer).



Figuur 19 Dagelijkse en wekelijkse patronen – nat (links) en droog (rechts) seizoen (2021).

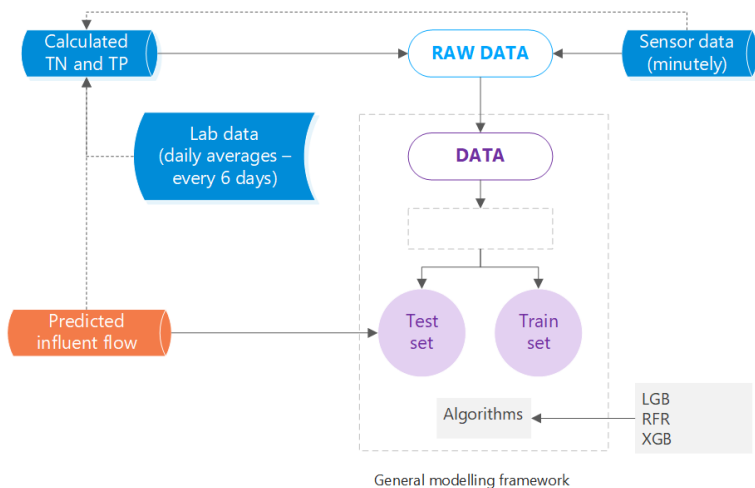
Machinelearning (ML) en deterministische modellen werden getest om het influentdebiet per uur naar de RWZI tot 36 uur van tevoren te voorspellen. De deterministische methode berekende het influentdebiet op basis van de som van het DWA-debiet en het extra neerslagdebiet. Voor het neerslagdebiet werden de hoeveelheid neerslag en de oppervlakte van het aanvoergebied gebruikt om het watervolume te berekenen. Het aanvoergebied werd berekend door het bekende totale debiet over een seizoen te delen door de bekende totale neerslag gedurende dat seizoen. Dit resulteerde in twee verschillende oppervlakten: één voor het droge en één voor het natte seizoen.¹

Ten tweede werden de geschatte volumes van de transportleidingen gebruikt om een gemiddelde tijdsvertraging van elk rioalgemaal naar de RWZI te berekenen in het deterministische model. Er werd ook een hybride aanpak getest, ML + deterministisch, door de voorspellingen van de voorgaande methoden te combineren.

5.2.3 Aanpak zuivering

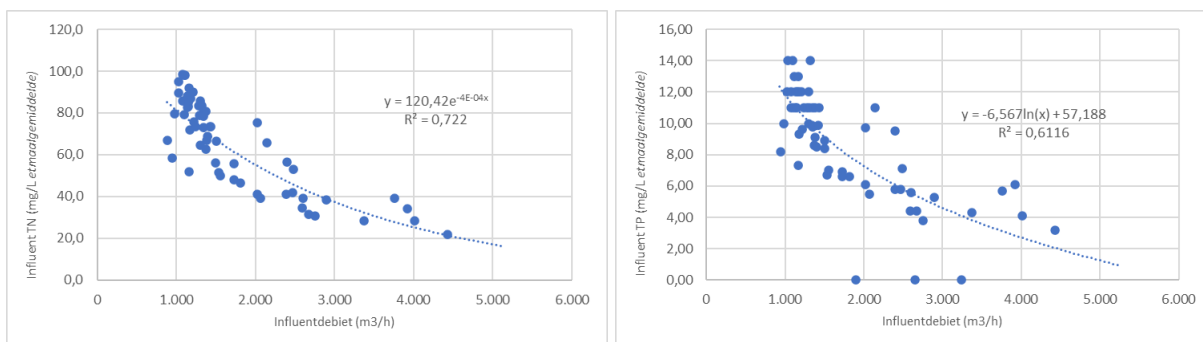
Voor het voorspellen van effluentwaterkwaliteitsparameters en het evalueren van scenario's is gebruikgemaakt van verschillende sensormetingen (zoals influentdebiet en waterkwaliteitsparameters in de gehele zuiveringsinstallatie) voor het trainen en valideren van drie ML-algoritmen (Figuur 20).

¹ Hiervoor is gekozen, omdat een bui in een droge periode het riool vaak niet bereikt. Diezelfde hoeveelheid regen in een natte periode komt vrijwel altijd in het rioolstelsel terecht. Zomer en winter blijken hiervoor voldoende onderscheidend.



Figuur 20 Invoerdata en algoritmen voor de zuivering.

Op basis van laboratoriummetingen (24-uursgemiddelde om de zes dagen) is naar een relatie gezocht tussen zowel het influentdebiet en de totale stikstofconcentraties (TN) als de totale fosforconcentraties (TP) in het influent. Voor deze relaties zijn metingen van heel 2023 gebruikt. Deze relaties zijn vervolgens toegepast om op basis van de sensormetingen van het influentdebiet de TN- en TP-concentraties op uurbasis te schatten (Figuur 21), die vervolgens weer als invoervariabelen zijn gebruikt voor het trainen en valideren van de modellen. Deze benadering is erg onnauwkeurig, maar nauwkeurigere metingen zijn niet beschikbaar. De modellen die met deze metingen zijn getraind, zijn vervolgens ook gevalideerd met het influentdebiet dat door het aanvoermodel is geschat en met de geschatte TN- en TP-waarden.

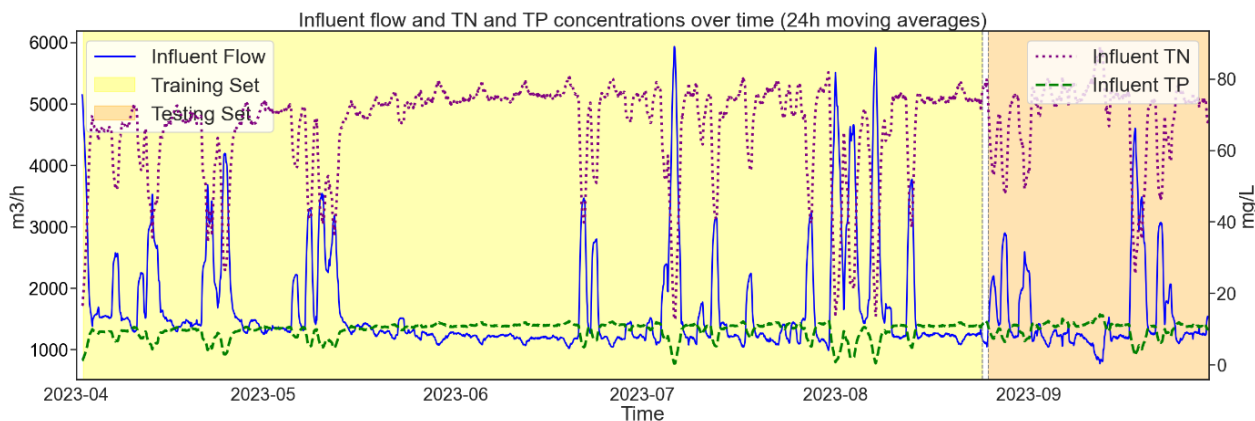


Figuur 21 Relatie tussen influentdebiet en influent totale stikstof- (TN) (links) en totale fosforconcentraties (TP) (rechts).

De drie ML-algoritmen die geselecteerd zijn op basis van de ervaring met het modelleren van het aanvoerstelsel zijn:

- Light Gradient Boosting Regression (LGB)
- Extreme Gradient Boosting Regression (XGB)
- Random Forest Regression (RFR)

Voor de simulaties werden de metingen van de periode april tot september 2023 gesplitst in twee sets: een trainingsset (80% van de metingen) en een validatieset (20% van de metingen). Beide datasets bevatten zowel DWA (dagelijks afvalwater, met een regelmatig debiet van ongeveer 1000-1500 m³/uur) als RWA (regenwaterafvoer, met pieken tussen 1500 en 600 m³/uur) (Figuur 22).



Figuur 22 De influentdebiet, totale stikstof- en fosforconcentraties in de periode april-september 2023.

Voorspelling

De voorspellingsmodellen zijn de autoregressie-versies van de drie eerdergenoemde ML-algoritmen. Tijdens het bepalen van de belangrijkste invoervariabelen werd duidelijk dat, zolang de historische waarden (lags: $[t-1]$, $[t-2]$ en $[t-3]$) van de afhankelijke variabelen (effluent NH_4 - of PO_4 -concentratie) worden gebruikt, het relatieve belang van andere variabelen aanzienlijk vermindert. Met andere woorden: de recente historische gegevens voorspellen de toekomstige waarden het best. Om er zeker van te zijn dat de periodiciteit (seizoensgebonden en dagelijks) in de DWA (debiet en vrachten) correct wordt meegenomen, werd besloten om de tijdsafhankelijke variabelen (datetime-features, afgekort als *dtf*) in alle modellen op te nemen. In deze studie zijn de volgende *dtf*'s meegenomen: week van de maand, dag van de week en uur van de dag. Voor langere validatie- en trainingsperiodes zou de *dtf* 'maand van het jaar' waarschijnlijk ook relevant zijn. Naast de *dtf*'s is het effect en het belang van de volgende variabelen getest:²

- Influentdebiet: *inf_flow* – sensorgegevens per minuut, omgerekend naar uurgemiddelden
- Influent totaal-stikstof en totaal-fosfor: *inf_TN* en *inf_TP* – geschat op basis van laboratoriummetingen³
- Gemiddelde gemeten concentratie van NH_4 en PO_4 in verschillende parallele tanks:
 - *avg_nh4* – het uurgemiddelde van NH_4 -concentraties in de vier aerobe tanks van de twee straten
 - *avg_po4_tank1* – het uurgemiddelde van PO_4 -concentraties in de twee aerobe tanks
 - *avg_po4_tank3* – het uurgemiddelde van PO_4 -concentraties in de twee nabeluchtingstanks
 - *avg_be*: – het uurgemiddelde van de beluchtingsenergie in de twee aerobe tanks

De kwaliteit van de voorspellingen werd geëvalueerd met behulp van de MAE en de RMSE. Het is belangrijk te vermelden dat RMSE grotere fouten zwaarder laat meewegen door het kwadrateren van de fouten, terwijl bij MAE elke fout evenveel bijdraagt. Daarnaast kan op basis van sensormetingen voor NH_4 - en PO_4 -concentratie en debiet een werkelijke effluentvracht berekend worden voor NH_4 en PO_4 . Daarbij is het uitgangspunt dat het influentdebiet gelijk is aan het effluentdebiet. Dus de werkelijke vracht (true) is de gemeten concentratie vermenigvuldigd met het gemeten debiet. Deze kon vergeleken worden met:

1. Voorspelde effluent N- en P-vracht bij gemeten debiet en geschatte influentkwaliteit – dit werd gedaan op basis van de voorspelde effluentkwaliteit gecombineerd met het gemeten debiet. Het resultaat is niet volledig voorspellend, omdat het gemeten debiet bekend wordt verondersteld (hybrid).
2. Voorspelde effluent N- en P-vracht op basis van voorspeld debiet uit het aanvoerstelsel en geschatte influentkwaliteit (TN en TP) – deze voorspelling gebruikt geen metingen; dit model is volledig voorspellend (full).

Scenario's

De scenario's in dit project vereisen dat de ML-algoritmen zo goed mogelijk de samenhang beschrijven tussen effluent NH_4 -concentratie, de afhankelijke variabele en twee belangrijke onafhankelijke variabelen,

² Bij elke simulatie die deze variabele bevat, werden de data van de variabele, de 24-uursvertraging en het 24-uurs voortschrijdend gemiddelde meegenomen.

³ TN bij DWA is vrij constant. RWA resulteert in een verdunning van deze TN, zodanig dat er een verband bestaat tussen influent-TN (elke 6 dagen gemeten) en influentdebiet (op dezelfde dag gemeten). Op dit moment wordt daarom influent-TN per uur geschat uit het influentdebiet per uur, omdat er geen andere gegevens bestaan. Desalniettemin kan effluent-TN alsnog redelijk goed geschat worden met deze benadering. Hetzelfde geldt voor TP. Continue metingen op influent kunnen deze modellen aanzienlijk verbeteren.

namelijk het influentdebiet en de TN-concentratie. Voor de scenario-evaluaties is daarom gekozen voor eenvoudige regressieversies van de eerdergenoemde ML-algoritmen, waarbij geen historische gegevens van de afhankelijke variabelen werden gebruikt (alle $[t-x]$ features zijn daarbij niet gebruikt, omdat feitelijk het gehele systeem verandert en de historie daarvan onbekend is).

5.3 Resultaten

5.3.1 Resultaten aanvoerstelsel

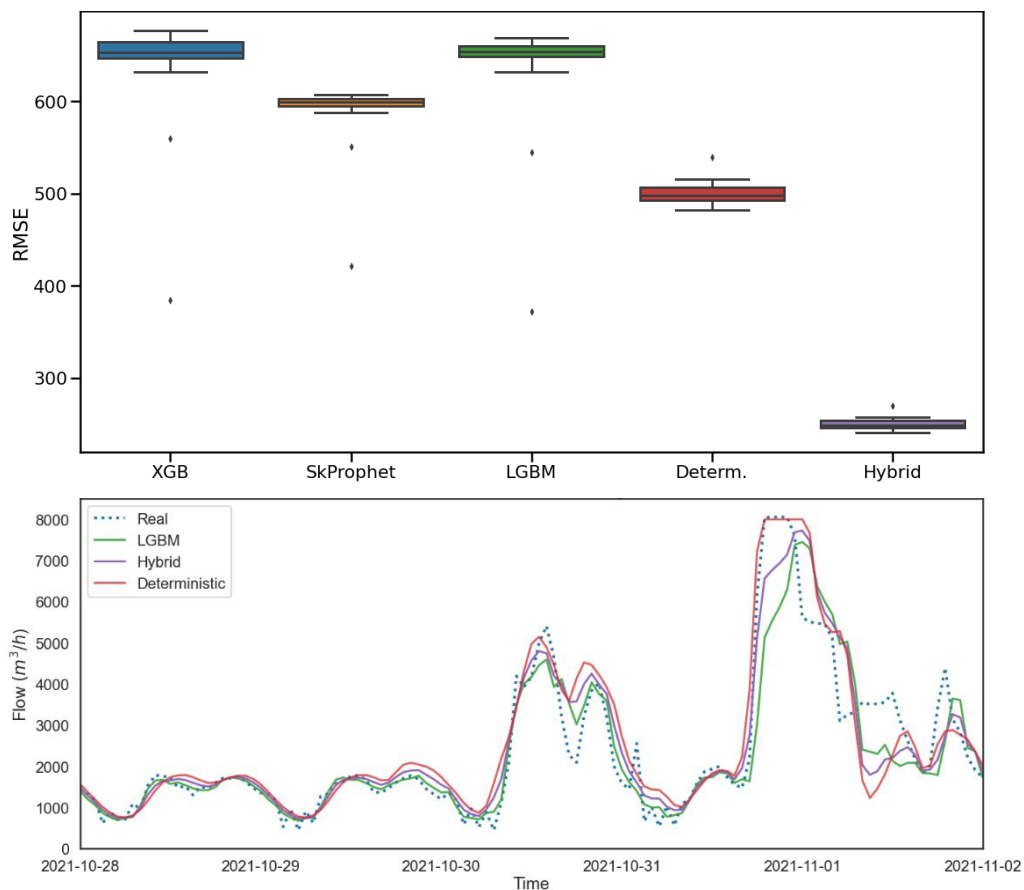
Voorspelling

Na een iteratief proces waarbij de modellen met verschillende modelkenmerken (features) en de individuele bijdrage van deze features werden geanalyseerd, werden de volgende features gekozen voor elk van de modellen (Tabel 1). Alleen de tijdsvertragingen en tijdsvensters (voor berekening van het voortschrijdend gemiddelde) die het meest bijdroegen, werden bewaard. Om het debiet op tijdstip $[t]$ te bepalen, bleken de voorafgaande metingen van $[t-1]$ tot $[t-7]$ belangrijk te zijn. De meting van $[t-5]$ bleek wat minder belangrijk te zijn. De metingen $[t-24]$ en $[t-25]$ waren ook belangrijk, vanwege het dagelijkse patroon (24 uur). Of het al dan niet weekend was, bleek niet zo belangrijk, waarschijnlijk omdat deze al werd gedekt door de feature 'dag van de week'.

Tabel 1 Invoerparameters voor elk getest model. Voetnoot – De *rode* parameters vormen de top 5 (belangrijkste).

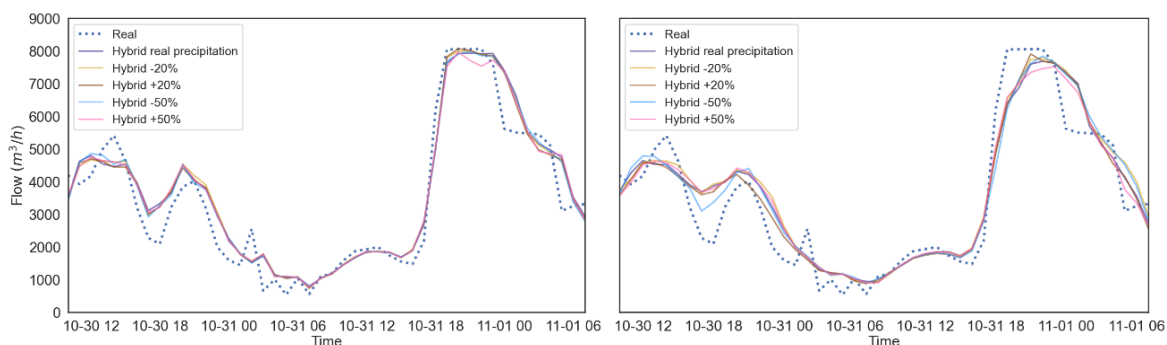
Type invoer	SkProphet	Model			
		XGB	LightGBM	Deterministisch	Hybrid
Tijdsvertraging $[t-x]$ uur	1 - 36	1 , 2, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 24, 25, 29	1 , 2 , 3, 4, 6, 7, 10, 24, 25, 29	11, -	1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 24, 25, 29
Patronen	-	Dag van de week, uur , maand, periodiciteit	Dag van de week, uur , maand, periodiciteit	-	
Tijdsvenster van voortschrijdend gemiddelde [uur]		Neerslag: 2, 5 Calc.: 2 , 3, 5, 10	Neerslag: 2, 5 Calc.: 2 , 3, 5, 10	-	
Fysisch		Berekend debiet	Berekend debiet	Berekend debiet	Berekend debiet
Ruwe metingen	Ede neerslag & debiet				

Tijdens de identificatiefase (feature engineering) zijn verschillende versies van de modellen gevalideerd, maar een klein aantal werd daaruit geselecteerd (Tabel 1). De RMSE van de validatiereeks, jaar 2021, voor de vijf modellen zijn in Figuur 23 (boven) te zien en ook de tijdreeksen van de drie gebruikte modellen in Figuur 23 (onder).



Figuur 23 Root Mean Square Error (RMSE) van de vijf modellen bij 35 voorspellingen van 1 tot 36 uur vooruit (boven) en een voorbeeld van de 24-uur-vooruitvoorspelling gedurende vijf dagen in 2021 (onder).

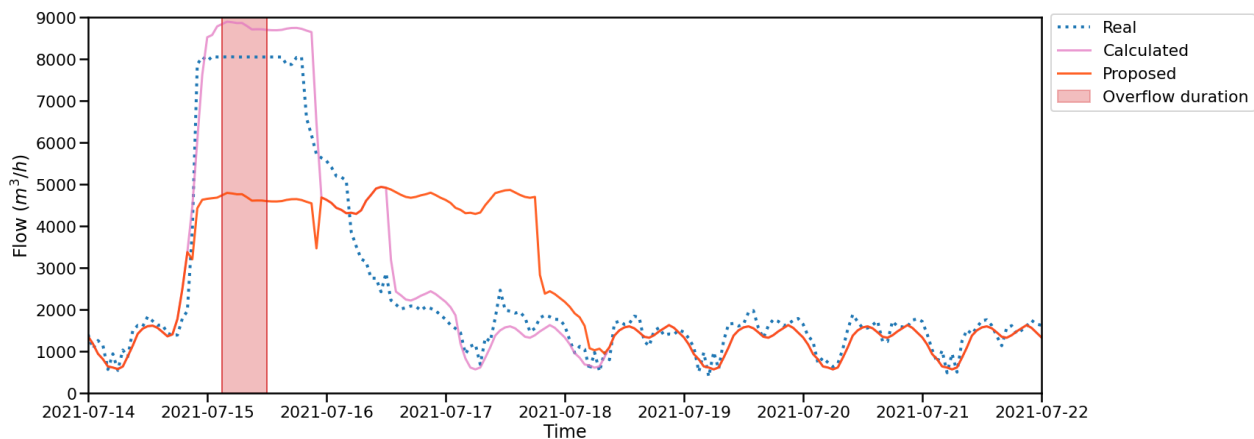
De ML-modellen doen het beter dan de deterministische in de eerste twee uur van de voorspelling, vanwege de sterke autocorrelatie van het gemeten debiet op eerdere tijdstippen. De ML-fout neemt toe met de toename van de voorspellingshorizon en stabiliseert zich na vier tot vijf uur. Het deterministische model is daarentegen niet gevoelig voor de voorspellingshorizon. Bovendien was de hybride benadering (ML + deterministisch) het nauwkeurigst, met een gemiddelde absolute procentuele fout (MAPE) van circa 9% voor de hele horizon tot 24 uur. Deze benadering bleek ook robuust te zijn voor neerslagonzekerheden, in tegenstelling tot het deterministische model, dat sterk wordt beïnvloed door fouten in de regenvoorspelling. Figuur 24 toont de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor neerslagonzekerheid van de hybride benadering. Zoals uit Figuur 23 ook al blijkt, combineert het hybride model de sterke punten van de ML- en de deterministische aanpak en compenseert het in de meeste gevallen de afzonderlijke zwakke punten. De 24-uur-vooruitvoorspelling wordt niet sterk beïnvloed door de neerslagverandering, waardoor dit model vrij robuust is. Het is nog steeds gevoelig genoeg om pieken in het debiet veroorzaakt door hevige regenval te voorspellen.



Figuur 24 Effect van neerslagonzekerheid op de debietvoorspellingsmodellen. De figuur laat zien hoe de voorspellingen van de modellen worden beïnvloed door de neerslagonzekerheid bij gebruik van het hybride model (links) 1 uur en (rechts) 24-uursvoorspelling.

Rioolstelsel als waterbuffer

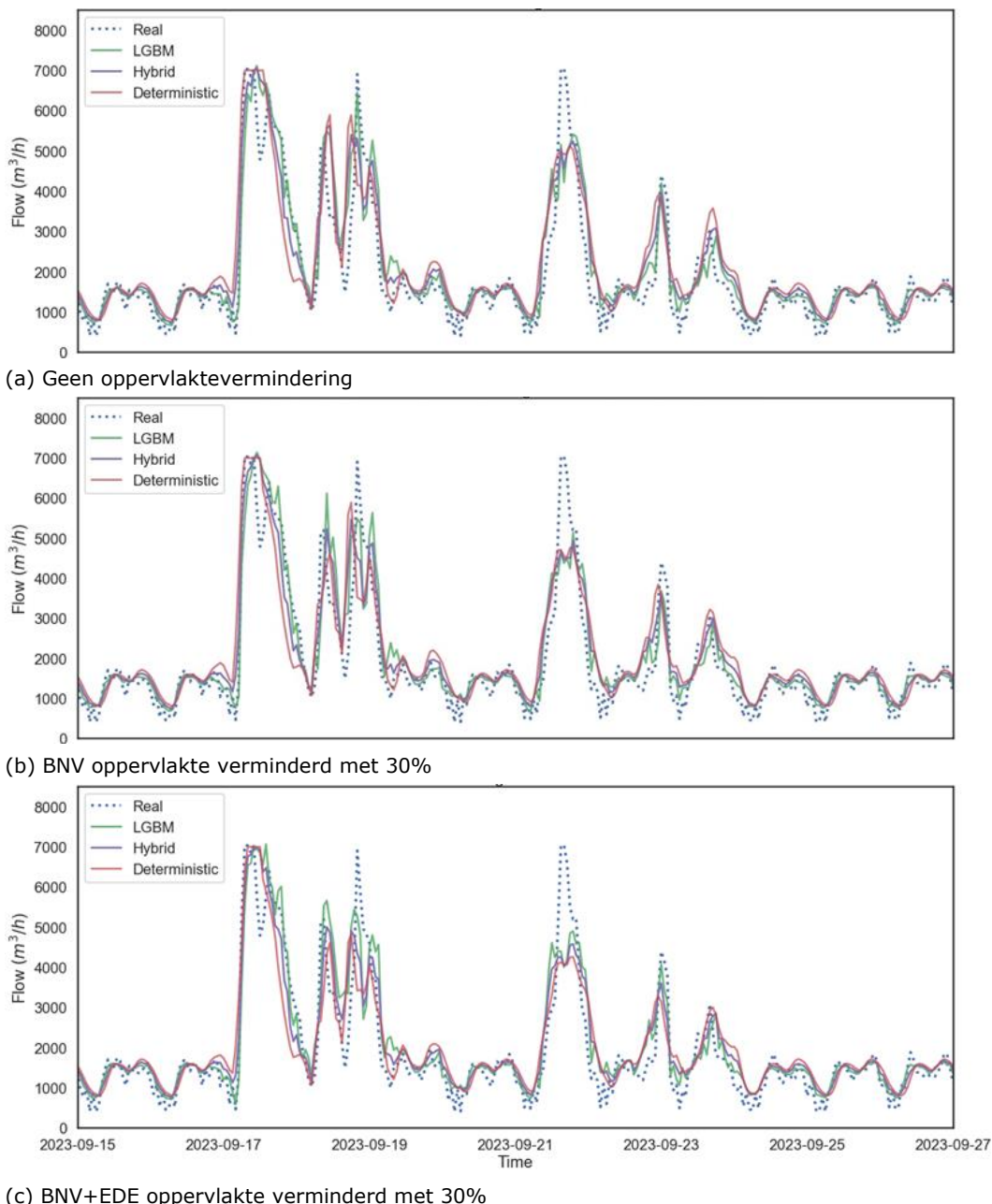
Een aangepast deterministisch model werd gebruikt om het gebruik van het rioolstelsel als waterbuffer te onderzoeken om overstroming te voorkomen. De strategie bestond uit het stoppen of verlagen van het debiet bij sommige rioolgemaal op momenten van hevige neerslag en hoge debieten bij het influentgemaal in Ede. Er werd geconcludeerd dat het mogelijk is om het rioolstelsel te gebruiken om het debiet te egaliseren en overstorten te voorkomen (Figuur 25), maar dit vereist wel grote opslagcapaciteit in het rioolstelsel van de gemeente. Een alternatief is het afkoppelen van het gemeentelijk stelsel. De haalbaarheid van deze strategie moet worden bepaald door WVV.



Figuur 25 Voorspelling van het debiet naar de RWZI met buffering in het rioolstelsel. De geregistreerde overstort bij de RWZI (rode vlak) wordt reeds voor de RWZI gebufferd in het rioolstelsel van de gemeenten. De piek wordt afgevlakt en het duurt langer voordat het water het droogweerpatroon bereikt. Deze specifieke regelstrategie vereiste een maximaal opslagvolume per knooppunt van: OTL: 10197 m³, LTR: 14180 m³, BNV: 23980m³.

Regenwater afkoppelen

Vervolgens werd het afkoppelen van een deel van het regenwater van het rioolstelsel en het effect hiervan op het rendement van de RWZI onderzocht. Twee scenario's werden daarbij geëvalueerd: het afkoppelen van 30% van het regenwater van BNV en 30% van BNV+EDE samen. Om dit te simuleren, werd het deterministische model gebruikt en werd de oppervlakte van het aanvoergebied (een modelparameter) van BNV of BNV+EDE met 30% verkleind. De resultaten hiervan staan respectievelijk in Figuur 26a, b en c. Bij kleine tot gemiddelde regenbuien laat de ontkoppeling een vermindering van het influentdebiet zien, hetgeen naar verwachting een gunstig effect heeft op het rendement van de RWZI. Tijdens lange en hevige regenbuien kon de oppervlaktebeperking de piek echter niet verminderen, hetgeen betekent dat een grotere hoeveelheid moet worden afgekoppeld om die pieken af te vlakken.



Figuur 26 Voorspelling van het debiet naar de RWZI met afkoppelen in het rioolstelsel.

5.3.3 Resultaten zuivering

Effluent NH_4

Tabel 2 geeft de validatieresultaten van alle modellen voor het voorspellen van effluent NH_4 drie uur vooruit. Ter vergelijking met de voorspellingen één en twee uur vooruit, zijn de resultaten van het slechtst en best presterende model weergegeven in Figuur 27.

De validatieresultaten voor effluent NH_4 vertonen MAE-waarden tussen 0,35 en 0,86 mg/L NH_4 en RMSE-waarden tussen 0,96 en 2,06 mg/L NH_4 . Deze afwijkingen zijn relatief hoog, aangezien de gemiddelde concentraties van DWA en RWA voor de periode april-september 2023 respectievelijk 0,64 mg/L NH_4 (75^e percentiel: 0,56 mg/L NH_4) en 2,44 mg/L NH_4 (75^e percentiel: 2,69 mg/L NH_4) bedragen. Ook op jaarbasis, met een berekend jaargemiddelde van 1,40 mg/L NH_4 op basis van laboratoriummetingen, zouden deze afwijkingen als aanzienlijk hoog kunnen worden beschouwd.

Uit de validaties met voorspeld influentdebiet en de hierop geschatte TN-waarden blijkt dat de meeste modellen beter presteren dan bij validaties met metingen. Dit resulteert in MAE-waarden van 0,35-0,52 mg/L NH_4 en RMSE-waarden van 0,96-1,36 mg/L NH_4 . Dit is contra-intuïtief, omdat het voorspelde influentdebiet, gegenereerd door het aanvoermodel, eigen fouten introduceert. Een mogelijke

verklaring hiervoor is echter dat neerslag als invoervariabele wordt gebruikt voor de voorspelling van het influentdebiet, wat een bepalende factor blijkt te zijn voor de effluentkwaliteit.

Op basis van deze resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken voor het voorspellen van effluent-NH₄ bij RWZI Ede:

- Met zowel lags als *dft*'s is het mogelijk om een realistische voorspelling te maken.
- Het toevoegen van influentdebiet en influent TN-concentraties verbetert de modellen met lags en *dft*'s.
- De resultaten met influentdebiet en influent TN-concentraties zijn vergelijkbaar of in sommige gevallen beter dan wanneer andere variabelen, zoals de NH₄-concentratie in de tanks en het energieverbruik voor beluchting, worden toegevoegd.
- Validaties met metingen tonen aan dat de LGB- en RFR-regressoren beter presteren, maar uit validaties met voorspeld influentdebiet blijkt dat de LGB-regressor het best presteert.

Tabel 2 Modelprestaties voor het derde uur vooruit-voorspelling van effluent NH₄ met de drie modellen en verschillende invoervariabelen. Interpretatie van de features: hoe lager de MEA en RMSE, hoe beter; hoe lager het percentage van het verschil in de totale vracht, hoe lager de voorspelde totale vracht door het model. Kleurcode voor de resultaten per statistische term over alle modellen: groen-laagste waarde – beste model – naar rood-hoogste waarde – slechtste model.

Effluent NH ₄								
Invoervariabelen		Data*			Voorspelde variabelen **			
		LGB	RFR	XGB	LGB	RFR	XGB	
<i>lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf</i>	MAE (mg/L)	0,51	0,86	0,74	-	-	-	
	RMSE (mg/L)	1,18	2,06	1,80	-	-	-	
		3009	3462	3153	-	-	-	
	Voorsp. data - Gemet.****	0,87%	16,06%	5,70%	-	-	-	
<i>lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow</i>	MAE (mg/L)	0,46	0,51	0,48	0,37	0,48	0,47	
	RMSE (mg/L)	1,20	1,27	1,13	1,01	1,20	1,08	
		Voorsp. data (kg NH ₄)**			Voorsp. voorsp. (kg NH ₄)**			
		2995	3126	2977	3085	3237	3182	
<i>lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow, inf_TN</i>	Voorsp. data - Gemet.****	0,40%	4,79%	-0,20%	3,42%	8,51%	6,67%	
	Voorsp. voorsp. - Voorsp. data				3,01%	3,55%	6,89%	
	MAE (mg/L)	0,42	0,43	0,52	0,35	0,40	0,41	
	RMSE (mg/L)	1,13	1,05	1,19	0,98	0,96	0,98	
<i>lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow, inf_TN, avg_nh4</i>		Voorsp. data (kg NH ₄)**			Voorsp. voorsp. (kg NH ₄)**			
		3007	2995	3075	3000	3074	3078	
	Voorsp. data - Gemet.****	0,80%	0,40%	3,08%	0,57%	3,05%	3,18%	
	Voorsp. voorsp. - Voorsp. data				-0,23%	2,64%	0,10%	
<i>lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow, inf_TN, avg_nh4</i>	MAE (mg/L)	0,46	0,49	0,50	0,44	0,48	0,52	
	RMSE (mg/L)	1,19	1,23	1,30	1,16	1,19	1,36	
		Voorsp. data (kg NH ₄)**			Voorsp. voorsp. (kg NH ₄)**			
		3163	3176	3021	3217	3237	3178	
<i>lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow, inf_TN, avg_nh4</i>	Voorsp. data - Gemet.****	0,80%	0,40%	3,08%	7,84%	8,51%	6,54%	
	Voorsp. voorsp. - Voorsp. data				1,71%	1,92%	5,20%	
	MAE (mg/L)	0,45	0,39	0,48	0,41	0,36	0,51	
	RMSE (mg/L)	1,12	1,09	1,17	1,09	1,00	1,18	
<i>lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow, inf_TN, avg_nh4</i>		Voorsp. data (kg NH ₄)**			Voorsp. voorsp. (kg NH ₄)**			
		3006	2924	3065	3010	3025	3076	
	Voorsp. data - Gemet.****	0,77%	-1,98%	2,75%	0,91%	1,41%	3,12%	
	Voorsp. voorsp. - Voorsp. data				0,13%	3,45%	0,36%	

* Modellen getraind en getest met data

**Modellen getraind met data en getest met voorspelde influentdebieten en herberekend TN op basis van het voorspelde influentdebiet

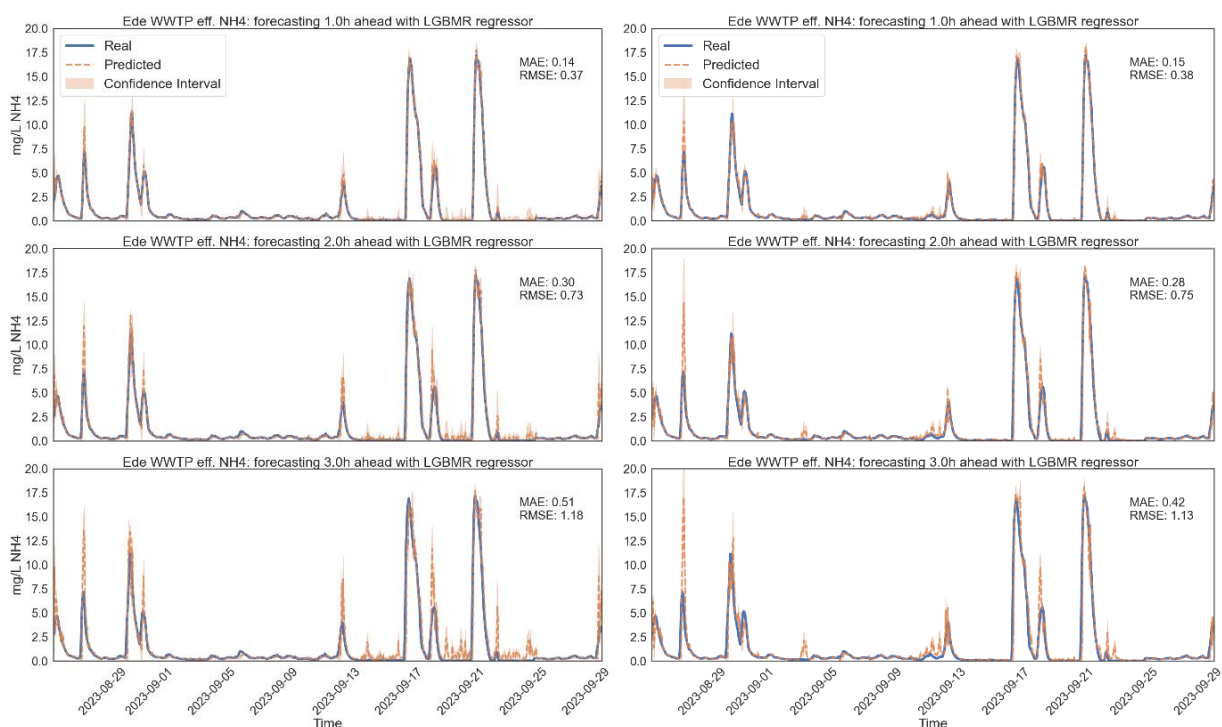
*** Voorspeld totaal over de testperiode

**** Gemeten totaal over de testperiode (kg NH₄):

2983

Alle modellen in Tabel 2 zijn gebruikt om voorspellingen te doen één, twee en drie uur vooruit. De daadwerkelijk voorspelde waarden voor twee van de testen (in Tabel 2 gemarkeerd met 'zie plot') staan in Figuur 27. In deze figuur is te zien dat het model met zowel lags als *dft*'s (Figuur 27, links) al een realistische

prestatie levert, zowel voor DWA als voor RWA. Het gebruik van influentdebiet en TN (Figuur 27, rechts) verbetert de nauwkeurigheid van de voorspellingen vooral voor meer dan één uur vooruit.



Figuur 27 Validatie met metingen voor het voorspellen van effluent NH_4 voor één (boven), twee (midden) en drie (onder) uur vooruit door de LGB-regressor met lag $[t-1]$, $[t-2]$, $[t-3]$ en dft (links) en met lag $[t-1]$, $[t-2]$, $[t-3]$, dft , influentdebiet en influent TN (rechts) als invoervariabelen.

Effluent PO_4

De modellen voor het voorspellen van effluent- PO_4 gevalideerd met metingen liggen binnen MAE-waarden van 0,19-0,29 mg/L PO_4 en RMSE-waarden van 0,69-0,91 mg/L PO_4 (Tabel 3). Net als bij NH_4 zijn deze waarden relatief hoog, aangezien de gemiddelde PO_4 -concentraties voor DWA en RWA in de periode april-september 2023 respectievelijk 0,32 mg/L PO_4 (75^e percentiel: 0,44 mg/L PO_4) en 0,81 mg/L PO_4 (75^e percentiel: 0,62 mg/L PO_4) bedragen. De MAE- en RMSE-waarden zijn respectievelijk 41%-63% en 150%-198% van de jaargemiddelde PO_4 -concentratie, gebaseerd op laboratoriummetingen (0,46 mg/L PO_4).

Ook voor effluent PO_4 blijkt uit de validaties met voorspeld influentdebiet en de daarbij geschatte TP-waarden dat de meeste modellen beter presteren dan bij validaties met metingen. De MAE-waarden voor deze validaties variëren van 0,17-0,22 mg/L PO_4 en de RMSE-waarden van 0,52-0,67 mg/L PO_4 . Net als bij effluent NH_4 kan de verklaring hiervoor zijn dat neerslag als invoervariabele wordt gebruikt voor de voorspelling van het influentdebiet, wat een bepalende factor blijkt te zijn voor de effluentkwaliteitsparameters.

Op basis van deze resultaten voor het voorspellen van effluent- PO_4 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Met alleen lags en dft 's is het mogelijk om een realistische voorspelling te maken.
- Het toevoegen van influentdebiet verbetert de modellen met lags en dft 's.
- Het toevoegen van influent-TP-concentraties leidt niet in alle modellen tot betere resultaten.
- Het introduceren van PO_4 -concentraties in de tanks verbetert de resultaten met de meeste regressors (twee van de drie regressors).
- Het toevoegen van beluchtingsenergie verslechtert de resultaten bij alle regressors. Validaties met metingen tonen aan dat, afhankelijk van de invoervariabelen, de ene regressor beter presteert dan de andere. Echter, uit alle validaties met voorspeld influentdebiet en geschatte TP blijkt dat de XGB-regressor het best presteert (zie Tabel 3).

Tabel 3 Modelprestaties voor de voorspelling van effluent PO₄ met verschillende invoervariabelen. Interpretatie van de waarden: hoe lager de MEA en RMSE hoe beter; hoe lager het percentageverschil in de totale vracht, hoe lager de voorspelde totale vracht door het model. Kleurcode voor de resultaten per statistische term over alle modellen: groen-laagste waarde – best naar rood-hoogste waarde.

		Effluent PO ₄					
		Data*			Voorspelde variabelen **		
Invoervariabelen		LGB	RFR	XGB	LGB	RFR	XGB
lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf	MAE (mg/L)	0,28	0,28	0,29	-	-	-
	RMSE (mg/L)	0,79	0,71	0,88	-	-	-
	Voersp. eff. PO ₄ * (kg)	1370	1366	1420	-	-	-
	Voersp. - Gemet.**	-4,56%	-4,94%	-1,18%	Zie plot	-	-
lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow	MAE (mg/L)	0,22	0,20	0,21	0,19	0,19	0,17
	RMSE (mg/L)	0,86	0,72	0,73	0,60	0,61	0,52
	Voersp. data (kg PO ₄)**	1613	1547	1476	1507	1499	1389
	Voersp. data - Gemet.**	12,25%	7,65%	2,11%	4,47%	4,31%	-3,34%
lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow, inf_TP	Voersp. voersp. - Voersp. data	-6,57%	-3,10%	-5,89%	-6,57%	-3,10%	-5,89%
	MAE (mg/L)	0,23	0,19	0,24	0,20	0,19	0,18
	RMSE (mg/L)	0,90	0,71	0,82	0,65	0,60	0,56
	Voersp. data (kg PO ₄)**	1624	1533	1530	1480	1476	1422
lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow, inf_TP, avg_po4_tank1, avg_po4_tank3	Voersp. data - Gemet.**	13,01%	6,68%	6,47%	2,99%	2,11%	-1,04%
	Voersp. voersp. - Voersp. data	-8,87%	-3,72%	-7,06%	-8,87%	-3,72%	-7,06%
	MAE (mg/L)	0,21	0,19	0,26	0,20	0,19	0,18
	RMSE (mg/L)	0,72	0,69	0,69	0,67	0,66	0,56
lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow, inf_TP, avg_be	Voersp. data (kg PO ₄)**	1432	1355	1418	1453	1391	1333
	Voersp. data - Gemet.**	-0,35%	-5,71%	-1,32%	1,11%	-3,20%	-7,24%
	Voersp. voersp. - Voersp. data	1,47%	2,66%	-5,99%	1,47%	2,66%	-5,99%
	MAE	Zie plot	0,28	0,22	0,22	0,21	0,20
lag [t-1], [t-2], [t-3], dtf, inf_flow, inf_TP, avg_be	RMSE	0,91	0,75	0,81	0,68	0,67	0,57
	Voersp. data (kg PO ₄)**	1630	1554	1514	1453	1498	1419
	Voersp. data - Gemet.**	13,43%	8,14%	5,36%	1,11%	4,14%	-1,25%
	Voersp. voersp. - Voersp. data	-10,86%	-3,60%	-6,27%	-10,86%	-3,60%	-6,27%

* Modellen getraind en getest met data

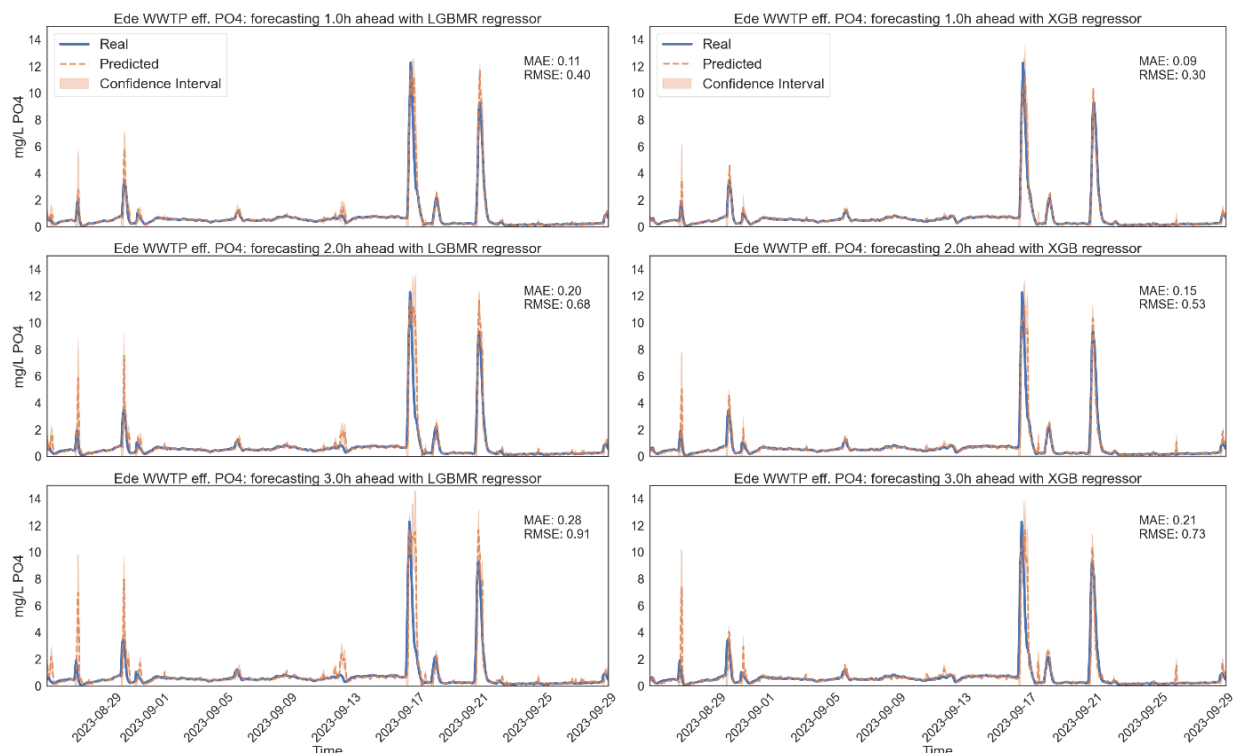
**Modellen getraind met data en getest met voorspelde influentdebieten en herberekend TP op basis van het voorspelde influentdebiet

*** Voorspeld totaal over de testperiode

**** Gemeten totaal over de testperiode (kg PO₄):

1437

De werkelijke voorspelde waarden voor de slechtst en best presterende XGB-modellen zijn uitgezet in Figuur 28, respectievelijk links en rechts. Hier is een verschil al bij het eerste uur zichtbaar, vooral tijdens DWA, maar net als bij effluent NH₄, maken influentdebiet en influent TP als invoervariabelen een groter verschil voor de voorspelling langer dan een uur vooruit.



Figuur 28 Validatie met data voor het voorspellen van effluent PO₄ voor één (boven), twee (midden) en drie (onder) uur vooruit door de LGB-regressor met lag $[t-1]$, $[t-2]$, $[t-3]$, dtf , influentdebiet, influent TN en beluchtingsenergie (links) en de XGB-regressor met lag $[t-1]$, $[t-2]$, $[t-3]$, dtf , en influentdebiet (rechts) als invoervariabelen.

5.3.4 Scenario's zuivering

De regressiealgoritmen (LGB, RFR, XGB) zijn goed in staat om de metingen te reproduceren, met een MAE tussen 0,89 en 0,97 mg/L NH₄ en RMSE tussen 1,96 en 2,08 mg/L NH₄ (Tabel 4). Deze waarden zijn ongeveer 50% hoger dan de resultaten met de autoregressiemodellen voor drie uur vooruit-voorspellingen (Tabel 2). Voor het scenario 'bufferen' was het doel om het influentdebiet en daarmee de aanvoer van NH₄-vrachten vertraagd naar de zuivering af te voeren. Zoals te zien is in Figuur 29, zijn de effluentvrachten tijdens regenwaterafvoer (RWA) wel beter gespreid (de pieken zijn breder), maar onvoldoende verlaagd. Deze conclusie kan het best getrokken worden op basis van de totale effluent NH₄-vracht over de validatieperiode voor elke validatie weergegeven in Tabel 4.

Voor de scenario's waarin regenwater wordt afgekoppeld, leidt minder regenwater in de riolering duidelijk tot lagere NH₄-concentraties in het effluent. Tijdens regenbuien is de NH₄-concentratie verlaagd met 30-40% (Figuur 29). Het afkoppelen van 30% van het gebied in Ede en Barneveld, waarbij regenwater in het riool terechtkomt, levert niet voor alle buien betere resultaten op dan het afkoppelen van 30% alleen in Barneveld.

Op basis van de totale effluent NH₄-vracht over de validatieperiode blijkt de LGB-regressor de beste resultaten te geven, met een vermindering van de totale NH₄-vracht van 19,29% ten opzichte van de totale vracht berekend met de gemeten waarde en 16,67% ten opzichte van de validaties met metingen (Tabel 4).

Tabel 4 Scenario modelprestaties voor de voorspelling van effluent NH₄. Kleurcode voor de resultaten: groen-goed, geel-neutraal, rood-slecht.

Effluent NH ₄				
Scenario's		LGB	RFR	XGB
Data*	MAE (mg/L)	0,89	0,93	0,97
	RMSE (mg/L)	1,96	2,08	2,07
	Voorsp. data (kg NH ₄)***	2853	3041	2642
	Voorsp. data - Gemet.****	-3,14%	3,24%	-10,32%
Bufferen**	Voorsp. scen. (kg NH ₄)***	6334	6904	5296
	Voorsp. scen. - Gemet.****	115%	134%	80%
	Voorsp. scen. - Voorsp. data	122%	127%	100%
Afkoppelen 30% Ede & Barneveld **	Voorsp. scen. (kg NH ₄)***	2378	3037	2366
	Voorsp. scen. - Gemet.****	-19,29%	3,09%	-19,68%
	Voorsp. scen. - Voorsp. data	-16,67%	-0,14%	-10,44%
Afkoppelen 30% Barneveld **	Voorsp. scen. (kg NH ₄)***	2704	3325	2734
	Voorsp. scen. - Gemet.****	-8,23%	12,87%	-7,18%
	Voorsp. scen. - Voorsp. data	-5,25%	9,33%	3,50%

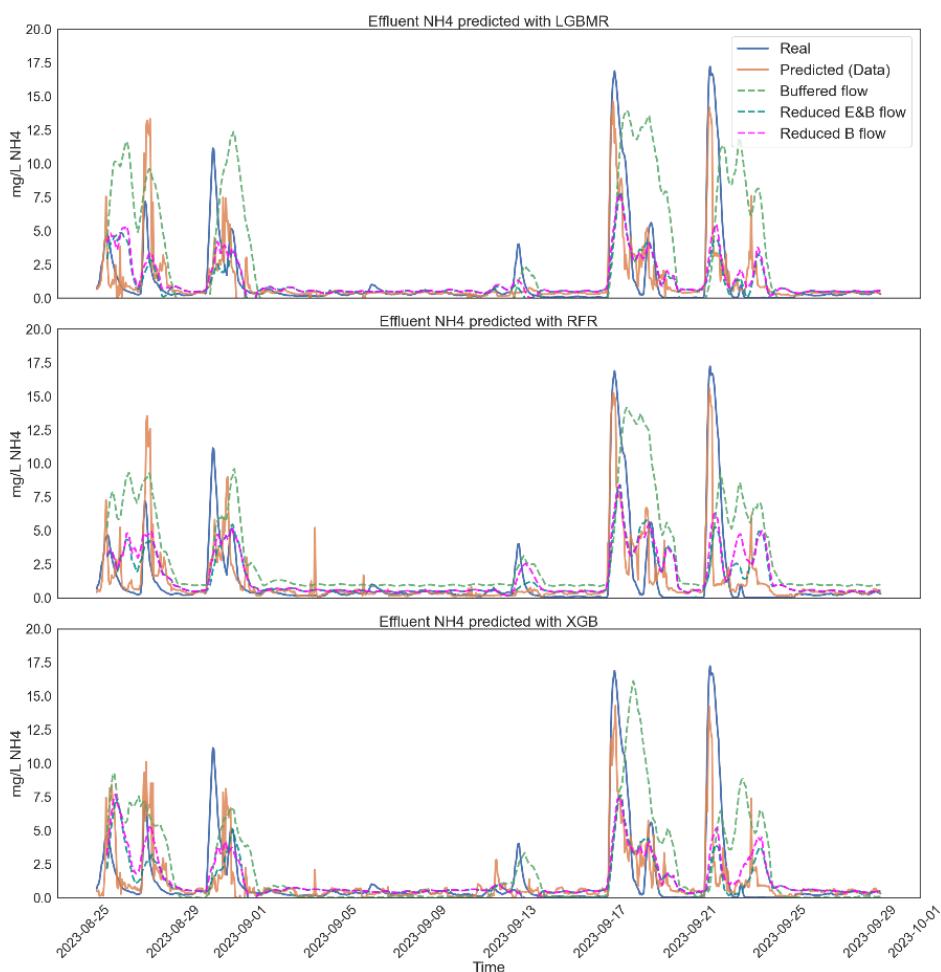
* Modellen getraind en getest met data

** Modellen getraind met data en getest met voorspelde influentdebieten en herberekend TN voor de scenario

*** Voorspeld totaal over de testperiode

**** Gemeten totaal over de testperiode (kg NH₄):

2946



Figuur 29 Scenariovoorspellingen van effluent NH₄ met de drie modellen (top - LGB, midden-RFR, onder-XGB).

5.4 Conclusies, geleerde lessen

Een digital twin maken van een RWZI inclusief het aanvoerstelsel is heel goed mogelijk. De patronen bij droog weer en regen laten zich goed voorspellen en opvallend genoeg zijn het juist de eerdere metingen van een variabele die het bepalendst zijn voor een goede schatting van die variabele in de (nabije) toekomst. Daartoe is machinelearning een heel geschikt gereedschap. Het doel bij thema Zuivering was om maturity level 6 (Wijsheid) te bereiken, waarbij de digital twin kan ingrijpen in het systeem om processen te verbeteren. Dat niveau is niet bereikt, omdat deze digital twin niet realtime draait en ook niet parallel aan het werkelijke systeem; die implementatie moet in de toekomst nog gemaakt worden. De modellen zoals ze nu zijn, geven wel Begrip (maturity level 4) en Inzicht (maturity level 5), zodanig dat beslissingen gemaakt kunnen worden op basis van berekende scenario's. Voor Wijsheid (maturity level 6) is het vooral nodig dat reacties op verstoringen of aanpassingen in het systeem gevalideerd kunnen worden, bijvoorbeeld hoe het debiet naar de zuivering reageert als water langer wordt vastgehouden in het rioolstelsel of hoe de waterkwaliteit verandert als beluchting of chemiedosering bewust aangepast wordt. Die verstoringen kent het systeem nu niet en het kan dus ook niet 'leren' hoe daarmee om te gaan.

De inzet van deze tool zal nog aanzienlijk verbeterd kunnen worden als:

1. Frequent en consistent gemeten wordt aan de ingang (influent) en uitgang (effluent) van het systeem. Een resolutie van 15 minuten lijkt afdoende voor een goed werkend model.
2. Binnen de zuivering ook relaties gelegd kunnen worden tussen de input, toestand (state) en output, zonder het eigenlijke regelsysteem te simuleren, hetgeen machinelearning nu feitelijk doet. Dat betekent dat er ook variaties aan inputs aangelegd moeten kunnen worden voor systeemidentificatie (aanpassingen in dosering van beluchting en chemie).
3. Gegevens realtime beschikbaar zijn, inclusief een voorspelling per (dorps-/stads)kern van de regenval. Dit laatste is wel mogelijk, maar is met deze modellen nog niet bereikt.

Belangrijke lessen zijn:

1. Er moet onderscheid gemaakt worden tussen de seizoenen. In de winter gaat er sneller water naar de zuivering bij eenzelfde hoeveelheid neerslag dan in de zomer. In de gebruikte modellen wordt daarom per seizoen gebruikgemaakt van verschillende (virtuele) oppervlakten die een regenbui opvangen.
2. Combinaties van fysische en machinelearning-modellen (hybride) kunnen betere resultaten opleveren dan niet gecombineerde modellen. Zo is een tijdvertraging tussen regenval en het debiet in het aanvoerstelsel fysisch goed te berekenen, terwijl een ML model dit niet goed kan benaderen.
3. Het moet duidelijk zijn welke variabelen (metingen) het gevolg zijn van andere variabelen (metingen), dus welke zijn de afhankelijke en welke de onafhankelijke variabelen. Concreet: volgt een ammoniummeting op een zuurstofdosering of reageert de zuurstofdosering op de ammoniummeting of beïnvloeden ze zelfs elkaar in een gesloten loop?
4. Systeemkennis van het aanvoerstelsel en de zuivering en kennis van machinelearning zijn samen nodig om een begrijpelijke digital twin te ontwerpen.

6 Verdieping Brondata

6.1 Inleiding

Om een digital twin efficiënt en effectief te ontwerpen en te ontwikkelen, is het goed om dat modulair te doen, waarbij minimaal drie bouwstenen nodig zijn: Brondata, Dataverwerking en Visualisatie/(voor) Besluitvorming.

De bouwsteen Brondata gaat over welke data waar beschikbaar zijn en in welk format voor het draaien van digital twins (ofwel het definiëren van de inputs, outputs en huidige stand van zaken in het systeem, de state-space). Aangezien een digital twin een realltimemodel van de werkelijkheid is, ontvangt het model continu data van het onderliggende fysische systeem dat uitgerust is met sensoren. Online kan daardoor een proces gestuurd worden in de gewenste richting, terwijl offline doorgerekend kan worden hoe veranderingen aan de ingang of veranderingen in de procesparameters van invloed zijn op de responsies (output) van het geheel. Dat vraagt van de data dat deze (realtime) door de twin gelezen en verwerkt kunnen worden. De bouwsteen Brondata beslaat verschillende gebieden: oppervlakte- en grondwaterwaterkwaliteit, droogte-monitoring en -bestrijding, en waterzuivering. Vanuit al deze subsystemen, die met elkaar in verbinding staan, worden data gegenereerd. Er kan ook op al deze subsystemen, al dan niet beperkt, worden ingegrepen, denk aan aansturing van stuwen en pompen.

De oorspronkelijke taak van de werkgroep Brondata is het beantwoorden van de volgende vragen:

- Welke data zijn aanwezig?
- Welke data zijn noodzakelijk, maar ontbreken?
- Zijn de data bruikbaar of zijn er nog bewerkingen nodig voor toepassing?
- Kunnen data gecombineerd worden, zodat nieuwe, tot dan toe ontbrekende data ontstaan?

Centraal in dit hoofdstuk staat dan ook de inventarisatie van databronnen, per thema (Zuivering, Droogte en Waterkwaliteit). Databronnen worden gekarakteriseerd door een reeks parameters. De parameters zijn zo gekozen dat ze passend zijn voor alle thema's. Op die manier kunnen we hetzelfde format voor de inventarisatie gebruiken, ongeacht het thema. Per thema is een theoretische inventarisatie beschikbaar en een praktische inventarisatie. De eerste is bedoeld als indicatie voor wat nodig is in de ideale situatie om een (meer) generieke twin te ontwerpen. De laatste weerspiegelt de situatie 'as is', ofwel zoals die is ontstaan door de introductie van de gehanteerde use cases. Op deze manier kunnen de themagroepen de inventarisaties doorontwikkelen. Immers, bij aanvullingen of aanpassingen met betrekking tot bestaande use cases of bij introductie van nieuwe use cases kunnen in de praktische inventarisatie rijen (databronnen) worden toegevoegd. De theoretische inventarisatie kan daarbij als inspiratie dienen.

Daarnaast bestaat er een document 'Digital Twin taken en verantwoordelijkheden'. De oorspronkelijke taakstelling voor de werkgroep Brondata is daarin aangescherpt. Echter, in de praktijk zijn de taken met betrekking tot Lizard/Azure (externe server, cloud platform) zoals die daarin genoemd werden door de betreffende themagroepen, in samenwerking met de waterschappen, zelf opgepakt.

Van tevoren is vastgesteld welke data nodig zijn voor de digital twin. Daarbij is gekeken naar onder andere sample-frequentie, ruimtelijke nauwkeurigheid (resolutie, GIS), beschikbaarheid en toegankelijkheid. HZ University of Applied Sciences (Hogeschool Zeeland), Imec en Royal Eijkelpark hebben veel ervaring met sensoren voor waterkwaliteit en het beheren, evalueren en interpreteren van datastromen. In dit samenwerkingsproject zijn deze ontwikkelde processen voor dataverificatie, detectie en filtering van uitbijters en verbetering van signaal-ruisverhouding ingezet om ervoor te zorgen dat de data die gebruikt worden voor de opzet van de digital twin bruikbaar en betrouwbaar zijn.

Doel

De doelen voor de werkgroep Brondata zijn, in relatie tot de onderliggende vragen, als volgt aangescherpt:

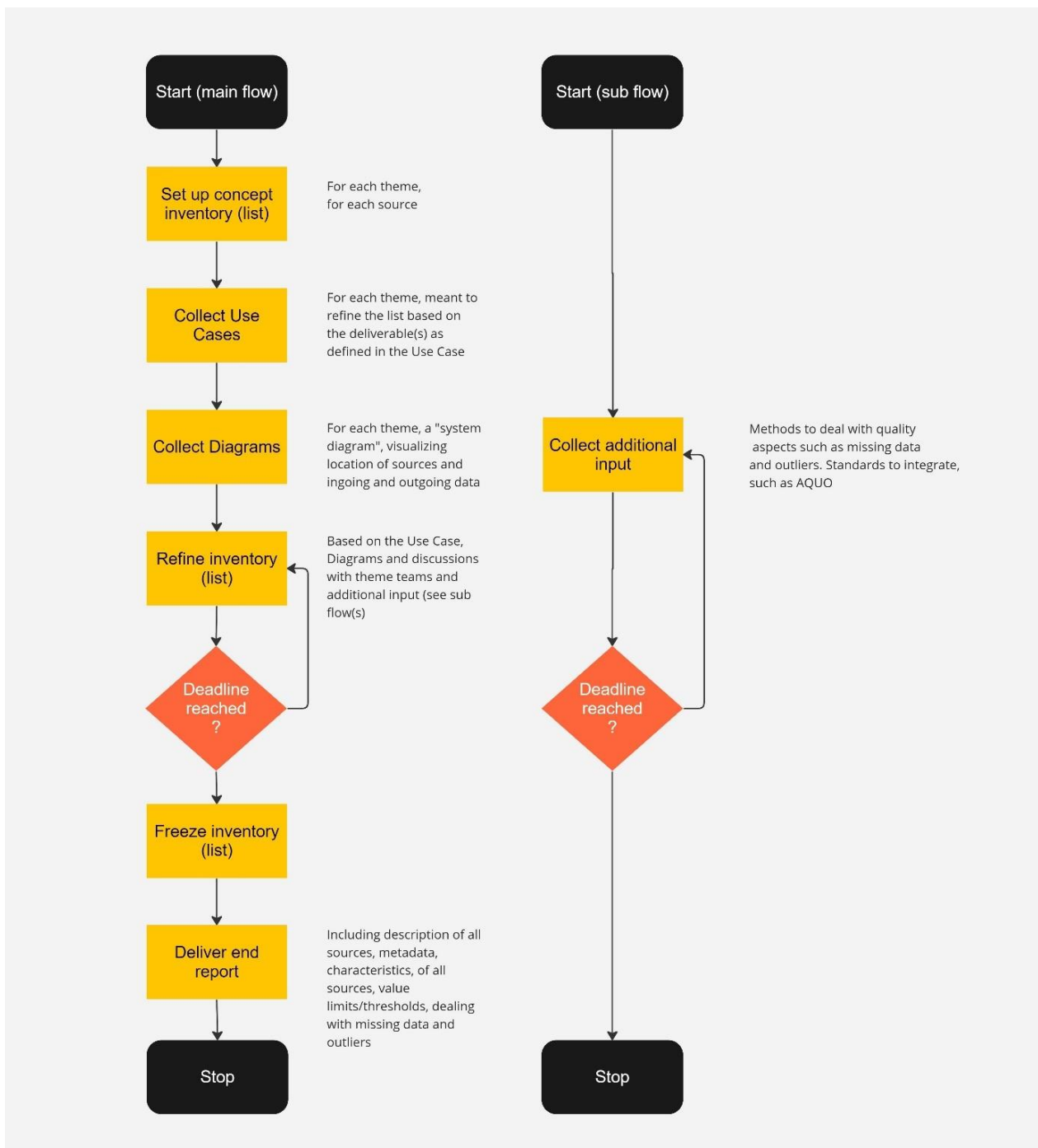
- Inventarisatie van welke data(bronnen en -stromen), waar beschikbaar zijn onder welke voorwaarden.
- Inventarisatie van beschikbare dataformaten en hoe deze op elkaar aansluiten.
- Vastleggen van resolutie en frequentie van data en eisen/randvoorwaarden van de digital twin voor het waterbeheer.
- Verwerken van ruwe data naar bruikbare gegevens (inclusief het vastleggen van welke stappen nodig zijn en welke stappen buiten het verdiepingsthema Brondata vallen).

6.2 Aanpak

Het uitgangspunt bij de bouwsteen Brondata is dat databronnen betrekking hebben op de input voor de digital twin voor het waterbeheer. Dat betekent dat de data uit die bron geschikt moeten zijn voor Verwerking. Data die gebruikt worden in de digital twin voor het waterbeheer, hebben eigenschappen die onderverdeeld worden in drie groepen:

- Algemeen
 - Plaatsaanduiding (xyz-coördinaten)
 - Dataherkomst (meting, model)
 - Meetfrequentie en - nauwkeurigheid (+ kalibratie en onderhoud)
 - Beschikbaarheid (offline/online, discontinue/continue)
 - Data format + data transfer
 - Format en gebruik uitwisselformat waterschappen
 - Communicatie, ofwel GPRS, API-koppeling etc.
 - Conversie (afhankelijk van wat de DTW wenst te 'zien')
- Thematisch
 - Droogte: bijv. debieten, waterstanden, peilbuizen + GIS, weersverwachting, verdamping
 - Zuivering: informatie over unitprocessen, zoals debieten, DO, pH, troebelheid, niveau, visueel slib
 - Waterkwaliteit (grond - en oppervlaktewater): bijvoorbeeld EGV, DO, pH, nitraat, troebelheid, temperatuur
- Kwaliteit
 - Nauwkeurigheid en integriteit (outliers, drift, missing data etc.)
 - Validiteit

Als eerste actie is door de werkgroep Brondata een conceptinventarisatielijst voor databronnen opgezet als opstap naar het kunnen beantwoorden van bovenstaande vragen. Deze lijst is gevuld met tot dan toe bekende informatie. Daarbij is gebruikgemaakt van de informatie uit het Werkplan verdiepend onderzoek brondata. Dat betekent dat de lijst met name databronnen vanuit theoretisch, of optimaal geacht perspectief bevatte. Daarna is de lijst in enkele iteraties verfijnd, door deze te matchen met wat er in de praktijk, ofwel vanuit de opgestelde use case gebeurde. Figuur 30 vat de inventarisatieprocedure grafisch samen.



Figuur 30 Samenvatting van de procedure voor de inventarisatie van databronnen.

Op basis van kennis en ervaring binnen de werkgroep Brondata betreffende de drie thema's (Zuivering, Droogte en Waterkwaliteit) in het algemeen en specifiek voor de twee deelnemende waterschappen, is een initiële lijst gemaakt met databronnen. Die is generiek en daardoor wellicht omvangrijk. Op basis van de door de themagroepen opgestelde use cases is deze initiële lijst in een aantal iteraties bijgesteld:

- Kolommen (eigenschappen van de data) zijn toegevoegd of opgesplitst
- Rijen (de databron zelf) zijn toegevoegd of verwijderd
- Defaultwaarden zijn vervangen door praktijkwaarden
- Lege cellen zijn ingevuld met praktijkwaarden

Evaluatie

In eerste instantie is gekeken naar compleetheid van de eigenschappen en vervolgens naar compleetheid van de velden, ofwel is voor iedere combinatie van een rij (bron) en kolom (eigenschap) een waarde ingevuld. Omdat er ook een kolom Prioriteit is, is hierbij alleen gekeken naar de rijen met de waarde 'Must

Have' bij de kolom Prioriteit. De compleetheid is vervolgens per thema weergegeven in een tabel (zie paragraaf 6.3, bij Inventarisatie).

Datakwaliteit

Om uiteindelijk de datakwaliteit te kunnen beschrijven, is een keuze gemaakt uit verschillende kwaliteit-frameworks. Om een snelle start te garanderen, is gekozen voor een relatief eenvoudige subset van kwaliteitsattributen. Later kunnen die, indien nodig, aangevuld worden. Initieel is gekozen voor:

- *Intrinsic Quality dimensions description*

(<https://journalofbigdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40537-021-00468-0>. Zie ook <https://publicwiki.deltares.nl/display/OptimaHWQ/Optima-HWQ>):

- *Completeness*. Describes whether all relevant data is recorded. It measures missing values for an attribute.
- *Consistency*. Checks whether data agrees with its format and structure. It mostly refers to the respect of data constraints.
- *Accuracy*. Measures whether data was recorded correctly and reflects realistic values. It is also defined as the "closeness of the agreement between the result of a measurement and a true value of the measure".
- *Timeliness*. Computes whether data is up to date, referred to as data currency and volatility.
Strikt genomen had ook *precision* meegenomen moeten worden als *accuracy* in dit lijstje staat. Echter, vanuit brondataperspectief is het niet haalbaar om voor alle inkomende data de *random* en/of *systematic errors* te bepalen. Daarom is de eenvoudigere definitie die hier staat gekozen: "[...] reflects a realistic value". Later in dit document wordt *outlier detection* behandeld. Dat zou een snelle en efficiënte toets kunnen vormen om accuracy, zoals hier bedoeld, vorm te geven.

- *Intrinsic Quality dimensions, examples of metrics:*

- *Completeness*. $\text{Comp (\%)} = \text{NNMV} \cdot 100 / N$: Number of non-missing values / N
- *Consistency*. $\text{Cons (\%)} = \text{NVRC} \cdot 100 / N$: Number of values that respects constraints / N
- *Accuracy*. $\text{Acc (\%)} = *100 / N$: Number of correct values / N
- *Uniqueness*. $\text{Uniq (\%)} = \text{NDV} \cdot 100 / N$: Number of distinct values / N
- *N*. Total number of observations (rows) in dataset or sample

De metrics kunnen bijvoorbeeld gebruikt worden in dashboards om de kwaliteit van de data (komende vanuit databronnen) te monitoren.

Validiteit

Het is belangrijk om te toetsen of de (in de praktijk) gebruikte data valide zijn met betrekking tot:

- 'Validiteit *meetlocatie* voor vraagstuk (ja of nee)': inzicht of het meetpunt op de juiste plaats staat en zo ja, in lijn is met het onderzoeksdoel. Dat is moeilijk te beantwoorden (een van de mogelijke antwoorden zou bijvoorbeeld moeten zijn: "Ik weet niet zeker welke locatie het betreft"). Indien dit als kolom in de inventarisatielijst wordt opgenomen, beperkt dat het aantal mogelijke antwoorden in het algemeen.
- 'Validiteit *metingen* (ja of nee)': validatie van de gemeten data. Heeft de meting gelijk of ongelijk? Normaal gesproken worden datareeksen afkomstig van meetlocaties/netwerken met validatieprotocollen gecontroleerd op uitschieters. Normale percentages voor gegevensreeksen zijn 90%, 95% of zelfs 98% van de geldige data. Ook hier geldt, net als bij de meetlocatie dat het geldigheid voor een specifieke use case betreft, dus ook percentages < 95% kunnen geldig en nuttig zijn voor een specifieke use case.
- 'Validiteit *databron* (ja of nee)': dit in relatie tot data uit hydrologische modellen bijvoorbeeld of andere gegevensbronnen zoals topografische waarden, landgebruik of andere niet gemeten data die nodig zijn in een twin om de hele set te completeren voor concreet waterbeheer. Indien het antwoord "Nee" is, voeg dan ook een nauwkeurigheid toe om de impact aan te geven (is dit geldig voor onze use case?).

Hoe moeten de waarden van de prioriteit op dit moment worden geïnterpreteerd? Tijdens de eerste inventarisatie zou dit kunnen worden gebruikt om te bepalen wat er in de twin moet worden gebruikt. Maar in eerste instantie heeft het misschien een andere betekenis. Voorlopig hebben we besloten om voor 'Must have' te kiezen als de databron echt gebruikt wordt. Als een databron niet wordt gebruikt, hebben we deze een lagere prioriteit gegeven. Dit is de beste weg vooruit.

6.3 Resultaten

Use cases

De use cases zijn als volgt voor de drie thema's gedefinieerd:

De use cases zijn als volgt voor de drie thema's gedefinieerd:

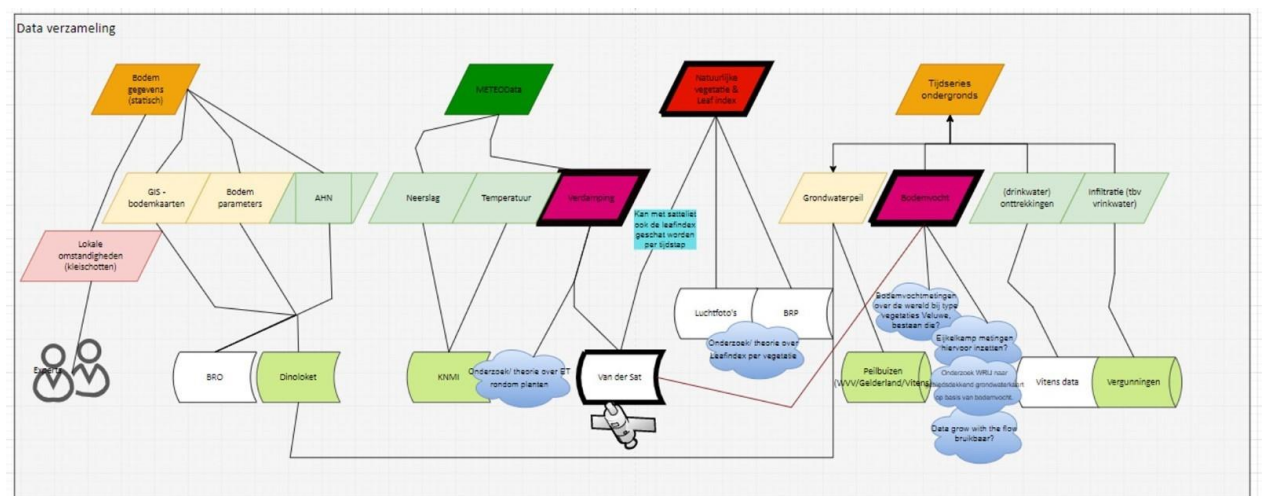
- Het verkrijgen van inzicht in de actuele situatie wat betreft oppervlaktewaterkwaliteit voor het hele watersysteem in een pilotgebied (zowel KRW-lichamen als overige wateren).
- Het relateren van de actuele situatie aan de hiervoor bepalende systeemkenmerken en processen, wat moet leiden tot een antwoord op de vraag 'waarom is het zoals het is?' en andere genoemde doelen (zie hoofdstuk 3) zijn afgeleiden van bovenstaande.

- Het verkrijgen van inzicht in de actuele en te verwachten droogtesituatie in een vooraf gedefinieerd pilotgebied tijdens het droogteseizoen en deze droogte kwantificeren en kwalificeren (oordeelsvorming).
- Het identificeren en in beeld brengen van achterliggende oorzaken in geval van ernstige droogte en aanvullende doelen (zie hoofdstuk 4) zijn afgeleiden van bovenstaande.

- Modelleer de effluent waterkwaliteit, uitgedrukt als COD, TN, TP en flow, als black box, ofwel datagedreven op basis van machinelearning (in vergelijking met white-boxmodellen zoals ASM, of grey-boxmodellen). Het betreft RWZI Ede (één zuiveringsstation, bestaande uit verschillende eenheden) met acht 'aanleverende' kanalen.

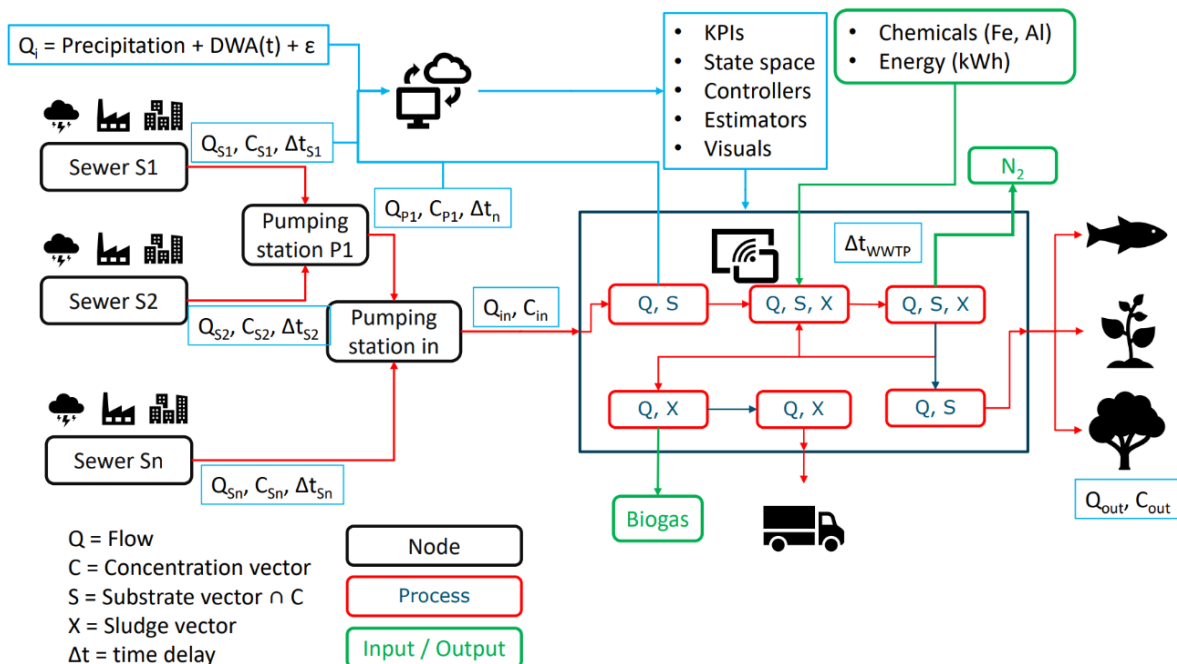
Droogte

Thema Droogte heeft de use cases omgezet naar DataFlow-diagrammen, zie Figuur 31 voor Waterschap Vallei en Veluwe en Bijlage 2 voor Waterschap Limburg.



Zuivering

Thema Zuivering heeft het systeem dat van toepassing is op de Use Case weergegeven in Figuur 15 en Figuur 32.



Figuur 32 Dataflow-diagram use case thema Waterzuivering.

Inventarisatie

Om overzicht te houden over de compleetheid van/balans in, maar vooral zeggingskracht van de inventarisatie (ofwel de volledige lijst met databronnen per thema), is in eerste instantie gezocht naar een eenvoudige manier om eigenschappen van de databronnen te aggregeren en tellen. Omdat de lijst als Excel-bestand beschikbaar is, kan dat met bestaande Excel-functionaliteit (formules en vooral draaitabellen). Dat kan leiden tot overzichtstabellen zoals Tabel 5.

Tabel 5 Voorbeeld van een overzichtstabel voor databronnen.

Eigenschap	Waarde	Aantal
Type Databron	Meting	10
	Model	8
	...	...
Onnauwkeurigheid meetapparatuur	Numeriek	6
	Range	2
	Afhankelijk van de methode	1
	...	...
	...	...

Daarmee kan vervolgens een rapport opgemaakt worden volgens een template zoals:

Voor thema <THEMA> bevat de lijst <#RIJEN> rijen, ingedeeld als <#M> Must have, <#S> Should have, <#C> Could have en <#W> Would have. Daarnaast zijn nog andere benamingen gebruikt, namelijk <hier aanvullen>. Voor de <#M> Must have rijen zijn bij <#BH> een Bronhouder waarde, en bij <#DB> een Databron waarde ingevuld.

Bij de eerste iteraties van de inventarisatie zijn veel databronnen en daarbij behorende parameters benoemd die in theorie van toepassing zijn. Dat leverde enorme lijsten op. Achteraf bleek dat het aantal databronnen flink was overschat. In de praktijk wordt namelijk slechts een klein(er) aantal gebruikt, en zijn tevens niet voor alle parameters daarvan data beschikbaar. Verder bleek gedurende de looptijd van het project dat veel databronnen niet relevant waren voor de van toepassing zijnde use case. De essentie van deze oefening was dan ook het doelgericht werken naar een relevant en zo compleet mogelijk aantal databronnen én parameters, passend bij de use case of, in bredere zin, bij de onderzoeksvraag. Immers, een overschot aan brondata en/of parameters wil niet automatisch zeggen dat daarmee een efficiënte en effectieve digital twin te bouwen is. Op deze manier werd de lijst steeds completer en compacter. Daardoor is het creëren van bovenstaande tabellen en rapporten achterwege gelaten. Als een cel in de lijst toch leeg is, dan was de beschikbaarheid van de waarde niet bekend, niet relevant of konden we die tijdens de looptijd van project niet achterhalen.

Datakwaliteit

Tussen het Brondatateam en het Dataverwerkingsteam is regelmatig overleg geweest. Vanuit het Brondatateam is ook input geleverd met betrekking tot enkele datakwaliteitsaspecten, met name compleetheid en het duiden van outliers. Met betrekking tot outliers is een suggestie gedaan voor verwerking daarvan. Omdat data van databronnen niet realtime geacquireerd werden en batchgewijs verwerkt, zijn datapreparatiestappen (voor missende waarden en outliers) door het Dataverwerkingsteam opgepakt (zie hoofdstuk 7).

Standaard

Een groot deel van de databronnen, zoals in de uiteindelijke lijsten aanwezig, is aangeleverd in AQUO-standaard. Die check is gedaan op aanwezig in de (Waterhuis)bibliotheek en of er XML-format voor aanwezig is. In de lijst is op basis daarvan de waarde 'Ja/Nee' ingevuld bij de AQUO-parameter kolom.

6.4 Conclusies, geleerde lessen

Allereerst worden de vier vragen uit paragraaf 6.1 beantwoord. Vervolgens wordt beargumenteerd of de doelen, die ook in paragraaf 6.1 staan, behaald zijn.

6.4.1 Conclusies

Welke data zijn aanwezig?

Voor de use cases die voor de thema's zijn opgesteld, zijn de volgende data aanwezig:

- Metadata, die voor de databronnen de parameters, ofwel eigenschappen beschrijven.
- Data, ofwel de databron zelf. Het betreft hier de verwijzing naar de bron die de ruwe, onbewerkte data kan leveren. Data zijn op verschillende manieren beschikbaar:
 - open database (ontsluitbaar via API-koppeling), met meetdata (sensor)
 - gestructureerd databestand (bijvoorbeeld Excel, CSV of Parquet), met meetdata (sensor)
 - als/uit een model

Welke data zijn noodzakelijk, maar ontbreken?

De theoretische inventarisaties bevatten de voor een thema potentieel inzetbare databronnen. Voor de use cases die voor de thema's zijn opgesteld, is een selectie gemaakt welke daarvan noodzakelijk zijn (voor deze praktijk casussen). Voor databronnen is het antwoord op de onderhavige vraag: geen. Voor vrijwel alle parameters of eigenschappen van de desbetreffende databronnen zijn waarden bekend. Echter, voor een aantal (cruciale) parameters ontbreken soms actuele waarden. Wat betreft data (waarden voor een specifieke parameter of eigenschap) is het antwoord op de onderhavige vraag:

- Meetfrequentie is vaak wel aanwezig, maar het is soms lastig te achterhalen of de waarde valide is.
- Onnauwkeurigheid meetapparaat, waarbij geldt:
 - als de databron een sensor is, is de waarde betreffende nauwkeurigheid ingevuld conform de specificatie van de sensor (leverancier). Echter, soms is de meetmethode (van/in de sensor, dus bijvoorbeeld colorimetrisch of potentiometrisch) niet vastgesteld. In dat geval zijn er meerdere waarden ingevuld (namelijk passend bij de mogelijke meetmethoden);

- als de bron een model is, is doorgaans geen waarde ingevuld. Vaak is namelijk geen maat voor de onnauwkeurigheid van dat gebruikte model bekend. Voor sommige modellen (die bijvoorbeeld meteodata opleveren) zou daar wel een schatting voor gemaakt kunnen worden;
- als de bron (iets) anders is, zoals een watersysteem, spelen er overige zaken (zoals geometrie).
- Bron (zie ook de eerste vraag), in de verschillende thema's worden verschillende databronnen aangesproken of op verschillende manieren ontsloten. Zuivering maakt bijvoorbeeld gebruik van Parquet-bestanden die gedownload worden van een (Historian) server. Droogte heeft diverse databronnen zelf ontsloten en in een Lizard/Azure omgeving ondergebracht. Die laatste wordt dan in feite de databron (als we tenminste de volgorde Brondata => Dataverwerking aanhouden).

In het algemeen geldt dat momenteel geen (gestandaardiseerde) validiteitcheck op de meetdata is/wordt uitgevoerd.

Zijn de data bruikbaar of zijn er nog bewerkingen nodig voor toepassing?

Tijdens de uitwerking van de use cases bleken veel data bruikbaar te zijn en enkele moesten nog bewerkt worden voor de toepassing. Deze bevindingen kwamen tot stand in overleg met de verdiepingsgroep Dataverwerking. Bewerken vond plaats voor:

- afstemmen van verschil in datum en tijdschaal (bijvoorbeeld uurwaarden aggregeren naar dagwaarden of synchroniseren/aanpassen naar aanleiding van zomer- dan wel wintertijdverschil);
- inpassen van verschillende meetfrequenties;
- controle op missende data (continu bijvoorbeeld door sensoruitval of incidenteel);
- controle op aansluiting van dataserie (zie bullet hierboven, kalibratieverschil etc.);
- controle op consistentie van de meting (bijvoorbeeld drift door slijtage of vervuiling meetapparaat);
- controle op validiteit.

In het algemeen geldt dat voor een vloeiende koppeling tussen brondata, dataverwerking en (dus) visualisatie gelijke tijdschalen, validiteit, digitale uitwisselbaarheid en procesgerichtheid (met betrekking tot use case/doel) essentieel zijn.

Kunnen data gecombineerd worden, zodat nieuwe, tot dan toe ontbrekende data ontstaan?

Tijdens het project is geen signalering geweest van ontbrekende data waarvoor data gecombineerd moesten worden voor het genereren van nieuwe data.

Overige bevindingen:

- Voor de meetdata worden verschillende validatieprotocollen gebruikt, wat kan leiden tot verschillen in de nauwkeurigheid van de valide data en verschillen in de trends van de meetreeksen.
- Veel waterschappen meten waterkwaliteit nog niet continu, maar discontinu met handmeters. Veelal is er eerst focus op continue metingen voor sturen van waterkwantiteit (waterafvoer/water bufferen).
- Continue meetpunten hebben veelal een goed bereik voor verzenden van data. In nabijheid van hoge gebouwen en bomen wil het mobiele zendsignaal weleens te wensen over laten. Daarnaast willen continue meetpunten bij hoogwater (bijv. buitendijks) weleens stilvallen met de dataverzending, doordat het modem onder water staat en het zendsignaal wegvalt. Het advies is om de zendapparatuur boven de hoogwaterlijn te plaatsen of een aantal contactloze meetpunten boven het water te plaatsen onder bruggen (bijvoorbeeld ultrasone of radar meetapparatuur voor waterstanden).

Hebben we daarmee ook de geformuleerde doelen, zoals die in het introductiehoofdstuk staan, bereikt?

- *Inventarisatie van welke data(bronnen en -stromen), waar beschikbaar zijn onder welke voorwaarden.* Gezien de opsplitsing in, en beschikbaarheid van een theoretische en praktische inventarisatie conform de use case en de afstemming daarover met de themagroepen en het Dataverwerkingsteam, is dit doel bereikt.
- *Inventarisatie van beschikbare dataformaten en hoe deze op elkaar aansluiten.* In de inventarisatie is een parameter of eigenschap aanwezig die als waarde het format van de data vastlegt. Echter, vanuit Brondata is niet verder onderzocht hoe verschillende formats op elkaar aansluiten. In de praktijk leest Dataverwerking ruwe data in en verzorgt daarbij tevens de omzetting, transformatie of andere

preparatiestappen die nodig zijn om de data gereed te maken voor modellering of andere verwerking. Dit doel is daarmee deels bereikt.

- *Vastleggen van resolutie en frequentie van data en eisen/randvoorwaarden van de digital twin voor het waterbeheer.* Vanuit de themagroepen (waarin de waterschappen vertegenwoordigd zijn) zijn vooraf geen specifieke eisen geformuleerd betreffende resolutie en frequentie. Meetfrequentie is (voorlopig) in de inventarisatie vastgelegd 'as is'. Als er wel eisen over bekend worden, kan vanzelfsprekend met het Brondatateam achterhaald worden of met de huidige databron kan worden voldaan aan die eis. Als dat niet het geval is, moet een passende(re) databron gezocht worden. Het verdient wel aanbeveling om deze eisen vast te stellen. Er kan dan namelijk een consistency-check worden ingebouwd (zie onder Datakwaliteit in paragraaf 6.2) waarbij de vereiste resolutie als constraint dient. Dit doel is strikt genomen niet behaald. Echter, de vraag is of de onderliggende taken volledig bij Brondata behoren. Een heldere scheiding zou zijn dat Brondata verantwoordelijk is voor het vastleggen van de eisen (en dus invoeren van een specifieke kolom in de inventarisatie), maar de implementatie van de consistency-check elders belegd wordt.
- *Verwerken van ruwe data naar bruikbare gegevens (inclusief het vastleggen van welke stappen nodig zijn en welke stappen buiten het verdiepingsthema Brondata vallen).* Gedurende het project kwam duidelijk naar voren dat Brondata verantwoordelijk is voor het beheer van de inventarisatie van databronnen (inclusief alle bijbehorende data). Zodra echter ruwe data uit zo'n bron verwerkt moeten worden, valt de onderliggende activiteit onder Dataverwerking. Dat is ook het meest logisch, omdat de verwerking (voorlopig) veelal use case specifiek is. In de praktijk is gebleken dat dit een werkbare scheiding van verantwoordelijkheden is. Dataverwerking documenteert ook alle verwerkingsstappen die men uitvoert. Daarmee is dit doel behaald.

6.4.2 Aanbevelingen en geleerde lessen

In de conclusie kwamen diverse aanknopingspunten voor aanbevelingen naar voren:

- Data-uitwisseling moet voldoen aan wet- en regelgeving voor behoud van privacy en cyberveiligheid.
- Zorg bij verschil in validatieprotocollen voor verschillende datastromen voor standaardisatie van de validatie.
- Zorg dat bij gebruik van modellen de ontbrekende onnauwkeurigheden worden ingevuld.
- Maak afspraken over het managen van de brondata en het opzetten van de juiste infrastructuur (bijv. opslag, bereikbaarheid).
- Zorg voor continue levering van de brondata, inhoudend dat ook rekening moet worden gehouden met een stabiele omgeving voor dataverzameling (bijv. meetpunt, database, ...).
- Uitwisseling brondata met andere waterschappen en buurlanden is een uitdaging, omdat gewerkt wordt met andere datasystemen. Het is essentieel om dit nader af te stemmen met waterschappen en buurlanden België en Duitsland.

Daarnaast heeft de Brondata diverse geleerde lessen geïnventariseerd:

Uitdagingen

- Hoe effectief/efficiënt starten? We zijn 'groot' begonnen door per thema zoveel als kon bekende, mogelijke databronnen in een lijst te zetten. Achteraf gezien hadden we beter 'klein' kunnen beginnen. Uitgaande van een vastgesteld systeemdiagram (dit is er daadwerkelijk beschikbaar/aanwezig), met een heel simpele use case, met databronnen waarvan waarden voor attributen of direct inzichtelijk waren, of makkelijk opvraagbaar. Op die manier hadden we iteratief (agile) de databronnenlijst kunnen opbouwen, in plaats van via prioritering afbouwen, zoals we nu gedaan hebben. Dat geldt ook voor de lijst met attributen. In feite hadden we die ook iteratief kunnen opbouwen (prioritering). Nu is er namelijk best veel tijd besteed aan attributen die als geheel onduidelijk zijn/blijven (zoals standaarden).
 - Voor de gebruikte methode (groot beginnen) hebben we als leidraad per thema een concrete use case gevraagd, inclusief een systeemdiagram en aan de hand van die use case een prioritering van databronnen opgesteld (MoSCoW-methode). Dat proces verliep moeizaam, omdat het vaststellen van de attributen (onnauwkeurigheid meetinstrument, meetfrequentie etc.) tot heel veel discussie leidde. Het invullen van concrete waarden voor die attributen vergde veel tijd. Dat kwam onder meer omdat er vaak wel een databron ingevuld was (een sensor die X meet bij Waterschap Y, bijvoorbeeld), maar niet

concreet hoe de meting werd verricht, waardoor andere attributen niet ingevuld konden worden. Dat vergde ofwel navraag (bij wie, was dan vaak de vraag), of op locatie gaan kijken.

- o Iets anders waar moeilijk grip op te krijgen was/is: worden data nu 'geleverd' door een sensor of komt het uit een model? Voor beide geldt dan weer: lezen/ontvangen we die data dan direct ('uit' de bron) of indirect via een server/service/API/broker/database/...? En bij het laatste kun je je afvragen of dat dan lokaal is (op de RWZI bijvoorbeeld) of centraal ('het web', Lizard etc.)? M.a.w. het concept van bron in brondata is lastig te vatten.

Kansen

- De samenwerking met dataverwerking heeft veel opgeleverd (wie doet wat, waar ligt welke verantwoordelijkheid, wat zien we nu echt in die data, wat gaat er wanneer wel/niet goed etc. En de rechtstreekse terugkoppeling daarvan naar de prioritering van databronnen en attributen). Een vergelijkbare intensieve samenwerking is sterk aan te raden, niet alleen met dataverwerkers (datascientists, modelleurs), maar ook met dashboard-ontwerpers en bouwers. Dit helpt om dataverzameling en dataverwerking af te stemmen op beslissingsondersteuning.
- Een andere kans is er op het gebied van standaarden. Wanneer inventarisatielijsten van data geprioriteerd, volledig en eenduidig zijn, is het een goed moment om te kijken of het voldoet aan een passende of noodzakelijke standaard. Immers, voor een specialist op het gebied van standaarden is het ondoenlijk om van tevoren helder te krijgen welke standaarden van toepassing zijn. Maar met de genoemde inventarisatielijst wordt dat voor die specialist makkelijker. Inmiddels is voor de thema's droogte, waterkwaliteit en waterzuivering enigszins duidelijk hoe de lijntjes lopen binnen standaardland en wie daar specialisten zijn die kunnen worden ingezet. Als dat proces eenmaal gelopen is, hebben we een bouwsteen die generiek(er) inzetbaar is.

7 Verdieping dataverwerking

7.1 Inleiding

De verdiepingsgroep Dataverwerking ging aan de slag met vragen vanuit de thema's. In de volgende paragrafen wordt beschreven aan welke vraagstukken de verdiepingsgroep Dataverwerking heeft gewerkt en wordt de technische oplossing beschreven. De technische oplossing bestaat uit verwachtingsmodules, gekoppeld aan verleden-tijd-datastromen. Een verwachtingsmodule geeft een toekomstige verwachting van een variabele (bijvoorbeeld grondwaterstand), gegeven een weersverwachting. Een verwachting die is gegenereerd met een verwachtingsmodule kan bijvoorbeeld worden gebruikt om besluiten te nemen, zoals het sluiten van dammen of het maaien van flora.

De verwachtingsmodules die zijn ontwikkeld, genereren alle een verwachting (tijdreeks) voor één locatie. De modules zijn echter zo opgezet dat het relatief gemakkelijk is deze te gebruiken voor andere locaties. De interactie tussen verschillende locaties wordt niet direct gemodelleerd.

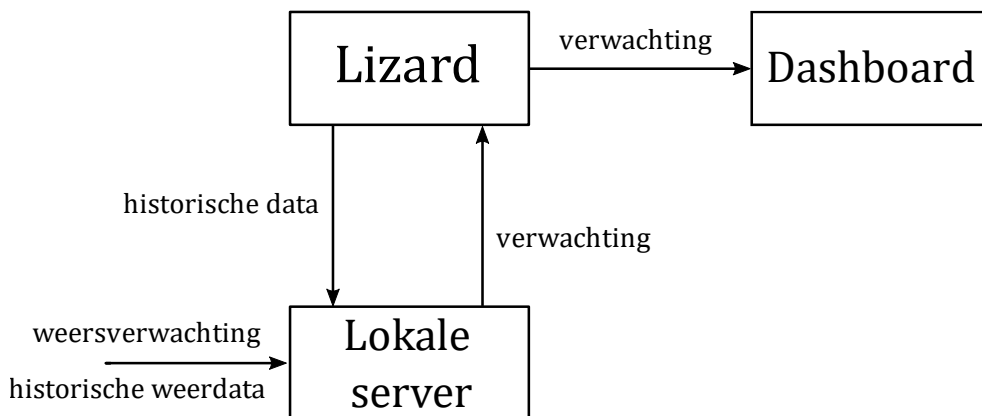
Een aantal van de verwachtingsmodules bestaat uit twee sub-modellen: 1) fysisch procesmodel en 2) een machinelearning-model. Het fysisch procesmodel is een bestaand model uit de literatuur en is bekend in het veld. Het PIRfict-model dat is geïmplementeerd in de PASTAS-software (Collenteur et al., 2019) is hier een voorbeeld van. Aanvullend is er een machinelearning-model toegevoegd om de verwachtingsfout tussen het procesmodel en de gemeten werkelijkheid te verkleinen. Dit wordt verder uitgewerkt/uitgelegd in volgende paragrafen.

Alle ontwikkelde verwachtingsmodules zijn deterministisch. Dat wil zeggen dat de gegenereerde verwachting één verwachting (tijdreeks) is. Men kan dit zien als een gemiddelde verwachting, een 'best estimate'. De daar omliggende onzekerheid (variantie) is nog niet meegenomen in de verwachting. Het is echter wel van belang om dit in de toekomst te doen, omdat:

- je bij een gemiddelde (best estimate, deterministische voorspelling) de extremen mist, het is eigenlijk de lijn die tussen de waarnemingen door is gefit;
- je daarmee geen risicoanalyses kunt uitvoeren, je mist immers de extremen en juist in die extreme situaties zijn de effecten het grootst.

Ook hier geldt weer dat het kwantificeren van onzekerheid relatief gemakkelijk te realiseren is met de huidige opzet van de modules. Bijvoorbeeld, men kan in plaats van één verwachting op basis van één weersverwachting meerdere verwachtingen genereren op basis van een ensemble aan weersverwachtingen. Dit kan door met een module meerdere verwachtingen te genereren, elk voor een ensemble member uit de ensemble van weersverwachtingen. Daar kunnen dan weer de realisaties bij worden opgeteld die zijn gegenereerd met de ruiscomponent van het tijdreeksmodel. Dit is een voorbeeld, maar vele andere opties zijn mogelijk. In hoofdstuk 8 (Verdieping Visualisatie en Besluitvorming) is hier een aantal voorbeelden van te zien.

De verwachtingsmodules voor Waterschap Limburg en Waterschap Vallei en Veluwe zijn online geïmplementeerd. Dat wil zeggen dat elke dag verledentijd-data worden gebruikt om de module te (her)kalibreren. Dit houdt dus in dat een verandering in het klimaat langzaam wordt meegenomen door deze online verwachtingsmodules. Figuur 33 geeft een online verwachtingsmodule weer.



Figuur 33 Blokschema van een online verwachtingsmodule. Een lokale server wordt gebruikt om weersverwachtingen op te halen en vervolgens verwachtingen te genereren met de module. De lokale server haalt ook historische data op vanuit Lizard (externe server) om de verwachtingsmodule te (her)kalibreren. De verwachting zelf wordt vanuit de lokale server naar Lizard en een dashboard gestuurd. Hier wordt de verwachting gevisualiseerd. Historische (weer)data en voorspellingen kunnen natuurlijk ook worden gevisualiseerd in het dashboard.

7.2 Thema Droogte, Waterschap Limburg

7.2.1 Inleiding

De verdiepingsgroep Dataverwerking is bezig geweest met twee vraagstukken uit het thema Droogte in Waterschap Limburg:

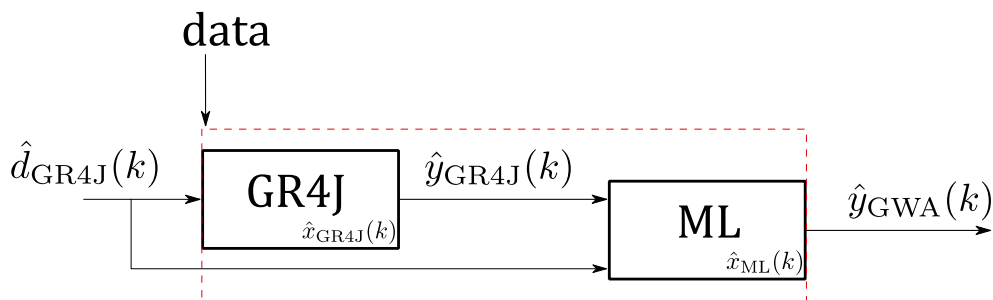
1. Hoe op één locatie de verwachte grondwaterafvoer te simuleren met behulp van een model dat is gekoppeld aan data?
2. Hoe op één locatie de verwachte grondwaterstand te simuleren met behulp van een model dat is gekoppeld aan data?

Voor beide vraagstukken is een soortgelijke methode toegepast. Elke verwachting wordt gedaan door een mechanistisch model te combineren met een machinelearning-model en deze te koppelen aan een datastroom, zodat de verwachtingsmodule is gesynchroniseerd met de recentste metingen. Beide vraagstukken en technische oplossingen worden in het navolgende gedetailleerd beschreven. De verwachtingsmodules zijn beide te vinden via [Droogte WL \(lizard.net\)](http://Droogte WL (lizard.net)).

7.2.2 Aanpak

Verwachtingsmodule voor grondwaterafvoer

Het blokschema in Figuur 34 geeft de technisch aangedragen oplossing schematisch weer. Deze voorspelmodule verzorgt een grondwaterafvoerverwachting door een mechanistisch model (GR4J (Perrin e.a., 2003)) en XGBoost machinelearning-model ([xgboost · PyPI](https://xgboost.ai), [dmlc/xgboost: Scalable, Portable and Distributed Gradient Boosting \(GBDT, GBRT or GBM\) Library, for Python, R, Java, Scala, C++ and more.](https://dmlc/xgboost) [Runs on single machine, Hadoop, Spark, Dask, Flink and DataFlow \(github.com\)](https://github.com/dmlc/xgboost)) te combineren.

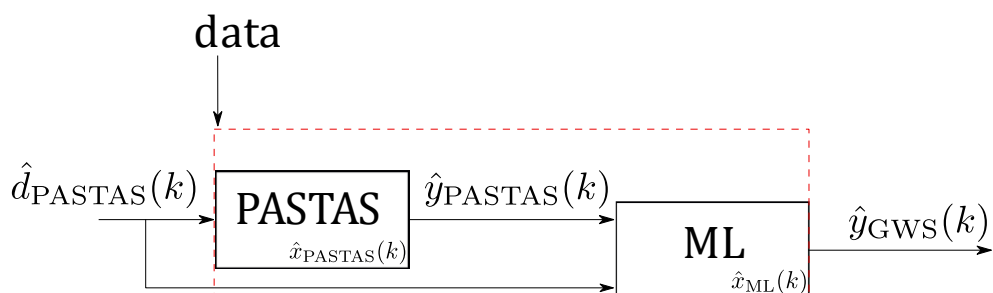


Figuur 34 Verwachtingsmodule dat de grondwaterafvoer voorspelt en bestaat uit een mechanistisch model (GR4J) en een machinelearning (ML-)model. Het ML-model wordt realtime gekalibreerd met behulp van een continue datastroom. De toekomstige neerslag- en verdamping $\hat{d}_{GR4J}(k)$ zijn vereist in het GR4J-model.

De uiteindelijke grondwaterafvoerschatting $\hat{y}_{GWA}(k)$ is gebaseerd op combinatie van het GR4J-model en het machinelearning-model. Deze laatste vult de in het GR4J missende dynamica aan om zo de voorspelling te verbeteren. Het ML-model is gekoppeld aan een datastroom om zo gesynchroniseerd te blijven met nieuw gemeten data (dus nieuwe situaties). Met behulp van de neerslag- en verdampingsverwachting $\hat{d}_{GR4J}(k)$ kunnen verschillende scenario's worden doorgerekend. Het model is deterministisch, de afwijkingen tussen het model en de waarnemingen zijn niet gemodelleerd en worden niet benut om de nauwkeurigheid van modelvoorspellingen te kwantificeren.

Verwachtingsmodule voor grondwaterstand

Figuur 35 geeft de technisch aangedragen oplossing schematisch weer. Deze voorspelmodule verzorgt een grondwaterstandverwachting door een mechanistisch model (PASTAS) en een ML-model te combineren.



Figuur 35 Verwachtingsmodule dat de grondwaterstand voorspelt, bestaande uit een mechanistisch model (PASTAS) en een ML-model. Het machinelearning model wordt realtime gekalibreerd met behulp van een continue datastroom. De toekomstige neerslag en verdamping $\hat{d}_{PASTAS}(k)$ zijn vereist in het PASTAS-model.

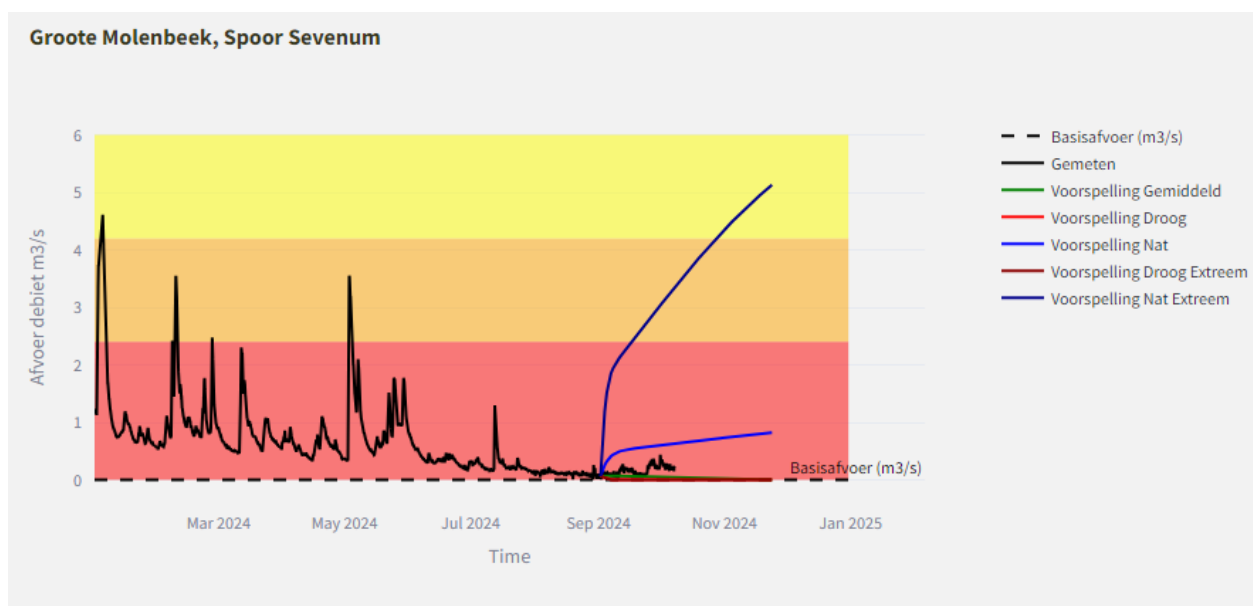
De uiteindelijke grondwaterstandschatting $\hat{y}_{GWS}(k)$ is gebaseerd op combinatie van het PASTAS-model en het ML-model. Laatstgenoemde vult de in het PASTAS-model missende dynamica aan om zo de voorspelling te verbeteren. Het ML-model is gekoppeld aan een datastroom om zo gesynchroniseerd te blijven met nieuw gemeten data (dus nieuwe situaties). Met behulp van de neerslag- en verdampingsverwachting $\hat{d}_{PASTAS}(k)$ kunnen verschillende scenario's worden doorgerekend. Evenals het model voor afvoeren is het model voor grondwaterstanden deterministisch, de afwijkingen tussen het model en de waarnemingen zijn niet gemodelleerd en worden niet benut om de nauwkeurigheid van modelvoorspellingen te kwantificeren.

7.2.3 Resultaten

Verwachtingsmodule voor grondwaterafvoer

De weersvoorspellingen van het KNMI worden verondersteld betrouwbaar te zijn tot twee weken in de toekomst. Omdat de gewenste voorspellingsperiode twaalf weken is, zijn er verschillende scenario's bedacht die gebruikmaken van historische neerslag. De twee extreme scenario's zijn gebaseerd op het 90^e en

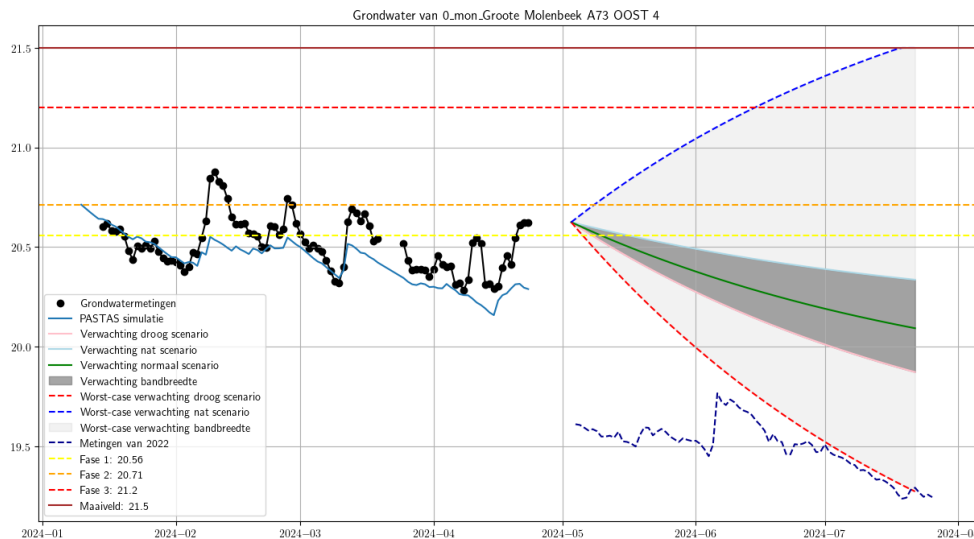
10^e percentiel van elke dag in de te voorspellen periode. Dit resulteert in een scenario waar het elke dag regent volgens het 90^e percentiel op die dag, waardoor je een onrealistisch scenario krijgt waarin het twaalf weken lang elke dag veel regent. Voor het 10^e percentiel geldt dit andersom, twaalf weken met geen tot bijna geen regen. Verder zijn er drie andere scenario's bedacht: droog, normaal en een nat scenario. Hiervoor worden nu de percentielen van de totale voorspelperiode (twaalf weken) gepakt. Dit wordt vervolgens 'uitgesmeerd' over alle dagen in de periode. Dus bij deze scenario's hebben alle dagen dezelfde neerslag en verdamping. Houd er wel rekening mee dat het mogelijk is om elk gewenst scenario door te rekenen middels het aanbieden van verschillende neerslag- en verdampingsverwachtingen. Het is wel van belang om de validiteit van de verwachtingsmodule in acht te nemen. Als er zeer extreme scenario's (neerslag- en verdampingsverwachtingen) worden aangeboden aan de module, dan kan deze niet-realistische verwachtingen geven, omdat de module niet is getraind op deze extreme scenario's. Elke dag wordt er een nieuwe verwachting gegenereerd door de verwachtingsmodule en wordt ook het ML-model geüpdatet middels historische data. Figuur 36 toont een voorbeeldvoorspelling en bijhorende scenario's.



Figuur 36 Voorbeeld van een grondwaterafvoervoorstelling met bijhorende scenario's. Dergelijke voorspellingen worden elke dag opnieuw gegenereerd.

Verwachtingsmodule voor grondwaterstand

Net als bij de vorige verwachtingsmodule kan de weersverwachting van het KNMI niet worden gebruikt. Dezelfde scenario's als eerder beschreven in de grondwaterafvoer-verwachtingsmodule worden in deze verwachtingsmodule ook gebruikt, en ook hier voorziet de verwachtingsmodule de gebruiker elke dag van een nieuwe grondwaterstandverwachting. Figuur 37 toont een voorbeeldverwachting en bijhorende scenario's voor een specifieke locatie (Groote Molenbeek).



Figuur 37 Voorbeeld van een grondwatervoorspelling met bijhorende scenario's. Dergelijke voorspellingen worden elke dag opnieuw gegenereerd. Deze figuur laat duidelijk het verschil tussen waargenomen grondwaterstand (zwarte bolletjes) en gemodelleerde grondwaterstand (blauwe lijn) zien. De voorspellingen zijn echter alleen gebaseerd op het model. De onzekerheid kan worden gekwantificeerd uit de verschillen tussen zwarte bolletjes en blauwe lijn. Vervolgens kunnen daarmee 95%-voorspellingsintervallen rond de voorspellingen worden geconstrueerd.

7.2.4 Aanbevelingen en conclusies

Voor het thema Droogte (Limburg) zijn twee verwachtingsmodules ontworpen. De verwachtingen worden weergegeven in een online dashboard. Door elke dag de module te her-kalibreren (her-traineren), blijft deze up-to-date met de laatst gemeten data. Dit houdt in dat veranderingen in het klimaat gedeeltelijk worden meegenomen in de verwachtingsmodule. De volgende aanbevelingen worden meegegeven:

- De modules geven een deterministische verwachting, ook al is het duidelijk dat er onzekerheid aanwezig is in de applicatie. De verdiepingsgroep Dataverwerking heeft de modules ook onzekerheid laten berekenen (zie hoofdstuk 8), maar dit is nog niet geïmplementeerd in het dashboard. Het is van belang om dit in de toekomst wel te doen.
- Een decision tree (ML-model) wordt op het moment gebruikt ter aanvulling op een procesmodel (PASTAS of GR4J). Het is de moeite waard om te onderzoeken of andere type ML-modellen (bijvoorbeeld een recurrent neural network) een betere verwachting kunnen leveren.
- Het is goed om andere scenario's te onderzoeken (naast de huidig aanwezige droog, nat en normaal scenario). Bijvoorbeeld, meerdere verschillende historische weertijdreeksen kunnen gebruikt worden om bijhorende verwachtingen te genereren. Er zijn dan meerdere verwachtingen waar een gemiddelde en betrouwbaarheidsintervallen uit bepaald kunnen worden. Het voordeel van deze methode is dat het ML-model alleen realistisch weer aangeboden krijgt en geen artificieel weer. Dit laatste kan namelijk een uitdaging zijn voor een ML-model, omdat deze niet heel goed kan extrapoleren.
- Verwachtingen kunnen worden gegenereerd voor verschillende locaties. De volgende stap is om tussen de locaties (dus waar geen metingen worden gedaan) een verwachting te genereren. Dit kan met behulp van een extrapolatiealgoritme voor ruimtelijke interpolatie dat opgenomen moet worden in de module.

7.3 Thema droogte: Vallei en Veluwe

7.3.1 Inleiding

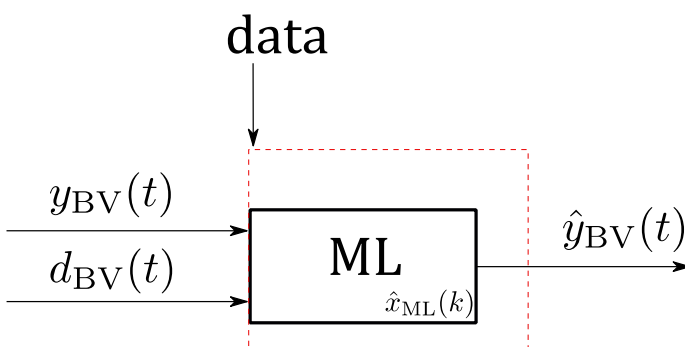
De verdiepingsgroep Dataverwerking is bezig geweest met één vraagstuk uit het thema Droogte in Waterschap Vallei en Veluwe:

1. Hoe een verbeterde bodemvochtverwachting te verkrijgen met behulp van een machinelearning model?

Het ontwikkelde dashboard is te vinden via de volgende link: [Droogte WVV \(lizard.net\)](https://lizard.net).

7.3.2 Aanpak

Het blokschema in Figuur 38 geeft de aangedragen technische oplossing schematisch weer. Deze voorspelmodule verzorgt een stochastische bodemvochtverwachting met behulp van een machinelearning-model.



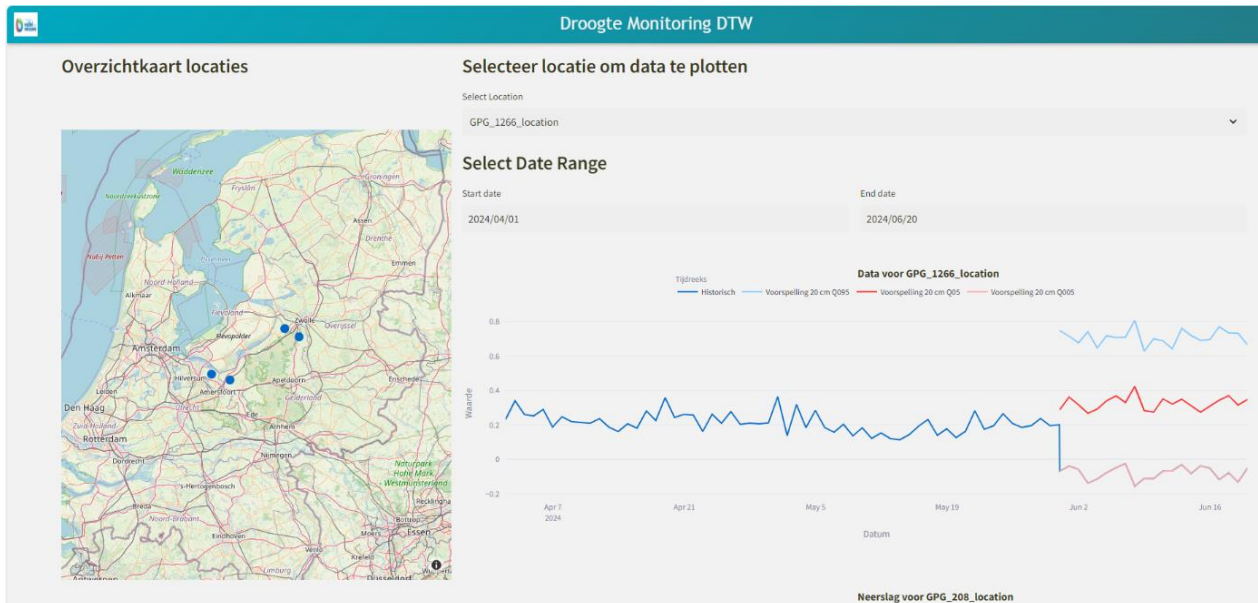
Figuur 38 Verwachtingsmodule die het bodemvocht voorspelt $\hat{y}_{BV}(t)$ met behulp van een machinelearning (ML-)model. De inputs naar het machinelearning-model zijn historische data van bodemvocht $y_{BV}(t)$ en historische meteodata, zoals regenval, radiatie, temperatuur die samen als $d_{BV}(t)$ worden beschreven. Het ML-model wordt realtime gekalibreerd met behulp van een continue datastroom.

De voorspelmodule heeft als inputs de historische data (30 dagen terug) van bodemvocht $y_{BV}(t)$ en historische meteodata, zoals regenval, radiatie, temperatuur die samen wordt beschreven door de variabele $d_{BV}(t)$. Hoe ver de bodemvochtvoorspelling $\hat{y}_{BV}(t)$ wordt gemaakt, is ingesteld als een variabele. De standaardwaarde is hier drie weken vooruit. Verder kan er een bodemvochtvoorspelling worden gedaan voor verschillende diepten zoals 5 cm en 20 cm. De bodemvochtvoorspelling op 20 cm diepte wordt weergegeven in het huidige dashboard.

De toolbox Darts ([Probabilistic Forecasting in Darts | by Francesco Lässig | Unit8 - Big Data & AI | Medium](#)) wordt in Python gebruikt om het ML-model te trainen. Hier is het vooral interessant om te benoemen dat het getrainde model een stochastisch model is. Dat wil zeggen dat er een distributie met bijhorende gemiddelde en standaarddeviatie wordt getraind wat de bodemvocht verwachting parametrizeert. Met andere woorden, het getrainde machinelearning-model houdt rekening met variantie in de verledentijddata en gebruikt dit om een (onzekere) voorspelling te genereren. Er kunnen dus naast een gemiddelde verwachting van het bodemvocht ook kwantilen worden bepaald/weergegeven, zoals te zien is in het dashboard.

7.3.3 Resultaten

De verwachtingsmodule geeft geen verwachting voor verschillende scenario's, maar plot het 5^e en 95^e percentiel zoals te zien is in Figuur 39.



Figuur 39 Voorbeeld van een gemiddelde bodemvochtverwachting (rood) met bijhorende 5^e en 95^e percentiel, lichtrood en lichtblauw, respectievelijk. Al deze drie verwachtingen komen dus van een (stochastisch) ML-model. De historische bodemvochtrees wordt weergegeven met de donkerblauwe lijn. Verder geven de vier blauwe bolletjes in de linker landkaart de locaties weer waarvoor een bodemvochtvoorspelling kan worden gedaan.

7.3.4 Aanbevelingen en conclusies

Voor het thema Droogte bij Waterschap Vallei en Veluwe is één verwachtingsmodule ontworpen. Het ML-model in de module is een stochastisch model. Hierdoor is het mogelijk om ook onzekerheid mee te nemen uit het verleden in de gegenereerde verwachting. De verwachtingen worden weergegeven in een online dashboard. De volgende aanbevelingen worden meegegeven:

- Het initiële idee was om een fysisch procesmodel samen met een ML-model te gebruiken om een verwachting te genereren. Door technische problemen is het fysisch procesmodel uiteindelijk uit de module gehaald. Echter is het aan te raden een combinatie van fysisch procesmodel en ML-model te hebben. Hierdoor gebruik je de kennis die zit opgeslagen in een fysisch procesmodel en vul je missende dynamica aan met een ML-model.
- Het model is op het moment gekoppeld aan .csv-bestanden en niet aan een server met historische data. Deze koppeling moet worden gemaakt.
- Op vier verschillende locaties kan een verwachting worden gegenereerd. Dit aantal locaties moet worden uitgebreid om een beter ruimtelijk beeld te krijgen.
- Naast het uitbreiden van het aantal locaties is het ook belangrijk om de verwachtingen te extrapoleren naar locaties waar geen metingen zijn gedaan, dat wil zeggen, waar geen verwachtingen voor worden gegenereerd. Een dergelijk extrapolatiealgoritme moet in de module worden opgenomen.

7.4 Thema Zuivering

7.4.1 Inleiding

De verdiepingsgroep Dataverwerking heeft geadviseerd bij het beantwoorden van drie vraagstukken uit het thema Zuivering.

1. Hoe het verwachte inkomende debiet naar de waterzuivering te simuleren, gegeven de regenval op verschillende locaties rondom de waterzuivering?
2. Hoe de verwachte waterkwaliteit in de waterzuivering te simuleren?
3. Hoe de verwachte waterkwaliteit in het effluent van de waterzuivering te simuleren?

De geïnteresseerde lezer wordt verwezen naar hoofdstuk 5 (Thema Zuivering) voor een beschrijving van de ontwikkelde voorspelmodules. Het thema Zuivering heeft de modules zelf ontwikkeld en de verdiepingsgroep heeft tijdens dit proces ondersteuning geboden.

7.5 Gitlab

Alle ontwikkelde codes zijn te vinden in de Github repository van Het Waterschapshuis dat is aangemaakt voor dit project. Deze repository is te vinden via de volgende link: [Digital Twin voor Waterbeheer · GitLab](#). De administrator van deze repository kan worden gevraagd om toegang via winnovatie@hetwaterschapshuis.nl.

7.6 Conclusies, geleerde lessen

De gepresenteerde verwachtingsmodules moeten worden gezien als initiële modules (prototypes). Er kunnen nog verschillende mogelijke verbeterpunten worden onderzocht. De volgens ons interessantste verbeterpunten zijn:

- Onderzocht moet worden of andere type modellen de verwachting verbeteren.
- Een aantal voorbeelden van onzekere voorspellingen zijn gemaakt en gepresenteerd in hoofdstuk 8. Het kwantificeren van de onzekerheid rond de verwachting is kort onderzocht, maar behoeft meer onderzoek.

Tijdens het project zijn er vele lessen geleerd, hieronder de belangrijkste:

1. Het is super leerzaam om met verschillende bedrijven/organisaties/personen samen te werken. Hierdoor leer je van elkaar.
2. Een R&D-project als dit digital-twin-project moet niet van bovenaf worden gestuurd. Het is aan te raden om met een aantal programmeurs en een groepsleider aan de slag te gaan om zo een initiële voorspelmodule (digital twin) te ontwikkelen. Daarna kan dit met managers/bestuurders worden besproken voor feedback/aanvullingen/vervolg. Er is dan iets tastbaars om over te praten.
3. Meestal bestaat een project uit het genereren en formaliseren van een idee om het vervolgens concreet uit te werken. Voor dit laatste waren er te weinig dataspecialisten (d.w.z. programmeurs) aanwezig in het project en ging het hier tijdens de meetings te weinig over.
4. Het was lastig voor programmeurs om enthousiast te blijven voor het project door de vele 'algemene' meetings. Te weinig concrete actiepunten werden besproken die zouden moeten resulteren in een digital twin (verwachtingsmodules).
5. De beschikbare uren waren verdeeld over een te grote groep personen. Op die manier verliest een project al snel prioriteit, maar wordt het meer iets van wat erbij gedaan gaat worden naast andere projecten.

8 Verdieping visualisatie en besluitvorming

8.1 Inleiding

De verdiepingsgroep Visualisatie en Besluitvorming heeft zich in dit project twee doelen gesteld. Het eerste doel is het onderzoeken van de rol van digital twins in het besluitvormingsproces in het waterbeheer. Het tweede is het ontwikkelen van visualisatieconcepten voor digital twins voor het waterbeheer en prototypes voor de pilot twins. Hierbij zou de verdiepingsgroep richtlijnen, best practices en strategieën ter ondersteuning van ontwikkelaars van digital twin-visualisaties in het waterdomein formuleren om tot visualisaties te komen die in de organisaties effectief kunnen worden toegepast in de verschillende processen, met name in besluitvorming.

Belangrijke uitgangspunten daarbij zijn:

- de informatiebehoefte van de gebruikers:
 - het aanbieden van 'actionable knowledge' (bruikbare en toepasbare kennis);
 - aansluiting met de workflow en bestaande instrumenten van de organisaties;
 - het onderkennen van verschillen tussen de gebruikersgroepen in het waterschap;
 - weergave van onzekerheid;
- technische aspecten, zoals
 - performance;
 - integratie van realtime data;
 - eisen aan datakwaliteit;
 - de inpassing in de IT-omgeving van de organisatie;
- het ontwerp- en ontwikkelproces:
 - uitgaand van user-centered design principes van softwareontwikkeling, waaronder het ontwikkelen en testen van prototypes. Het betrekken van beoogde gebruikers vanaf het begin van ontwikkeling is essentieel om helderheid te krijgen over de vraagstelling van de waterschappen en verwachtingen ten aanzien van de digital twin.

Hoewel het doel van de digital twin het leveren van betrouwbare informatie voor besluitvorming is, moeten we ons bewust zijn van de inherente onzekerheden die altijd aanwezig zullen zijn in zowel de data als de modellen. Omdat er niet foutloos en uitputtend wordt gemeten en omdat modelveronderstellingen moeten worden gemaakt, is er onzekerheid. Het helpt echter wel als we weten hoe nauwkeurig een model de fysieke werkelijkheid weergeeft, oftewel hoe onzeker we zijn over de data en de modeluitkomsten. Met statistiek is deze onzekerheid te kwantificeren. Naast deze kwantificeerbare onzekerheid zijn er ook niet-kwantificeerbare onzekerheden of diepe onzekerheden. Gebruikers van data en modellen, en dus ook van digital twins, zullen altijd met onzekerheid te maken hebben en kunnen daar op verschillende manieren mee omgaan bij besluitvorming.

8.2 Aanpak

8.2.1 Gebruikersperspectief

Om de digital twin aan te laten sluiten bij de informatiebehoeften van de gebruikers, heeft de verdiepingsgroep gewerkt vanuit een gebruikersperspectief (user-centered, zie Abras et al., 2004) in plaats van een 'data-driven' aanpak. Een 'data-driven' aanpak wordt vaak gehanteerd in projecten in een voornamelijk technische omgeving. Door user-centered design technieken te gebruiken, hebben we al vanaf het begin van het project ondersteuning geboden om de specifieke casussen te helpen bepalen. Daarbij stond de vraag centraal welke informatie het meest bijdraagt aan de planning en besluitvorming in de organisatie voor het gekozen vraagstuk.

Vanaf de eerste fasen van het project zijn er workshops georganiseerd met projectvertegenwoordigers van de waterschappen om de beoogde gebruikers van de digital twin te identificeren, te onderzoeken welke vragen zij met de digital twin willen beantwoorden, welke besluitvormings- of planningsprocessen daarbij horen, welke informatie daarvoor nodig is en aan welke eisen de data moeten voldoen. Naast data-eisen zijn ook eisen opgesteld voor de functionaliteit van de interface en visualisatie.

8.2.2 Requirementsanalyse en ontwerp

Tot de user-centered ontwikkelstrategieën die zijn toegepast in dit project behoren workshops met representatieve gebruikers, waarin (gebruikers)eisen (requirements) wat betreft visualisatie en functionaliteit voor de interface van de digital twin zijn geïnventariseerd. Deze zijn verwerkt in ontwerpschetsen en samen met de gebruikers en softwareontwikkelaars verder uitgewerkt. De workshops zijn zowel online als fysiek, op locatie van de waterschappen, uitgevoerd.

Voorafgaand aan de workshops zijn enkele gebruikersscenario's geformuleerd, die belangrijke vragen of opgaven over de thema's droogte, waterkwaliteit en waterzuivering in de waterschappen vertegenwoordigen. Een gebruikersscenario beschrijft een concrete vraag van een representatieve gebruiker, die met behulp van de te ontwikkelen digital twin op zoek gaat naar een antwoord of oplossing. In de workshops bespraken de deelnemers hoe zij die vragen willen beantwoorden door verschillende data te beoordelen, met andere data te vergelijken of verder te analyseren. De workshops leidden tot verslagen waarin requirements ten aanzien van data, functionaliteit en visualisatie zijn beschreven en tot schetsen en voorbeelden van mogelijke dashboards.

8.2.3 Besluitvorming en visualiseren van onzekerheid

Om een beeld te krijgen van de wijze waarop onzekerheid moet worden gevisualiseerd, moet eerst duidelijk zijn hoe gebruikers van de digital twin nu omgaan, en in de toekomst om zouden kunnen gaan, met onzekerheid bij besluitvorming. Daarom hebben betrokkenen van het project en externe deskundigen in oktober 2023 hierover in een workshop 'Besluitvorming met Digital Twins' gesproken.

Een tweede workshop, nu voor projectleden, vond plaats in september 2024, met als doel een antwoord te vinden op de vraag: hoe kwantificeren en visualiseren we onzekerheid in de digital twin voor het Waterbeheer? Vertrekpunt van deze workshop waren de resultaten van de workshop over besluitvorming in oktober 2023. Aan de hand van een concreet voorbeeld waarin gekwantificeerde onzekerheid op verschillende manieren is gevisualiseerd werd nagedacht over de vraag "Is doelmatige besluitvorming mogelijk zonder risicoanalyse?", waarna gediscussieerd werd over de vraag "Hoe kwantificeren en visualiseren we onzekerheid in de digital twin voor het Waterbeheer?" Tot slot kregen de deelnemers aan de workshop een uur de tijd om hun antwoorden op deze vraag en hun reflecties op benutting van kennis over onzekerheid bij besluitvorming op schrift te stellen.

8.2.4 Vertrouwen in modelresultaten

De verdiepingsgroep Visualisatie en Besluitvorming heeft een spel (*serious game*) ontwikkeld om beter te begrijpen hoe de beoogde gebruikers van de waterschappen in de praktijk omgaan met modelresultaten. Dit spel richt zich op situaties waarin afwegingen moeten worden gemaakt over risico's en waarbij verschillende belangen spelen. Het onderzoekt ook hoe de vermeende betrouwbaarheid van informatie daarin een rol speelt. In het spel nemen de deelnemers de rol van een bepaalde waterschapsmedewerker aan. Dit kan bijvoorbeeld iemand zijn die als waterkwaliteitsadviseur werkt of iemand die zich bezighoudt met wateroverlast. Tijdens het spel komt er steeds meer informatie beschikbaar, die de spelers in kunnen zetten om hun visie te ondersteunen. Het doel is dat ze samen met hun collega's tot een besluit komen hoe te handelen bij een reële dreiging van extreem weer en in hoeverre zij het advies van de digital twin willen volgen.

Het spel maakt duidelijk of de 'experts' op de adviezen van de digital twin vertrouwen of zich laten leiden door hun eigen kennis en inschattingen en nieuwe informatie die in het spel worden ingebracht. Het spel is o.a. gespeeld bij de Waterinfodag 2023 (16/06/2023) en het symposium Digital Twin Day (06/06/2023). In Bijlage 3 zijn enkele afbeeldingen uit de serious game opgenomen.

8.3 Resultaten

8.3.1 Workshops requirementsanalyse

De workshops voor de requirementsanalyse leverden niet alleen noodzakelijke inzichten op over visualisatie en functionaliteit, maar brachten ook nieuwe vragen en behoeften aan het licht met betrekking tot de benodigde informatie. Hoewel dit waardevol was, vertraagde het de ontwikkelings- en visualisatieactiviteiten en vereiste het extra inzet van de betrokken medewerkers van de waterschappen. In onderzoeksprojecten zoals dit, is het gebruikelijk dat er in de beginfasen nieuwe inzichten en aanvullende wensen voor het eindproduct ontstaan en nieuwe kennis wordt ontwikkeld die kan worden ingepast. Het is daarom verstandig om dergelijke workshops te integreren in een iteratief en/of incrementeel ontwikkelproces.

Figuur 40 geeft een voorbeeld van een gebruikersscenario dat als startpunt diende voor een workshop bij Waterschap Limburg. Figuur 41 toont de resultaten van de workshop, de inventarisatie van de benodigde informatie om aan de behoefte van de beoogde gebruiker te voldoen. Figuur 42 laat een deel van een Miro-board zien, dat gebruikt werd tijdens een onlineworkshop om overzicht te krijgen van de perspectieven van de beoogde gebruikers binnen Waterschap Limburg.

Scenario 1



Er is een droogteperiode gaande. Inschatting is dat het minimaal 2 weken extreem droog weer oplevert.

Er worden persvragen gesteld, met de strekking "hoe erg is het en wat gaat het waterschap doen om de effecten van droogte op te vangen".

De betrokken bestuurder wil graag een adequaat antwoord naar aanleiding van de persvragen en wil bij voorkeur laten doorklinken dat Waterschap Limburg "in control" is.

Welke data zou je verzamelen om bovenstaande persvraag en de acties van WL mee te onderbouwen?

Welke weergave (visualisatie) is het meest effectief om inzicht te krijgen?

Figuur 40 Voorbeeld van een gebruiksscenario. Onder: het overzicht van de informatiebehoefte, geordend op schaal.

WEERGAVE VAN DE INFORMATIE



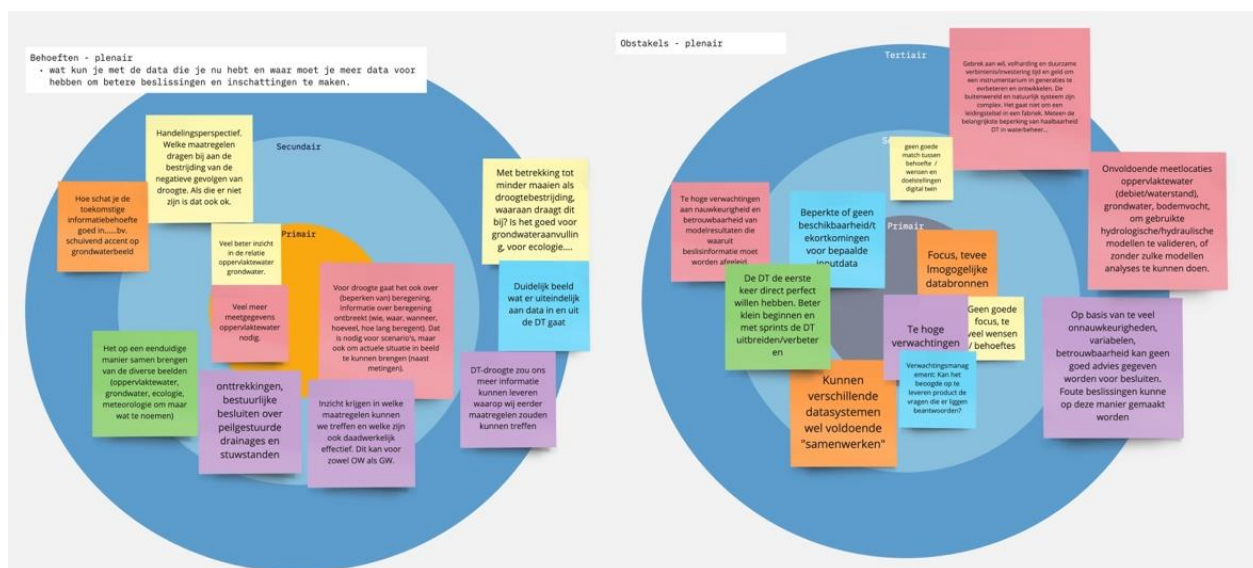
Interessant als de DT in historische reeksen zou kunnen zoeken naar vergelijkbare situaties

Toevoegen? Historische data neerslag, patroon kan relevant zijn, vergroot kwaliteit van beoordeling scenario (nice to have).

- Grondsoort (kaartlaag)
- Hoogteligging (kaartlaag)
- Beeksysteem: nalevering van kwel of niet

Laatste paneel : opschonen

Figuur 41 Overzicht van de benodigde informatie, geordend op schaal.



Figuur 42 Een onderdeel van een Miro-bord, samengesteld tijdens een van de voorbereidende workshops.

8.3.2 Ontwikkelde dashboards

De resultaten van de workshops, waarbij zowel gebruikers als projectleden waren vertegenwoordigd, werden gebruikt voor het ontwikkelen van prototypes. Deze prototypes werden regelmatig aangevuld met data en door de ontwikkelaar aangepast op het gebied van lay-out en functionaliteit.

Droogte

Figuur 13 en Figuur 14 tonen het uiteindelijke dashboard dat is ontwikkeld voor de casus Droogte van Waterschap Limburg. Ontwerpkeuzes worden in de praktijk niet alleen beïnvloed door de wensen van de gebruiker en voortschrijdend inzicht, maar ook door de beschikbaarheid van data en de beperkingen van de gebruikte software. Hierdoor kan de uiteindelijke interface afwijken van eerdere ontwerpen. In dit geval was

de wens om de situatie op vier verschillende momenten in de tijd te kunnen beoordelen en vergelijken een belangrijke reden voor de schermindeling.

Bij Waterschap Vallei en Veluwe is een workshop geweest om de ideeën en wensen van gebruikers op te halen. Naast een algemene sessie zijn er naar het einde van het project toetsmomenten geweest op de verschillende thema's (Waterkwaliteit, Droogte en Zuivering). Vergelijkbaar met Waterschap Limburg wordt de praktijk van gebruikers beïnvloed door beschikbaarheid van data en beperkingen van de gebruikte software.

Het droogte-dashboard laat het volgende zien:

- Bodemvochtvoorspelling op 20 cm diepte voor de aankomende drie weken
- Onzekerheidsintervallen die bij de voorspelling horen
- Historische neerslag

Dit wordt gedaan door historische (30 dagen) bodemvocht- en historische meteodata te combineren om tot een voorspelling te komen. Dit kan worden gevisualiseerd voor vier locaties.

Bijlage 4 geeft samenvattingen van de afsluitende evaluaties van de droogte-dashboards van Waterschap Limburg en Waterschap Vallei en Veluwe, met aanbevelingen voor vervolgprojecten.

Waterzuivering

De focus van het thema Waterzuivering was in het project op RWZI Ede. De RWZI ontvangt afvalwater via een toevoerend stelsel vanuit verschillende gemeenten (o.a. Ede). In de RWZI wordt het afvalwater gezuiverd en vervolgens wordt geloosd op de Zijdewetering. Het zuiveringsproces van een RWZI vergt het gebruik van chemicaliën en energie. Een stabiele, continue aanvoer van afvalwater, dag en nacht, draagt bij aan een efficiënter proces, omdat een gelijkmatige verdeling van het influent leidt tot een lager energie- en chemicaliënverbruik.

Ook bij dit thema zijn er sessies georganiseerd met waterschapsmedewerkers en experts om het doel en de eindgebruikers te definiëren. Voor het project is een dashboard ontworpen dat inzicht biedt in belangrijke parameters en de interactie en vergelijking mogelijk maakt tussen verschillende aanvoerstrategieën voor het influent (de huidige situatie versus een stabielere aanvoer). Dit vraagt om inzicht in het toevoerend stelsel, waarbij het risico op overstorten zo veel mogelijk beperkt moet worden. Deze dynamiek kan gemodelleerd worden met de digital twin van het thema Waterzuivering.

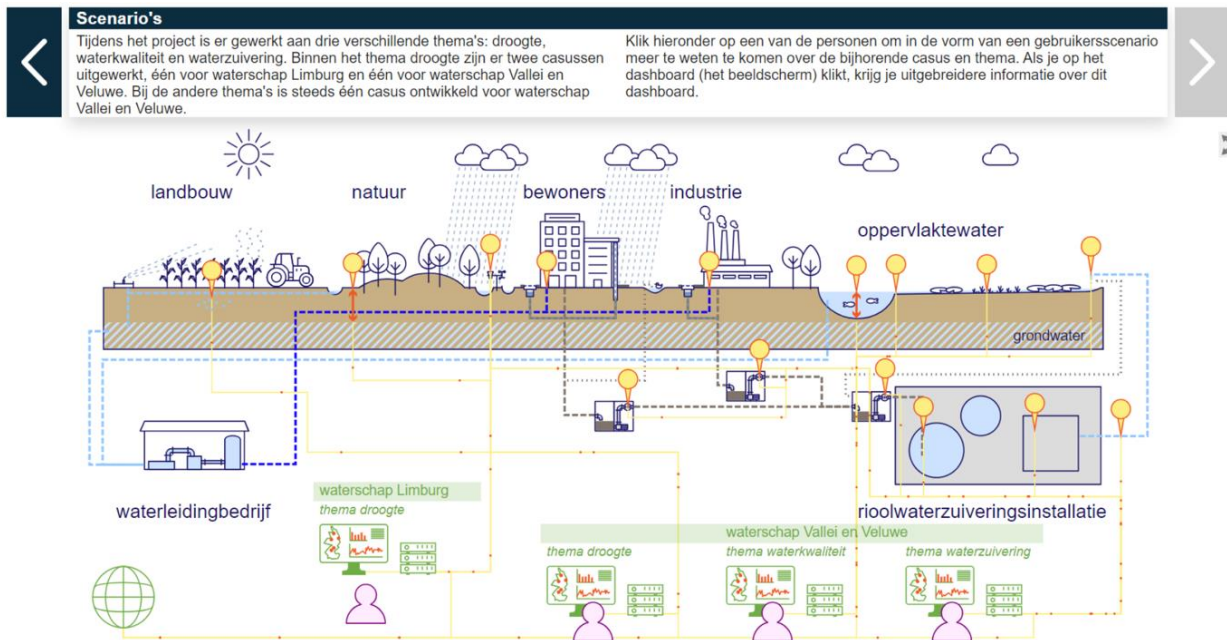
Waterkwaliteit

Voor het thema Waterkwaliteit is de Zijdewetering gemodelleerd, een waterlichaam met strenge milieueisen en complexe fysische, chemische en biologische interacties. Dit maakt het nemen van effectieve maatregelen om de kwaliteit van het water te verbeteren, uitdagend. Het waterschap beschikt over een dashboard dat de actuele en historische situatie inzichtelijk presenteert. Dit is binnen het waterschap ontwikkeld en wordt gebruikt voor de dashboardontwikkeling voor dit thema binnen dit project.

In de digital twin voor de Zijdewetering zijn verschillende scenario's doorgerekend, zodat diverse handelingsperspectieven en hun effecten zichtbaar worden. Dit model toont niet de actuele situatie, maar dient als hulpmiddel voor overleg met gemeenten en andere betrokkenen over mogelijke oplossingen.

Om de ontwikkeling van het dashboard te ondersteunen, zijn er verschillende sessies georganiseerd met deskundigen van het waterschap en de andere projectpartners. Deze sessies richtten zich op de eindgebruikers van het dashboard, waarbij een belangrijk punt de informatiebehoefte van deze gebruikers was. Het resultaat is een overzichtelijke visualisatie die de oplossingsrichtingen en hun complexiteit begrijpelijk maakt, ook voor niet-experts.

Voor het thema Waterkwaliteit zijn onderdelen voor een visualisatie en dashboard ontwikkeld, die zijn opgenomen in een overzichtsvizualisatie van het project, zie Figuur 43 en Figuur 44. Bijlage 5 geeft een toelichting.



Figuur 43 Pagina uit de overzichtsvizualisatie digital twin voor het Waterbeheer.



Figuur 44 Het interne dashboard Zijdewetering door Waterschap Vallei en Veluwe op basis van metingen (debiet, DO, NH₄) en berekeningen (NH₃).

8.3.3 Toetsing en evaluatie van de dashboards

Waar het mogelijk was dit in te passen in het ontwikkelschema van de dashboards, hebben we met representatieve gebruikers, voorgesteld door de waterschappen, een user test uitgevoerd. Een voorbeeld is de uitgebreide 'walkthrough' of doorloop van het dashboard voor Waterschap Limburg, waarvan het verslag in zijn geheel in Bijlage 6 is opgenomen. Een dergelijke test is essentieel om te bepalen of de functionaliteit en visualisatie voldoen aan de gebruikerseisen.

De uitkomsten zijn verwerkt in de activiteiten van de thema's en de andere verdiepingsgroepen en hebben daarmee bijgedragen aan het uitwerken van de casussen en de ontwikkeling van de prototypes van digital twins.

In de laatste fase van het project heeft de groep zich vooral gericht op het helpen ontwikkelen van de dashboards van de digital twins en het testen en evalueren met de beoogde gebruikers.

8.3.4 Serious game: Vertrouwen in modelresultaten

Een van de aandachtspunten in dit project was de opname en acceptatie van nieuwe (digitale) applicaties in de waterschappen. Hiervoor hebben we een serious game ontwikkeld (zie paragraaf 8.2.4). Wij zagen dat de spelers de adviezen van de digital twin heel verschillend beoordeelden. Sommigen waren van mening dat een veelomvattend systeem als een digital twin een goede basis is voor besluitvorming, omdat deze objectief is en alle relevante data integreert. Anderen zagen de digital twin eerder als een van de informatiebronnen en hadden weinig vertrouwen in de adviezen, zeker als deze sterk afweken van de mening van de experts. In het besluitvormingsproces kwamen ook andere mechanismen naar voren. Afhankelijk van de rol die de betrokkenen speelden, bagatelliseerden zij de onzekerheid van de uitkomsten van de digital twin, of benadrukten ze deze juist.

Een spel als dit zou een geschikt middel zijn om bij het in gebruik nemen van een digital twin in een waterschap, de meningen en verwachtingen van de beoogde gebruikers in de verschillende lagen en onderdelen van de organisatie helder en bespreekbaar te maken.

8.3.5 Workshop Besluitvorming met digital twins

In deze workshop stonden de volgende twee vragen centraal:

1. In hoeverre kunnen digital twins bijdragen aan effectievere, efficiëntere en beter onderbouwde besluiten?
2. Zullen digital twins besluitvorming gemakkelijker maken, en wat is hun relatie met onzekerheid in besluitvorming?

Om deze vragen te beantwoorden, waren er twee sprekers. Klaas Veenma, beleidsonderzoeker bij de provincie Overijssel, gaf een presentatie over zoeken naar ruimte voor onzekerheid in onzekere tijden. Martin Knotters, onderzoeker bij Wageningen Environmental Research, richtte zich op 'onzekerheidsmonsters'. Beide presentaties behandelden hoe men omgaat met onzekerheid bij het nemen van beslissingen, vooral bij de overheid. Veenma introduceerde de stelling: "Gebruik van digital twins voorkomt (te) snelle 'trechtering' en daarmee problematische besluitvorming." Knotters benadrukte dat een digital twin voor het waterbeheer zou moeten helpen bij het structureren van beslisproblemen en deze niet complexer moeten maken dan nodig, zodat beter met onzekerheid kan worden omgegaan.

Naast de presentaties vonden er twee workshops plaats. De eerste workshop ging over de vraag "Wat is een goede beslissing?". De deelnemers gaven aan dat 'draagvlak' en 'transparantie' de belangrijkste criteria voor een goede beslissing zijn. Vervolgens werd de beslissing van Waterschap Vallei en Veluwe in 2022 om een onttrekkingsverbod in te stellen als casus gebruikt. Tijdens het doorlopen van verschillende onderdelen werden er diverse vragen gesteld waarin onzekerheid een rol speelde, zoals: "Hoe zal de watervraag zich de komende weken ontwikkelen?" en "Hoe verloopt de afname van het bodemvocht?" De discussie richtte zich o.a. op hoe een digital twin kan bijdragen aan meer draagvlak en transparantie in het besluitvormingsproces. Tegelijkertijd werd benadrukt dat aandacht nodig is voor de beperkingen van de digital twin en de onzekerheden die deze niet kan oplossen.

In de tweede workshop werd een vergelijkbare casus van Waterschap Limburg in 2023 besproken. Het belang van objectieve data werd benadrukt om het risico op verkeerde beslissingen te verkleinen, evenals de rol van een digital twin hierin. Een discussiepunt was de vraag of een digital twin enkel ter ondersteuning dient in een onzekere wereld, of dat het kan helpen onzekerheid fundamenteel te reduceren. Er werd opgemerkt dat digital twins beslissingen baseren op bekende informatie, terwijl veel onzekerheid juist voortkomt uit het onbekende.

Beide presentaties lieten zien hoe besluitvorming vaak wordt beïnvloed door onzekerheid, en dat de manier waarop hiermee wordt omgegaan niet altijd optimaal is. In de tweede workshop bleek echter dat veel deelnemers weer terugvielen in oude denkpatronen, zoals de overtuiging dat nieuwe data onzekerheid automatisch zullen verminderen. Dit illustreert hoe moeilijk het is om de manier van denken te veranderen. Uit de workshops kwamen enkele aanbevelingen naar voren. De digital twin kan meer bieden dan alleen extra informatie voor specifieke beslisproblemen. Het kan niet alleen meer inzicht geven in hydrologische processen, maar ook verschillende berekeningen daarop uitvoeren. Daarnaast kan de digital twin, door middel van visualisatie, bijdragen aan een meer integrale benadering van besluitvorming. Dit helpt waterschappen om beter afgewogen besluiten te nemen. Een uitgebreid verslag van de workshop is te vinden in Bijlage 7.

8.3.6 Workshop Kwantificeren en visualiseren van onzekerheid

Bijlage 8 geeft een uitgebreid verslag van deze workshop. Startpunt van de workshop was de visualisatie in het droogte-dashboard Limburg van voorspelde grondwaterstanden voor één locatie. Dit voorbeeld van een tijdreeksmodel staat model voor andere grondwaterstandreeksen, afvoerreeksen, reeksen van concentraties en staat in principe ook model voor ruimtelijke modellen zoals kaarten. Met onzekerheid was tot dan toe geen rekening gehouden. Alleen een deterministisch, mechanistisch model is gekalibreerd en daarna toegepast om te voorspellen nadat de fit is verbeterd met behulp van machinelearning (Figuur 7). Om tijdens de workshop toch visualisaties van onzekerheid over de dynamiek van de grondwaterstand te kunnen tonen, is deze gekwantificeerd door middel van bootstrapping (resampling met teruglegging) uit de verschillen tussen gemeten en gemodelleerde grondwaterstanden (ruis). Daarbij moesten wel enkele veronderstellingen worden gedaan over de statistische eigenschappen van deze verschillen. Uiteraard moeten tijdreeksen in de toekomst zodanig worden gemodelleerd dat de ruis voldoet aan de modelveronderstellingen en dus gebruikt kan worden om onzekerheid te kwantificeren.

Tijdens de workshop werden twee mogelijkheden voor visualisatie van onzekerheid in modelvoorspellingen gepresenteerd. Als eerste mogelijkheid werden 95%-voorspellingsintervallen gepresenteerd, rond de mediane grondwaterstand als voorspeller. Dit levert 'bandbreedtes' op: hoe breder, hoe onzekerder. Als tweede mogelijkheid werd gekwantificeerde onzekerheid gevisualiseerd als een tijdreeks van de kans waarmee de grondwaterstand daalt onder een kritisch niveau dat door de gebruiker is opgegeven. Een voorbeeld van een equivalent hiervan in de vorm van een kaart van een gebied is te vinden in Knotters e.a. (2022).

De antwoorden die de deelnemers aan de workshop gaven op de vraag 'Hoe kwantificeren en visualiseren we onzekerheid in de Digital twin voor het Waterbeheer?' en reflecties op benutting van kennis van onzekerheid bij besluitvorming zijn als volgt samengevat (Bijlage 8 geeft de uitgebreide antwoorden):

1. Tijdreeksgrafieken met bandbreedtes, zoals 95%-voorspellingsintervallen, voldoen goed om een algemene indruk te krijgen.
2. Tijdreeksgrafieken met kansen dat de grondwaterstand onder een bepaald kritisch niveau komt, zijn een goede weergave van onzekerheid als beslissingen moeten worden genomen. Opgemerkt werd dat je direct kunt zien wat de kans op onderschrijding is, dat je er signaleringsregels aan kunt koppelen die medewerkers actief attenderen op mogelijke onderschrijdingen en dat ze inzicht geven in het risico-aspect van beslissingen. Wel moeten gebruikers zeker zijn over de kritische waarde die zij opgeven, omdat anders alsnog verkeerde beslissingen worden genomen. Bij relatief eenvoudige beslisproblemen kan weergave van onzekerheid in onder- of overschrijdingskansen echter prima werken.
3. Kaarten die een ruimtelijk beeld geven van de kansen dat kritische niveaus in een gebied worden onder- of overschreden, zijn nuttig om een totaalbeeld te verkrijgen. Ze zijn te combineren met andere kaarten, zoals de grondgebruikskaart, de bodemkaart en kaarten met ecologische kenmerken. Een beslissing op gebiedsniveau is relevanter dan op puntniveau. Een kritische ondergrens moet op gebiedsniveau worden ingesteld en zegt op puntniveau weinig.
4. De bruikbaarheid van tijdreeksgrafieken en kaarten met kansen kan verder worden vergroot als de kansen worden vermenigvuldigd met effecten tot risico's. Hierbij werden financiële risico's genoemd en de kosten-batenafweging van het vergrote risico van natschade door water vast te houden om het risico van droogteschade te verkleinen. Ook risico's die niet eenvoudig in monetaire waarden zijn uit te drukken werden genoemd.
5. Onzekerheid moet eenduidig, uniform gevisualiseerd worden, waarbij wel rekening wordt gehouden met verschillen in grootheden en tijdschalen. Verschillen in methode van kwantificering en visualisatie van onzekerheid kunnen leiden tot verkeerd gebruik van gekwantificeerde onzekerheid.
6. Geadviseerd werd om aan te sluiten bij bestaande systemen waarin onzekerheid wordt gekwantificeerd en gevisualiseerd, en te adviseren over hoe dit in de toekomst kan worden verbeterd. Ook werd geadviseerd om de enorme kennis over visualisatie van onzekerheid die online beschikbaar is te benutten.
7. De weergave van onzekerheid hoeft niet voor iedereen leesbaar te zijn, omdat de informatie bedoeld is voor specialisten die de taak hebben op basis van deze informatie, gecombineerd met andere informatie, een advies te geven of een keuze te maken. Als de weergave wordt gepresenteerd aan een bredere groep, dan zou de weergave niet moeten worden vereenvoudigd, maar beter moeten worden toegelicht. Want vereenvoudiging kan tot ongewenst informatieverlies leiden. Er is altijd een expert nodig om de informatie te duiden en hydrologen en statistici moeten samenwerken om tot het resultaat te komen dat tot goede beslissingen kan leiden, gebaseerd op statistisch correcte interpretatie van data en

modelresultaten voor zowel droogte-wateroverlast, waterkwaliteit als waterzuivering. Dataexperts zouden kennis moeten hebben van onzekerheid en de achterliggende theorie en moeten hiermee bewust kunnen omgaan. Mensen die werkzaam zijn in de waterschapssector zouden onzekerheid en statistiek als structurele onderdelen van hun werk moeten gaan zien.

Naast de bovenstaande opmerkingen met betrekking tot kwantificering en visualisatie van onzekerheid in de digital twin voor het Waterbeheer werden de volgende, algemenere opmerkingen geplaatst:

1. Het is belangrijk om helder te zijn over de betrouwbaarheid van de informatie waarop beslissingen worden gebaseerd. Informatie over betrouwbaarheid wordt echter vaak complex gevonden. Ook wordt verlangd dat onderzoekers 'zekerheid' leveren. De vraag is dus hoe onzekerheidsinformatie moet worden gepresenteerd zodat het begrepen en benut wordt.
2. Hoewel intuïtie en emotie een rol spelen in besluitvorming is het de taak van onderzoekers om rationele besluitvorming te faciliteren.
3. Bij digital twins wordt gebruikgemaakt van modellen en machinelearning, maar vanaf het begin wordt er onvoldoende rekening mee gehouden dat onzekerheid moet worden gekwantificeerd.
4. Belangrijk is of een digital twin wordt toegepast in een omgeving met een beperkt aantal parameters of in een omgeving die is omgeven van de onzekerheden.
5. Belangrijk is om bij visualisatie van onzekerheid rekening te houden met het verschil in dynamiek tussen beslissingen bij calamiteiten en beslissingen in bijvoorbeeld droogtesituaties. Er zijn verschillen in tijdhorizon en maatschappelijke impact.
6. Te veel focus op onzekerheid kan verlamdend werken op het ontdekken van nieuwe toepassingen.

Conclusies en geleerde lessen die uit de workshop volgden, zijn opgenomen in paragraaf 8.4.

8.4 Conclusies, geleerde lessen

8.4.1 Conclusies

De activiteiten van de verdiepingsgroep Visualisatie & Besluitvorming waren gericht op het afstemmen van de dashboards van digital twins op de informatiebehoeften van de waterschappen in specifieke casussen, en het effectief ondersteunen van besluitvormingsprocessen via de interface en visualisaties. Dit werd gerealiseerd vanuit een gebruikersperspectief, in tegenstelling tot de gebruikelijke 'data-driven' aanpak in technologisch georiënteerde omgevingen met veel monitorings- en meetgegevens.

De activiteiten omvatten gebruikersanalyse, requirementsanalyse, ontwerp, toetsing en evaluatie, in nauwe samenwerking met de beoogde gebruikers van de waterschappen. Extra aandacht ging uit naar de visualisatie van onzekerheid. De resultaten omvatten o.a. scenario's als richtlijn voor het ontwerp, ontwerpschetsen van dashboards en aanbevelingen op basis van gebruikerstests.

Tijdens het project bleek het lastig om de ontwerpstrategie te volgen, deels door de organisatie van het project, het innovatieve karakter van de digital twin en ontwikkelingen bij de waterschappen, zoals nieuwe projecten.

In het project werd al begonnen met het inventariseren en bewerken van data voordat alle casussen waren bepaald en uitgewerkt. Daardoor bleek tegen het einde van het project dat de data die konden worden aangeleverd in enkele casussen niet aansloot bij de gebruikersvragen. De doelen van de dashboards zijn daardoor alsnog bijgesteld.

De activiteiten die nodig waren voor het produceren en geschikt maken van de data, het modelleren, het ontwerp van de dashboards en afstemming met gebruikers waren verdeeld over verschillende organisaties van het consortium, waar ook personele wisselingen plaatsvonden. Dit maakte de afstemming en planning moeilijker en leidde tot vertragingen, waardoor de continuïteit van het proces werd verstoord.

In IT-projecten worden gewoonlijk strategieën gehanteerd om juist met deze uitdagingen om te gaan. Een van de effectieve technieken is een scoping studie of haalbaarheidsanalyse voorafgaand aan een project. Dit had bijvoorbeeld de onduidelijkheid over casussen kunnen verhelpen. Bij aanvang van het project was het plan om in het project met sprints te werken, zoals in IT-projecten vaak wordt toegepast. Zogenaamde agile-development waarin dergelijke korte sprints passen, zorgt voor korte lijnen tussen betrokkenen en geregelde feedback en afstemming. Omdat dit een onderzoeksproject betrof en verschillende organisaties betrokken waren, met soms maar een kleine rol, is de sprint-aanpak uiteindelijk niet gelukt.

Toetsing en evaluatie zijn belangrijke onderdelen in user-centered design. Het Droogte-dashboard voor Waterschap Limburg is getoetst en gedurende enkele maanden gebruikt in het waterschap, wat heeft geleid

tot een reeks aanbevelingen. Door vertraging in het project is de evaluatie van de andere producten met beoogde gebruikers beperkt gebleven tot een bespreking met direct betrokkenen.

Uit de activiteiten die zich richtten op besluitvorming kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Een belangrijke conclusie van de workshop Besluitvorming op 18-10-2023 is dat er een sterke tendens is om onzekerheid bij besluitvorming te verminderen door het verzamelen van zo veel mogelijk nieuwe data, vaak een kostbare en tijdrovend proces, terwijl het verminderen van onzekerheid niet noodzakelijkerwijs leidt tot betere besluitvorming. Dat informatie over onzekerheid nuttig is bij het nemen van beslissingen wordt ingezien, ook dat benutting van deze informatie de doelmatigheid van beslissingen kan vergroten. Een digital twin kan helpen om niet gelijk te trechteren en daarmee uit de reflex van *certainification*, dus het creëren van zekerheid, te komen.
2. Een conclusie uit zowel de workshop Besluitvorming (18 oktober 2023) als de workshop Kwantificeren en visualiseren van onzekerheid (26-09-2024) is dat een digital twin onzekerheid niet mag verhullen. Een digital twin moet op een duidelijke en begrijpelijke manier laten zien welke data beschikbaar zijn, welke ontbreken en wat de kwaliteit van de data is. Ook moet een digital twin waar mogelijk kwantitatieve informatie over onzekerheid geven, dus niet alleen 'best estimates' als harde waarden, maar ook standaardfouten of betrouwbaarheidsintervallen vermelden of door stochastische realisaties te presenteren of parameters die hieruit kunnen worden berekend (zoals overschrijdingskansen).
3. Geconcludeerd wordt dat er een risico is dat de nadruk te veel op kwantitatieve data komt te liggen, terwijl niet alles kwantificeerbaar is en op dezelfde manier beoordeeld kan worden. We moeten ons eveneens bewust zijn van de grote verschillen tussen mensen in hun waardering van numerieke data versus andere informatie. Een digital twin biedt de kans om andere soorten gegevens te benutten, zoals resultaten van bijvoorbeeld inspecties en kwalitatieve beoordelingen, naast empirische/kwantitatieve data. In de praktijk blijkt dit echter moeilijk, omdat het principe 'meten is weten' een sterke rol speelt in dit domein en kwalitatieve data of kennis als minder betrouwbaar en belangrijk worden beschouwd. Verschillende soorten data of informatie worden nu niet getoond in dashboards, zoals waarnemingen van visuele inspecties, ecologische schade of kennis van lokale omstandigheden. Dit zijn data die pas bruikbaar zijn na een bewerking, zoals het classificeren van kwalitatieve data in categorieën. Ook data of informatie die op een andere manier getoond moet(en) worden dan in een getal, grafiek of als punt op een kaart, wordt(en) vaak niet in dashboards getoond. Hierdoor vallen we terug op data die beschikbaar zijn en wel in een bekende, kwantitatieve, vorm getoond kunnen worden, wat een risico geeft op bias (vertekening).
4. Een laatste conclusie uit de workshop Besluitvorming van 18-10-2023 betreft integratie van een digital twin in de organisatie, namelijk dat de definitie van een digital twin voor discussie blijft zorgen. Dé digital twin bestaat niet, het vernieuwende in deze digital twin is dat het domein overstijgend is. Maar voor bijvoorbeeld vraagstukken die visies op langere termijn betreffen, is een andere digital twin nodig. Ook de rol van digital twin in de organisatie blijft een onderzoeksvraag. Bij de waterschappen is door deelname aan het project meer nagedacht en gesproken over de vraag hoe besluiten nog beter te kunnen onderbouwen met verschillende soorten data en informatie. Een van de projectdoelen was om veranderingen teweeg te brengen in de organisatie wat betreft de integratie van de vraagstukken en daarmee de integratie van verschillende vakgebieden binnen het waterschap. De producten kunnen worden beschouwd als een kleine stap in die richting. Daarnaast is in het project geprobeerd door de lagen van de waterschapsorganisatie heen te kijken, zodat de digital twin niet vooral op het niveau van bijvoorbeeld de hydrologen wordt gebruikt, maar al een doorkijk kan geven naar vraagstukken op andere niveaus, waarin andere doelen een rol spelen, die soms meer politiek kunnen zijn. Dat is ten dele gelukt. Betrokkenheid van vertegenwoordigers van de hogere management- en bestuurslagen kwam nauwelijks tot stand, maar de hydrologen, adviseurs en dataexperts van de waterschappen die deelnamen aan de workshops brachten zelf de langetermijndoelen, zoals de KRW- (Kaderrichtlijn Water) doelen en BOP-doelen (Blauw Omgevingsprogramma (BOP), waterbeheerprogramma van Waterschap Vallei en Veluwe) in. Om de betrokkenheid van de hogere management- en bestuurslagen in een project te vergroten, zouden vertegenwoordigers een duidelijke rol moeten krijgen in de projectgroepen en al vanaf de aanvang worden betrokken bij de activiteiten. De digital twin kan in visualisatie en besluitvorming een bijdrage leveren aan een integrale blik en daarmee de besluitvorming ondersteunen, maar dan moet de ontwikkeling worden gedragen door vertegenwoordigers vanuit de gehele organisatie.

8.4.2 Geleerde lessen

1. In projecten voor applicatieontwikkeling, zoals digital twins, bevelen we aan een IT-strategie zoals Agile-development en incrementeel ontwerp te hanteren. Dit zorgt voor flexibiliteit, frequente feedback en betere gebruikersafstemming. Deze aanpak bevordert een efficiënt proces en een product dat goed aansluit op gebruikersbehoeften en technische eisen.
2. Daarnaast adviseren we om voldoende budget voor de interface-ontwikkeling te reserveren. De front-end-ontwikkelaar moet voldoende ervaring hebben met gebruikersonderzoek en naast gebruikerseisen ook rekening houden met bestaande applicaties van het waterschap. Vroege communicatie hierover is cruciaal.
3. Wijs een producteigenaar vanuit het waterschap aan om de eindverantwoordelijkheid te dragen en keuzes over data en interface te maken, voor consistentie en voortgang.
4. Betrek een statisticus bij het opstellen van het projectvoorstel, vooral voor het formuleren van probleemstelling, doel en onderzoeksvragen, de vertaling van beslisproblemen in statistische beslismodellen (zoals statistische toetsen), voeding van deze beslismodellen met de benodigde gegevens en kwantificering van onzekerheid.
5. Zet het onderwerp onzekerheid goed in een projectvoorstel – het heeft met data- en modelkwaliteit te maken, waar allerlei richtlijnen en checklists etc. voor zijn.
6. Wijs het onderwerp onzekerheid toe aan mensen in het project, die er ook over rapporteren.
7. Kwantificeer bij dataverzameling en bij dataverwerking met modellen de onzekerheid, zodat deze kan worden gevisualiseerd.
8. Zet al vanaf het begin het onderwerp onzekerheid op de agenda. Ook als er nog geen projectresultaten zijn, is er wel een omgeving waarin de producten zullen worden gebruikt. Hoe werkt men daar nu met onzekerheid? Hoe gaan de dataexperts en de gebruikers van de resultaten daarmee om?
9. Een geleerde les is dat momenteel draagvlak belangrijker is bij besluitvorming dan doelmatigheid. Kwantitatieve informatie over onzekerheid is essentieel bij risico- en kosten-batenanalyses ter ondersteuning van doelmatige beslissingen. Wellicht zou er bij waterschappen bezinning hierop kunnen plaatsvinden.
10. User-centered design van de producten (bijvoorbeeld door Agile UX, zie Schön et al., 2023) is essentieel. Dit betekent dat de gebruikers en hun vragen het startpunt zijn. Dit vereist frequente afstemming tussen de dataexperts, de ontwikkelaars en de vertegenwoordigers van de gebruikers, om te beoordelen of de inspanningen bijdragen aan het gewenste product. Daarbij moet worden gezorgd voor tussentijdse versies (prototypes) van dashboards, visualisaties etc., zodat de vorderingen kunnen worden besproken en geaccordeerd en een startpunt vormen voor volgende werkzaamheden. Ten slotte moeten de producten voor oplevering uitvoerig worden getoetst door mensen met verstand van relevante onderzoekstechnieken uit de sociale wetenschappen.
11. Het structureren van beslisproblemen is een effectieve manier om de juiste tool in te zetten en zo tot een weloverwogen beslissing te komen. Vaak zijn beslisproblemen weinig of niet gestructureerd, wat betekent dat er geen overeenstemming is over de kennis van oorzaken, omstandigheden en gevolgen, noch consensus over de doelstellingen. Aanbevolen wordt om bij en door het gebruik van een digital twin beslisproblemen zo goed mogelijk te structureren en onnodige complexiteit te vermijden. De complexiteit van sommige beslisproblemen kan bijvoorbeeld worden teruggebracht tot eenvoudige statistische toetsen, waarbij de beslissing als het ware kan worden 'uitgerekend'. Voor problemen waarvan de complexiteit niet kan worden gereduceerd, kan de structuur worden verbeterd door onzekerheden transparant te maken en deze een centrale rol te geven in het besluitvormingsproces.

9 Algemene conclusie, geleerde lessen en aanbevelingen

9.1 Algemene conclusie

De primaire doelstelling van het project was om te leren op welke manier de inzet van een digital twin ons inzicht in het watersysteem kan vergroten. Het project richtte zich op de vraag wat een digital twin is en hoe een digital twin voor het waterbeheer eruit zou kunnen zien. Dit gaf een interessante combinatie van onderzoek, technische uitwerking en praktische toepassing. De lange doorlooptijd en personeelwisselingen bij deelnemende organisaties gaven uitdagingen aan het project. De technische ontwikkeling van een digital twin is meer gebaat bij een kortere doorlooptijd en kan losstaan van discussies over wetenschappelijke definities en de rol van de digital twin in de besluitvorming. Deze discussies kunnen bij de start van het project worden gevoerd, en zodra er duidelijke kaders en cases zijn, kan deze daadwerkelijke ontwikkeling worden opgestart. Bij dit project liepen de discussies over definities en de rol van een digital twin echter tegelijkertijd met de technische ontwikkeling. In het brede consortium was veel kennis aanwezig, maar dit kostte ook de nodige afstemming en het bleek een uitdaging om het geheel efficiënt te laten werken. Dit verdient in de projectstructuur meer aandacht. Het maken van één digital twin voor het waterbeheer bleek qua beschikbare data en modellen een brug te ver. Per thema is wel een losse digital twin ontwikkeld, waarbij er kansen liggen om de thema's Zuivering en Waterkwaliteit te koppelen. Al met al was het een uitdagend, maar leerzaam project met waardevolle inzichten en toepasbare resultaten.

9.2 Algemene geleerde lessen

Omdat het primaire doel was te leren, vatten we hier de algemene geleerde lessen samen. We onderscheiden hierbij lessen ten aanzien van (1) organisatie en uitvoering van het project, (2) de inhoud en functionaliteiten van de digital twin en (3) de benutting van de digital twin bij besluitvorming.

9.2.1 Organisatie en uitvoering project digital twin voor het waterbeheer

1. Terugkijkend op het project blijken taal en taalgebruik een belangrijke rol te hebben gespeeld bij het verloop van het project en bij de producten die het project heeft opgeleverd. Het project is gebaseerd op de beeldspraak van een tweeling. Een beeldspraak die herkenbaar is voor alle betrokkenen kan in een multidisciplinair project heel bevorderlijk zijn voor de communicatie. Het kan een gemeenschappelijke taal bieden waarmee spraakverwarring als gevolg van jargon kan worden voorkomen. De beeldspraak moet dan wel duidelijk zijn uitgewerkt. Dat bleek bij de digital twin voor het waterbeheer, ondanks de lange aanloop, toch onvoldoende het geval te zijn, waardoor de verschillende (ook regelmatig nieuwe) betrokkenen er verschillende uitleg en invulling aan gaven. Bovendien bedienden zij zich daarbij elk van hun eigen jargon, wat door het ontbreken van toelichting eerder verwarrend dan informerend werkte. Dit belemmerde inhoudelijke gesprekken en verlegde de aandacht van de inhoud naar het proces. Voor toekomstige projecten op het gebied van digital twins is het heel raadzaam om vóór aanvang de beeldspraak van de tweeling uit te werken, waarbij ook de sterktes en zwaktes van de beeldspraak duidelijk worden (Taylor en Dewsbury, 2018; Korenhof et al., 2021).
2. Het is super leerzaam om met verschillende bedrijven/organisaties/personen samen te werken. Hierdoor leer je van elkaar.
3. Bij verschillende thema's en verdiepingsgroepen werd – terugkijkend – geconcludeerd dat beter 'klein' had kunnen worden begonnen aan de ontwikkeling van een digital twin voor het waterbeheer. De beschikbare uren waren verdeeld over een te grote groep personen. Op die manier verliest een project al snel prioriteit, en wordt het een bijzaak naast andere projecten.
4. De weinige hydrologen en datascientists die beschikbaar zijn bij waterschappen hebben beperkte tijd om mee te denken aan de ontwikkeling van de digital twin. Zowel systeemkennis als kennis van machinelearning is nodig om een begrijpelijke digital twin te ontwerpen.

-
5. In alle use-cases bleek dat het ontwikkelen van een digital twin ook vraagt dat je heel gericht onderzoekt welke kernvragen je wilt beantwoorden. Dit blijkt soms lastig omdat hydrologen, managers of dataspecialisten verschillend jargon gebruiken, waardoor gemakkelijk interpretatieverschillen kunnen ontstaan. Hierbij bleek dat het kan helpen om het vraagstuk te beschrijven in een stroomschema of bouwplaat, die zichtbaar maakt welke data op welke manier worden gecombineerd tot de output uit de digital twin.

9.2.2 Inhoud en functionaliteiten van digital twins

1. Combinaties (hybrides) van fysische en machinelearning-modellen kunnen betere resultaten opleveren dan niet-gecombineerde modellen.
2. In het algemeen geldt dat voor een vloeiende koppeling tussen brondata, dataverwerking en (dus) visualisatie gelijke tijdschalen, validiteit, digitale uitwisselbaarheid en procesgerichtheid (met betrekking tot use case/doel) essentieel zijn.
3. Data-uitwisseling moet voldoen aan wet- en regelgeving voor behoud van privacy en cyberveiligheid.
4. Belangrijk is of een digital twin wordt toegepast in een omgeving met een beperkt aantal parameters of in een omgeving die is omgeven van onzekerheden.
5. Bij de digital twins worden vaak meerdere datastromen gecombineerd tot een nieuwe output. Hierbij is gebleken dat het goed is om ook na te gaan welk type onzekerheid of foutmarge je accepteert in je uitkomst. Er ontstaat namelijk een risico als je onzekerheid op onzekerheid stapelt.

9.2.3 Benutting digital twin bij besluitvorming

1. Om betrouwbare uitspraken te doen op basis van gegevens en modeluitkomsten van bijvoorbeeld grondwaterniveau die zijn opgeschaald van punt- naar gebiedsniveau, is het belangrijk om over een goed bruikbare definitie voor opschaling te beschikken. Betrouwbaar betekent hier dat er voldoende vertrouwen is in informatie op stroomgebiedsniveau voor gebruik bij besluitvorming. Factoren die hier (mogelijk) een rol bij spelen, zijn: (1) data zijn beschikbaar maar moeilijk opschaalbaar, (2) bij projecten wordt van tevoren vaak geen haalbaarheidsstudie met data-analyse gedaan naar de informatiewaarde van meetdata. Iteratief zou kunnen worden geanalyseerd of doelen en data bij elkaar passen.
2. Voor het ondersteunen van besluitvormingsprocessen is vooral wezenlijk te bedenken wie met de output van de digital twin moeten werken en welk type informatie nodig is om tot besluitvorming te komen.
3. Geconstateerd wordt dat er eigenlijk behoefte is om de uitkomst uit een digital twin meer te verbinden aan bijvoorbeeld kosten-batenafwegingen of uit te drukken in een kans van optreden. Daarmee is het bijvoorbeeld makkelijker om een keuze te maken tot het inzetten van een beregeningsverbod (bij droogte) of het nemen van besluiten over optimalisatie van zuiveringsprocessen.

9.3 Algemene aanbevelingen

9.3.1 Organisatie en uitvoering project digital twin voor het waterbeheer

1. In projecten voor applicatieontwikkeling, zoals digital twins, bevelen we aan een IT-strategie zoals Agile-development en een incrementeel ontwerp te hanteren. Dit zorgt voor flexibiliteit, frequente feedback en betere gebruikersafstemming. Deze aanpak bevordert een efficiënt proces en een product dat goed aansluit op gebruikersbehoeften en technische eisen. User-centered design van de producten (bijvoorbeeld door Agile UX, zie Schön et al., 2023) is essentieel: de gebruikers en hun vragen zijn het startpunt. Dit vereist frequente afstemming tussen de dataexperts, de ontwikkelaars en de vertegenwoordigers van de gebruikers, om te beoordelen of de inspanningen bijdragen aan het gewenste product. Daarbij moet worden gezorgd voor tussentijdse versies (prototypes) van dashboards, visualisaties etc., zodat de vorderingen kunnen worden besproken en geaccordeerd en een startpunt vormen voor volgende werkzaamheden. Ten slotte moeten de producten voor oplevering uitvoerig worden getoetst door mensen met verstand van relevante onderzoekstechnieken uit de sociale wetenschappen.
2. Wijs een producteigenaar vanuit het waterschap aan om de eindverantwoordelijkheid te dragen en keuzes over data en interface te maken voor consistentie en voortgang.

-
3. Bij digital twins wordt gebruikgemaakt van modellen en machinelearning, maar er wordt vanaf het begin onvoldoende rekening mee gehouden dat onzekerheid moet worden gekwantificeerd. Betrek daarom een statisticus bij het opstellen van het projectvoorstel, ook bij het formuleren van probleemstelling, doel en onderzoeksvragen. Dit bevordert de vertaling van beslisproblemen in statistische beslismodellen (zoals statistische toetsen), voeding van deze beslismodellen met de benodigde gegevens en kwantificering van onzekerheid. Zet het onderwerp 'onzekerheid' daarom goed in een projectvoorstel – het heeft ook met data- en modelkwaliteit te maken, waar allerlei richtlijnen en checklists etc. voor zijn.
 4. De samenwerking tussen de verdiepingsgroepen Brondata met Dataverwerking heeft veel opgeleverd (wie doet wat, waar ligt welke verantwoordelijkheid, wat zien we nu echt in die data, wat gaat er wanneer wel/niet goed etc. en de rechtstreekse terugkoppeling daarvan naar de prioritering van databronnen en attributen). Een vergelijkbare intensieve samenwerking is ook sterk aan te raden met dashboard-ontwerpers en -bouwers. Dit helpt om dataverzameling en dataverwerking af te stemmen op beslissingsondersteuning.
 5. Pak de ontwikkeling van een digital twin programmatisch en niet projectmatig aan, met meer onafhankelijkheid van deelprojecten een scheiding van productontwikkeling en onderzoek.
 6. Werk in kleine, dedicated teams aan gericht gereedschap dat daadwerkelijk gebruikt kan worden.
 7. Zorg voor voldoende capaciteit.
 8. Pas de werkvorm, planning en capaciteit aan de inhoud van (deel)projecten aan.

9.3.2 Inhoud en functionaliteiten van digital twins

1. Uitwisseling van brondata met andere waterschappen en buurlanden is een uitdaging, omdat gewerkt wordt met andere datasystemen. Het is essentieel om dit nader af te stemmen met waterschappen en buurlanden België en Duitsland.
2. Zorg bij verschil in validatieprotocollen voor verschillende datastromen voor standaardisatie van de validatie.
3. Bedenk goed wat voor type vraag je met een digital twin wil bedienen. Is dit een optimalisatievraagstuk, dan moet je vooral kijken naar de typen data die nodig zijn om de optimalisatie door te voeren. Vooral voor zuiveringsprocessen is dit een vraagstuk dat meer en meer in de belangstelling komt.

9.3.3 Benutting digital twin bij besluitvorming

Het structureren van beslisproblemen is een effectieve manier om de juiste tool in te zetten en zo tot een weloverwogen beslissing te komen. Vaak zijn beslisproblemen weinig of niet gestructureerd, wat betekent dat er geen overeenstemming is over de kennis van oorzaken, omstandigheden en gevolgen, noch consensus over de doelstellingen. Aanbevolen wordt om bij en door het gebruik van een digital twin beslisproblemen zo goed mogelijk te structureren en onnodige complexiteit te vermijden. De complexiteit van sommige beslisproblemen kan bijvoorbeeld worden teruggebracht tot eenvoudige statistische toetsen, waarbij de beslissing als het ware kan worden 'uitgerekend'. Voor problemen waarvan de complexiteit niet kan worden gereduceerd, kan de structuur worden verbeterd door onzekerheden transparant te maken en deze een centrale rol te geven in het besluitvormingsproces.

Literatuur

- Abras, C., Maloney-Krichmar, D., & Preece, J. (2004). User-Centred Design. Bainbridge, W. Encyclopedia of Human-Computer Interaction. Thousand Oaks: Sage Publications, 37 (4): 445-456.
- Collenteur, R.A., M. Bakker, R. Caljé, S.A. Klop en F. Schaars, 2019. Pastas: open source software for the analysis of groundwater time series. Groundwater 57 (6): 877-885.
- Knotters, M. en J.G. de Gooijer, 1999. TARSO modelling of water table depths. Water Resources Research 35 (3): 695-705.
- Knotters, M., D. Walvoort en P. Gerritsen, 2022. Mapping water table depths in wetlands and polder areas by probability sampling. Geoderma 422: 115928. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115928>
- Korenhof, P., V. Blok en S. Kloppenburg, 2021. Steering representations – towards a critical understanding of Digital Twins. Philosophy & Technology 34: 1751-1773.
- Liess, M., Von der Ohe, P.C. (2005). Analyzing effects of pesticides on invertebrate communities in streams. Environmental Toxicology and Chemistry 24:954-965.
- Metcalfe, B., 2020. Digital Twin Methodology Platform. <https://web.microsoftstream.com/video/9f943cee-3b57-4dc1-8d79-2165dceeda79>
- Metcalfe, B., H.C. Boshuizen, J. Bulens en J.J. Koehorst, 2023. Digital twin maturity levels: a theoretic framework for defining capabilities and goals in the life and environmental sciences. F1000 Research 12:961. <https://doi.org/10.12688/f1000research.137262.1>
- Morgan, G.M. en M. Henrion, 1990. Uncertainty – a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis. New York, Cambridge University Press.
- Perrin, C., C. Michel, R. Caljé en V. Andréassian, 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology 279(1-4): 275-289.
- Poortvliet, P. M., M. Knotters, P. Bergsma, J. Verstoepe, en J. van Wijk, 2019. On the communication of statistical information about uncertainty in flood risk management. Safety Science 118:194-204. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.024>
- Schön, E. M., da Silva, T. S., Hinderks, A., Sharp, H., & Thomaschewski, J. (2023). Introduction to special issue on Agile UX: challenges, successes and barriers to improvement. Information and Software Technology, 158, 107193.
- Smits, M., 2006. Taming monsters: the cultural domestication of new technology. Technology in Society 28: 489-504. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2006.09.008>
- Taylor, C. en B.M. Dewsbury, 2018. On the problem and promise of metaphor use in science and science communication. Journal of Microbiology & Biology Education 19 (1), <https://doi.org/10.1128/jmbe.v19i1.1538>
- Van der Lee, G.H. (2023). Macrofauna Knelpuntenanalyse v1.0: achtergrond document. Notitie Zoetwatersystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen.
- Van der Sluijs, J., 2005. Uncertainty as a monster in the science-policy interface: four coping strategies. Water Science & Technology 52(6): 87-92. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0155>
- Verberk, W.C.E.P., P.F.M. Verdonschot, T. van Haaren, T., B. van Maanen, 2012. Milieu- en habitatpreferenties van Nederlandse zoetwatermacrofauna. STOWA rapport 2012- 19. STOWA, Amersfoort.
- Wehrens, R., G. ten Broeke, H. Stigter, M. Gülpen, M. Knotters, M. Poortvliet, M. de Graaf en G. Hengeveld, 2021. Digital Twins for decision making. The uncertain half of the Twin. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 3071.

Bijlage 1 Systeemanalyse waterkwaliteit Zijdewetering

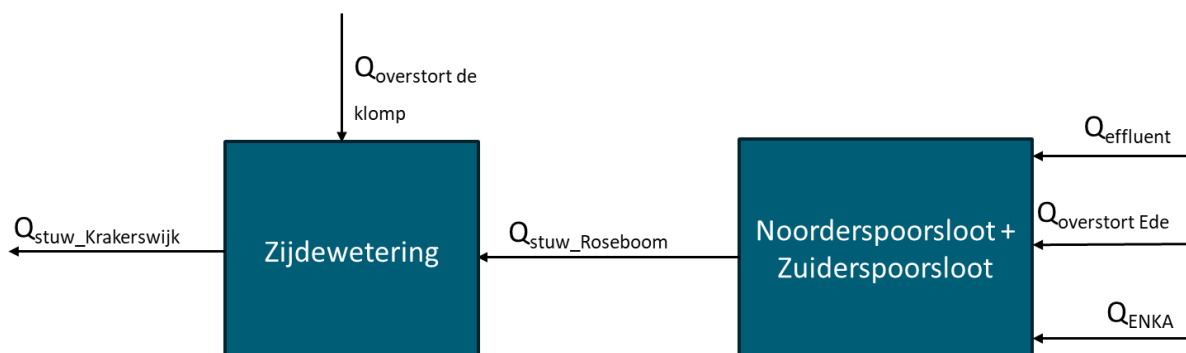
Inleiding

Op basis van bestaande metingen en kentallen is de Zijdewetering gemodelleerd. Deze modellering dient als referentiescenario. De modellering is opgezet door een combinatie van een water- en stofbalans met het ecologische model PCditch. Hierin is de water- en stofbalans gebruikt om inzicht in het systeem te verkrijgen op basis van bekende gebiedskenmerken en metingen aan debieten en stofconcentraties. De nutriëntenbelasting die in de waterbalans wordt berekend, dient als invoer voor PCditch, waarmee vervolgens aan de hand van verschillende processen de stofconcentraties in het systeem en bijbehorende ecologische respons wordt berekend. Dit is de referentiesituatie. Door het vergelijken van de berekende resultaten met metingen is het mogelijk om gebreken in data of systeemkennis te identificeren. Vervolgens is een aantal maatregelen doorberekend. Dit zijn 'theoretische maatregelen' die de digital twin heeft doorgerekend. Hiermee ontstaat een set scenario's dat met elkaar vergeleken kan worden. Door het vergelijken van deze scenario's onderling kan een eerste inzicht worden verkregen in effecten van bepaalde maatregelen.

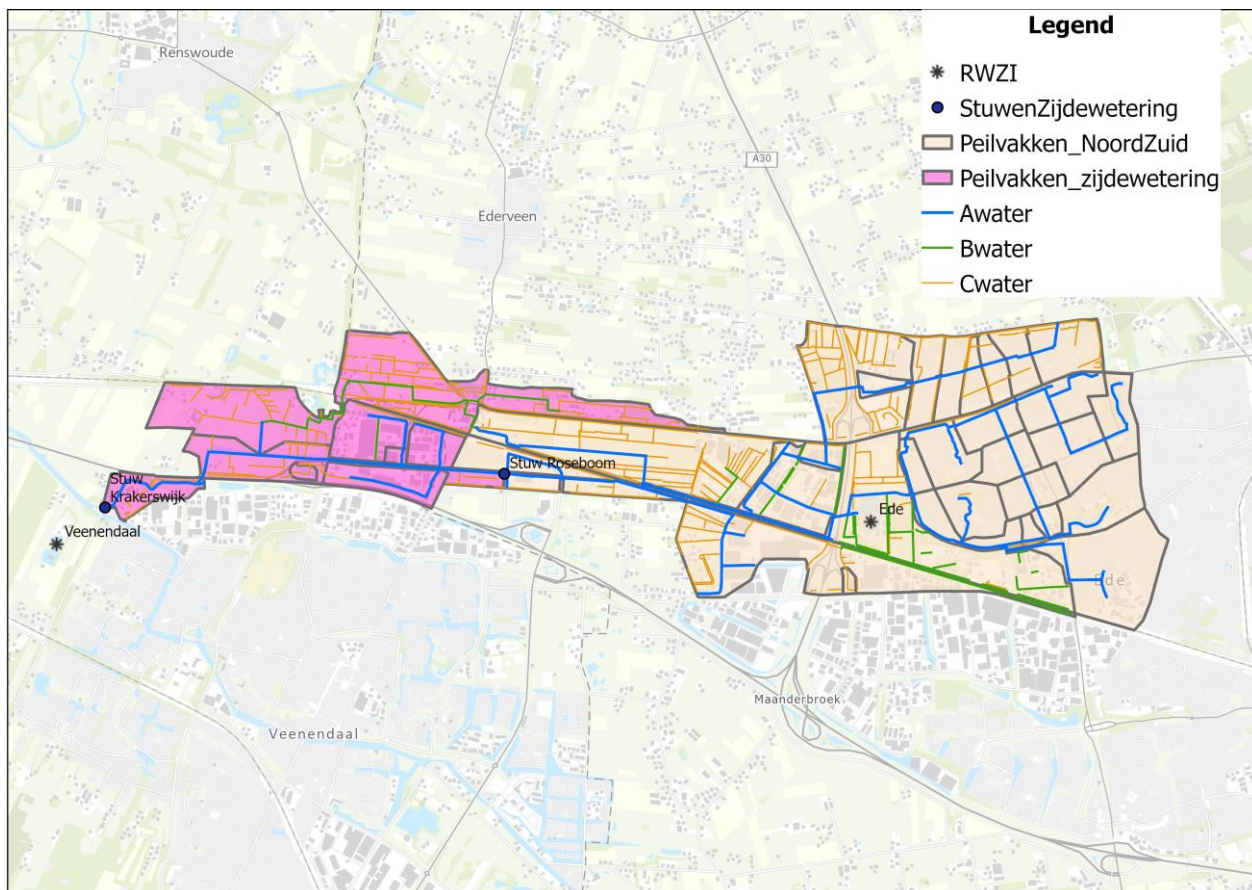
Schematisering water- en stoffenbalans

Waterbalans

De waterkwaliteit in de Zijdewetering is onder meer afhankelijk van de kwaliteit van het ingaande water. De bijdrage vanuit RWZI Ede speelt hierin een grote rol en om die rol te kwantificeren, zijn twee waterbalansen opgesteld: een balans van de Zijdewetering zelf en een balans van de Noorderspoorsloot en de Zuiderspoorsloot, de sloten langs het spoor waardoor de Zijdewetering gevoed wordt. Het effluent van RWZI Ede, evenals de overstort Ede, komen in de Noorderspoorsloot terecht. Het debiet vanuit Enka komt in de Zuiderspoorsloot terecht. Ter hoogte van stuw Hoolboom komen de Noorderspoorsloot en Zuiderspoorsloot samen in de Zijdewetering. Bovendien ontvangt de Zijdewetering een overstortdebiet vanuit de Klomp. Het afvoergebied van de Zuiderspoorsloot was zeer klein en het debiet vanuit Enka onbekend. Daarom zijn de Noorder- en Zuiderspoorsloot samengenomen in één waterbalans. Het afvoergebied is afgeleid vanuit de peilvakken vanuit de legger van Waterschap Vallei en Veluwe. Omdat er geen debietreeks beschikbaar was van stuw Hoolboom, maar wel van stuw Roseboom, is het peilvak tussen de twee stuwen meegenomen in de waterbalans van de beide spoorsloten. Dit is te zien in Figuur 45 en Figuur 46. Op deze manier kan het gemeten debiet bij stuw Roseboom als validatie dienen. De begrenzing van de Zijdewetering zelf bestaat uit de peilvakken tussen stuw Roseboom en stuw Krakerswijk, zodat in dit geval de debieten bij stuw Krakerswijk ter validatie gebruikt kunnen worden.



Figuur 45 *Blokkenschema indeling waterbalans.*



Figuur 46 Schematisering balansgebied voor de water- en stofbalans.

Stofbalans

Aan elke ingaande waterstroom in de balans worden ook stofconcentraties meegegeven, om zo de nutriëntenbelasting op het systeem te berekenen. In de referentiesituatie zijn die concentraties gebaseerd op metingen in het effluent of het ingaande water en kentallen van onder andere neerslag en uitspoeling. Voor het doorrekenen van het effect van maatregelen op de waterkwaliteit in de Zijdwetering kunnen metingen van stofconcentraties in de spoorsloot niet worden gebruikt. Door het nemen van maatregelen aan de zuivering of overstort is deze concentratie immers veranderd. De ingaande stofconcentraties voor de Zijdwetering worden in dit geval dus bepaald uit de berekende uitgaande concentraties vanuit de Spoorsloten, zoals is berekend met PCDitch. Deze methode wordt hieronder verder beschreven.

Waterkwaliteitsmodelleringen (PCDitch)

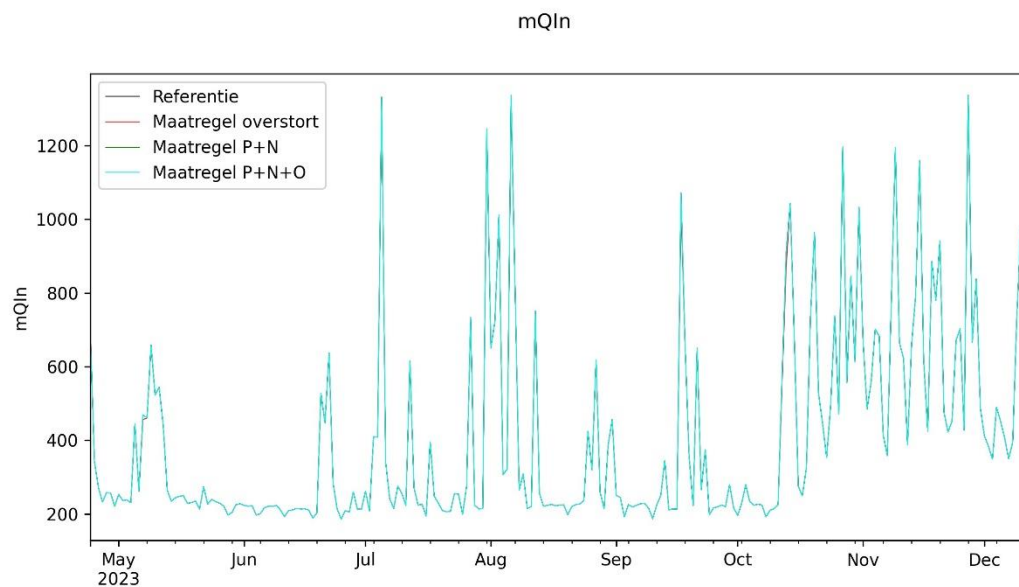
De debieten en nutriëntenbelasting uit de waterbalans worden gebruikt als invoer voor PCDitch. Vervolgens zijn deze invoeren aangepast voor de volgende maatregelenscenario's:

- Verhoging zuurstofgehalte effluent RWZI. Deze maatregel stelt een minimumconcentratie van 8 mg/L zuurstof in het effluent.
- Verlagen P-concentratie effluent RWZI. Deze maatregel stelt een maximumwaarde van 0,15 mg/L P_{tot} in het effluent.
- Verlagen N-concentratie effluent RWZI. Deze maatregel stelt een maximumwaarde van 2,2 mg/L N_{tot} in het effluent.
- Reductie overstorten Ede. Deze maatregel legt een volumereductie van 50% op aan de gemeten overstorten. De concentratie van de vuilvracht (P, N) is daarnaast met 80% gereduceerd.

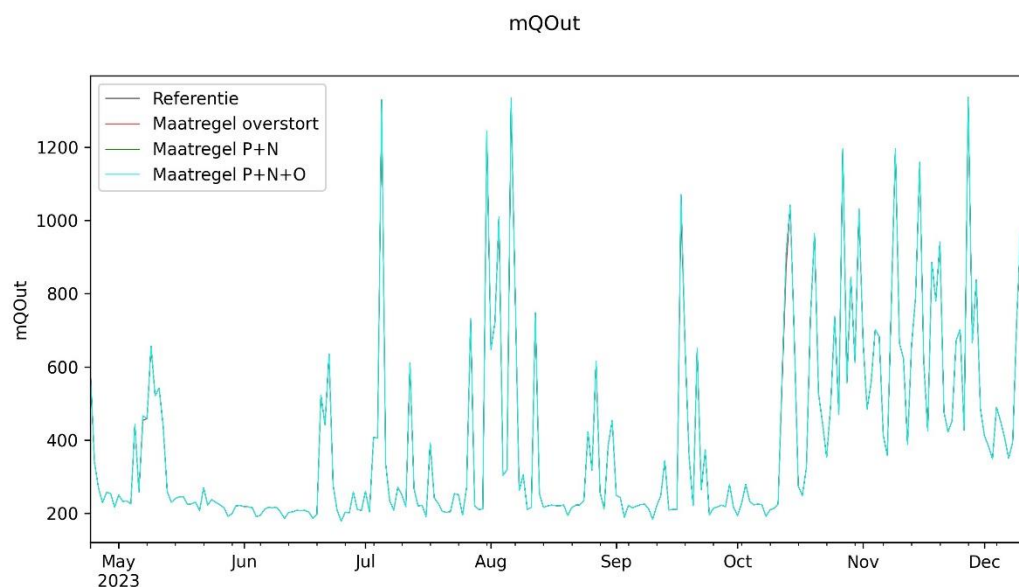
Om het aantal vergelijkingen (en visualisaties) te beperken, ligt de focus in deze rapportage met name op de volgende scenario's (ten opzichte van elkaar en de referentie):

- Scenario met de drie maatregelen op concentraties effluent RWZI
- Scenario met overstortmaatregel
- Scenario met alle maatregelen

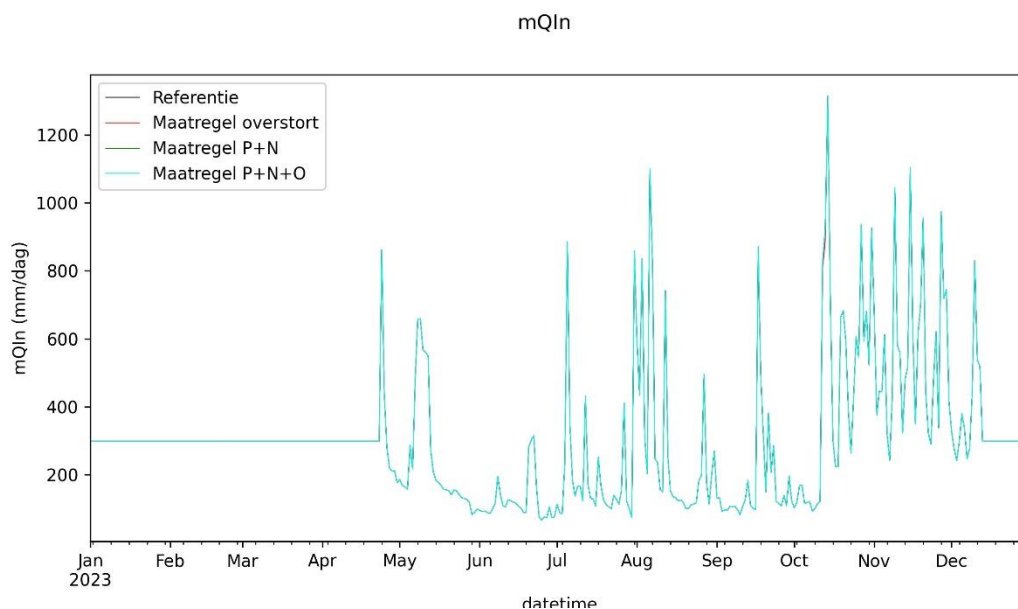
De meeste maatregelen hebben geen effect op de ingaande en uitgaande debieten van de spoorstoot en de Zijdewetering. Alleen de reductie van de overstorten in Ede heeft een zeer klein effect ten tijde van een overstort. Dit is voor de spoorstoten te zien in Figuur 47 en Figuur 48, waarin de waarden voor alle scenario's exact gelijk zijn, met uitzondering van een kleine afwijking voor "Maatregel overstort". Dit kleine verschil werkt door in de ingaande debieten voor de Zijdewetering zelf (Figuur 49 en Figuur 50).



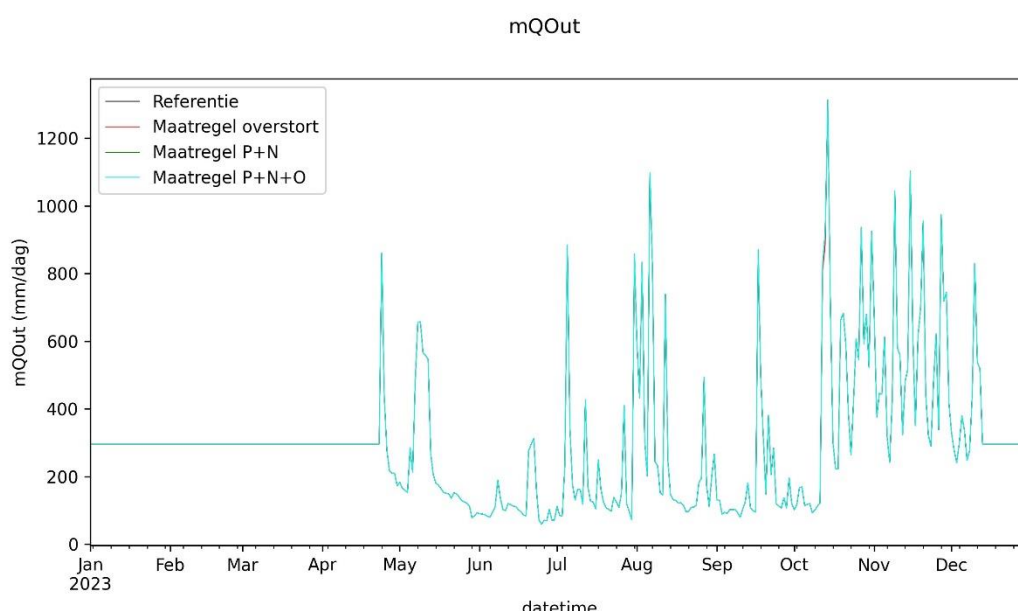
Figuur 47 Ingaande debieten van de Spoorstoten voor verschillende scenario's. De ingaande debieten blijven in alle scenario's nagenoeg gelijk.



Figuur 48 Uitgaande debieten van de Spoorstoten voor verschillende scenario's. De ingaande debieten blijven in alle scenario's nagenoeg gelijk.

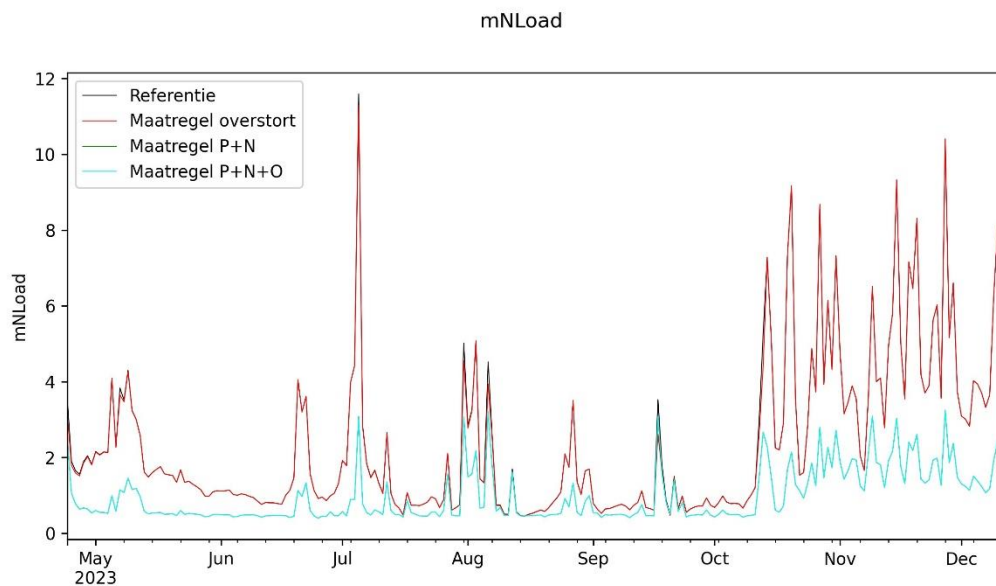


Figuur 49 Ingaande debieten van de Zijdwetering voor verschillende scenario's.

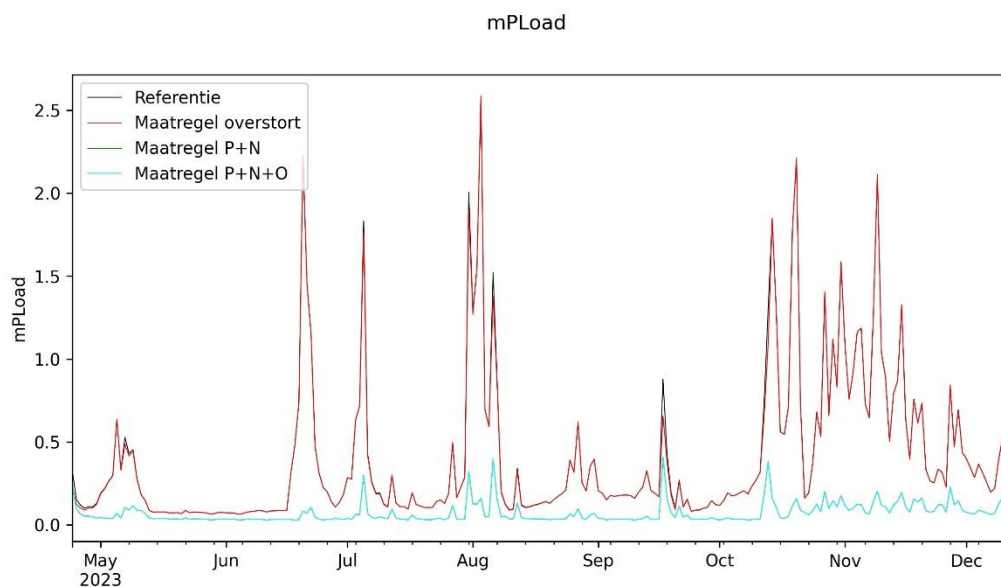


Figuur 50 Uitgaande debieten van de Zijdwetering voor verschillende scenario's.

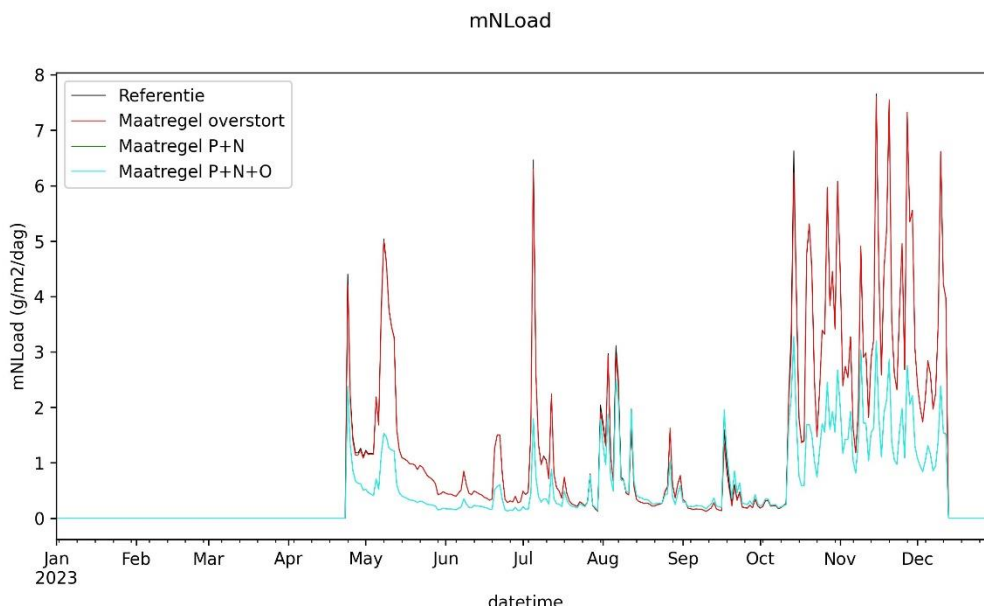
De effecten van de maatregelen op de ingaande stikstof- en fosforbelasting zijn voor de Spoorsloten weergegeven in respectievelijk Figuur 51 en Figuur 52 en voor de Zijdwetering in respectievelijk Figuur 53 en Figuur 54. Voor de maatregel overstort (rood) is er niet alleen in het debiet van de Spoorsloot een klein verschil te zien ten opzichte van de referentiesituatie (zwart), maar ook in de nutriëntenbelasting. Het effect van de maatregelen op de nutriëntenconcentraties in het effluent (groen) is groter. De maatregel op de zuurstofconcentratie (blauw) heeft geen effect op de ingaande nutriëntenbelasting.



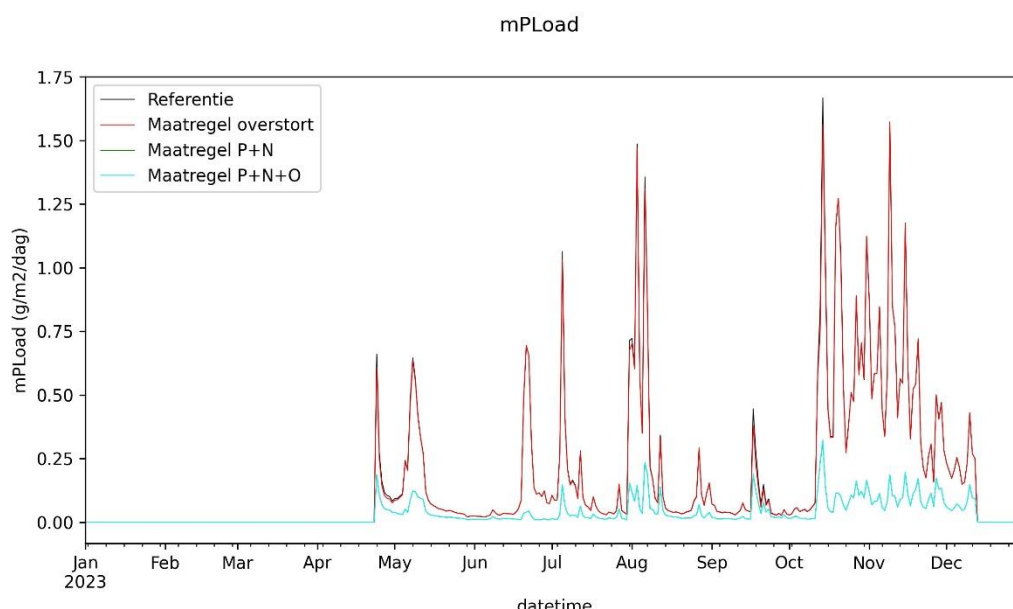
Figuur 51 Ingaande stikstofbelasting van de Spoorsloten voor verschillende scenario's.



Figuur 52 Ingaande fosforbelasting van de Spoorsloten voor verschillende scenario's.



Figuur 53 Ingaande stikstofbelasting van de Zijdegwering voor verschillende scenario's.



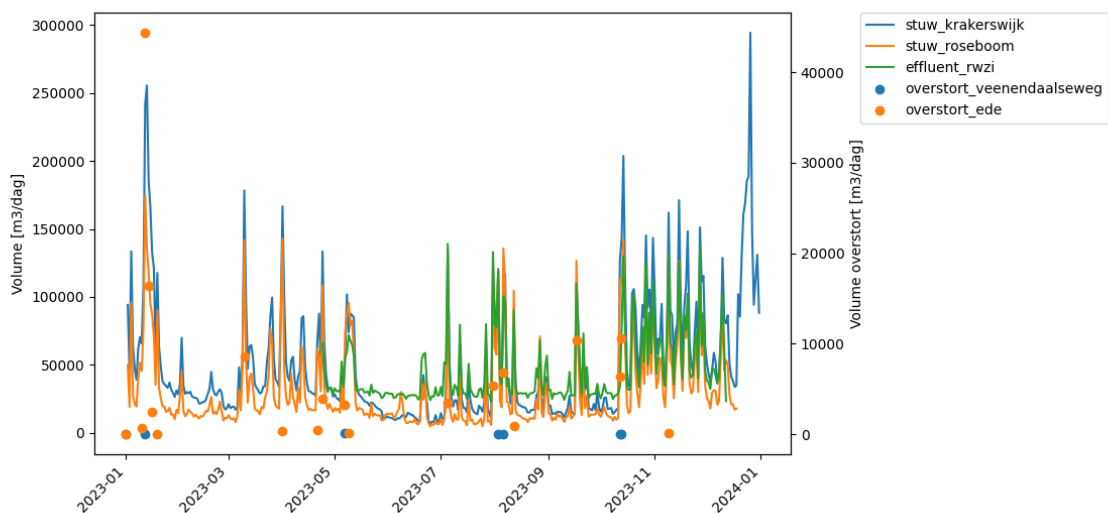
Figuur 54 Ingaande fosforbelasting van de Zijdegwering voor verschillende scenario's.

De verschillende debieten en nutriëntenbelastingen zoals hierboven zijn besproken, worden gebruikt als invoer voor de verschillende modelscenario's in PCDitch. Daarmee worden vervolgens concentraties van verschillende stoffen en de vegetatie berekend in de Spoorsloot en de Zijdegwering. Deze kunnen voor het referentiescenario worden vergeleken met de metingen, terwijl de scenario's een inzicht geven in het effect van de verschillende maatregelen.

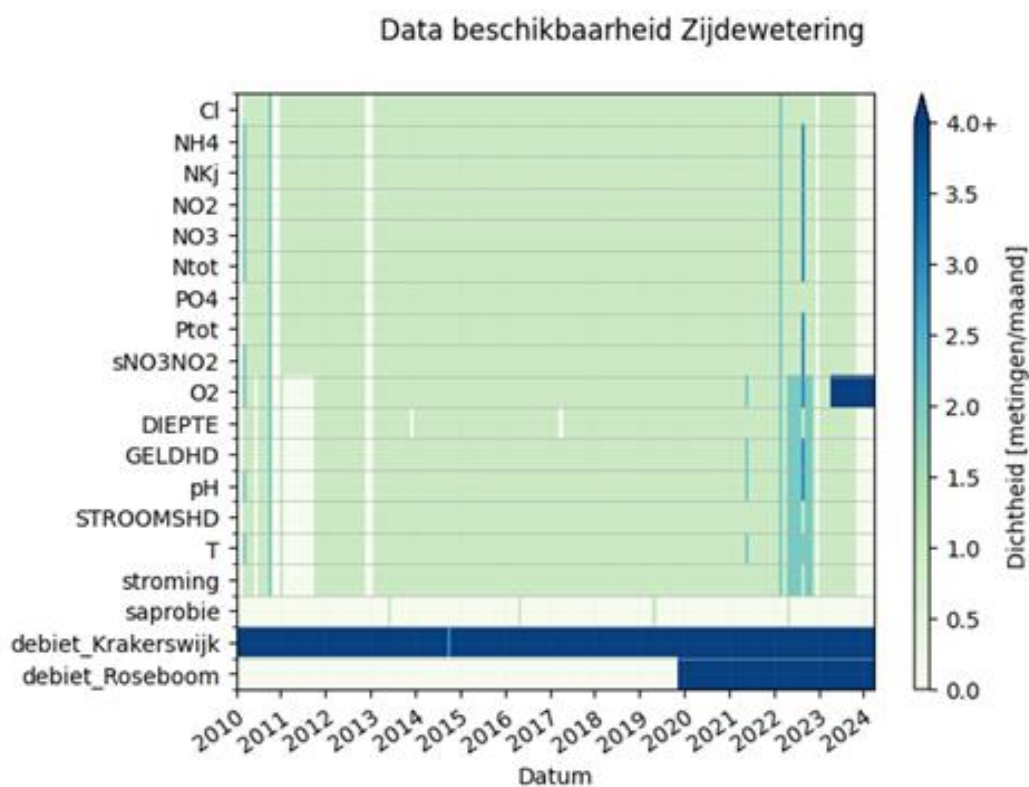
Databeschikbaarheid

Zoals ook blijkt uit het voorgaande, is de databeschikbaarheid een knelpunt voor de modellering. Sommige debieten ontbreken (Enka) en van andere zijn slechts over een beperkte tijdsperiode data beschikbaar. Om hiervan een overzicht te geven, zijn de beschikbare debieten in 2023 weergegeven in Figuur 55. Ook voor de stofconcentraties verschilt de databeschikbaarheid over de verschillende perioden.

Figuur 56 geeft een overzicht van de beschikbaarheid van de verschillende invoer over de jaren. Omdat de meeste data beschikbaar waren voor 2023, is het laatste jaar in sommige gevallen herhaald als input, om zo toch een langere periode te kunnen simuleren.



Figuur 55 Databeschikbaarheid debieten voor 2023. Merk op dat de y-assen niet gelijk zijn, de debieten behorende bij effluent RWZI (lijnen in afbeelding) zijn vele malen groter dan debiet-overstorten (bolletjes in afbeelding).



Figuur 56 Overzicht databeschikbaarheid Zijdewetering.

Berekeningen ecologische respons

Voor oppervlaktewateren is een systeem voor de beoordeling van de ecologische toestand bedacht. De staat van een oppervlaktewater wordt hierin vergeleken met een vergelijkbaar type water waar menselijke invloeden niet aanwezig zijn geweest. Dit resulteert in een score tussen de 0 en de 1, waarbij 1 de hoogst haalbare toestand aangeeft, de toestand van de referentie. Deze score wordt de Ecologische Kwaliteitsratio

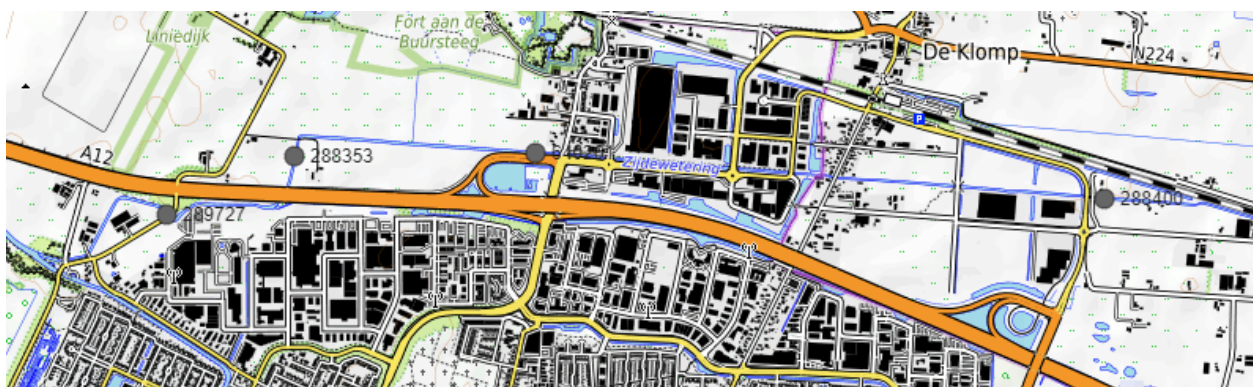
(EKR) genoemd. De score wordt ook uitgedrukt in kwaliteitsklassen: Slecht (EKR < 0,2), Ontoereikend (EKR 0,2-0,4), Matig (EKR 0,4-0,6), Goed (EKR 0,6-0,8) en Zeer goed (EKR > 0,8).

De EKR wordt berekend aan de hand van verschillende kwaliteitselementen, zoals de soortensamenstelling en abundantie van verschillende soorten planten en dieren. Deze kwaliteitselementen verschillen per watertype, omdat niet voor alle typen water dezelfde soorten als kwaliteitsindicatoren kunnen worden gezien.

Er liggen verschillende biologische meetpunten van Waterschap Vallei en Veluwe in de Zijdwetering waar in de periode 2012-2022 bemonsteringen zijn uitgevoerd van macrofauna en vis en waar vegetatieopnamen zijn gemaakt (Tabel 6, Figuur 57).

Tabel 6 Biologische meetpunten Waterschap Vallei en Veluwe in de Zijdwetering.

Locatie-code	Omschrijving meetpunt	Data bemonstering			Coördinaten meetpunt	
		macrofauna	vis	vegetatie	x	y
288400	Zijdwetering bij spoor	1/5/2013; 12/4/2022		22/7/2013; 2/7/2019; 15/6/2022	168.600	450.503
640161	Zijdwetering		11/9/2013		165.755	450.718
640261	Zijdwetering	13/4/2016; 3/4/2019	16/8/2016; 22/7/2022	2/7/2019	166.472	450.667
288353	Zijdwetering tussen zijpad Kooiweg en A12	1/5/2013; 12/4/2022		22/7/2013; 7/6/2022	165.575	450.652
289727	Zijdwetering, Veenendaal, Kooiweg	1/5/2013; 13/4/2016; 3/4/2019; 12/4/2022	16/8/2016; 21/7/2022	22/7/2013; 2/7/2019; 7/6/2022	165.098	450.436



Figuur 57 Ligging biologische meetpunten Waterschap Vallei en Veluwe in de Zijdwetering.

Ecologische kwaliteit

De Zijdwetering is binnen de systematiek van de Kaderrichtlijn water (KRW) typologisch geclassificeerd als een permanente langzaam stromende laaglandbeek op zand (KRW-type R5). In de periode 2012-2022 is de ecologische kwaliteitsratio (EKR) gebaseerd op dit watertype (gemiddelde over alle meetpunten en jaren ± 1 standaarddeviatie) voor macrofauna 0,19 (0,04), voor vis 0,01 (0,02) en voor de vegetatie 0,25 (0,15) en wordt daarmee als slecht tot ontoereikend beoordeeld ten opzichte van de referentietoestand voor watertype R5.

Macrofauna

Op basis van de milieu- en habitatpreferenties van de gevonden taxa is een knelpuntenanalyse uitgevoerd voor de parameters stroming, organische belasting en toxiciteit om een beeld te krijgen van de knelpunten voor de macrofauna in de Zijdwetering. Het inzetten op meerdere stressoren is belangrijk, omdat gewoonlijk meerdere stressoren tegelijkertijd een rol spelen en knelpunten kunnen vormen.

De berekeningen zijn uitgevoerd met de macrofaunaknelpuntentool (Van der Lee, 2023). Deze tool koppelt de taxonlijsten aan milieu- en habitatpreferenties van de macrofauna (Verberk et al., 2012) en de

gevoeligheid voor toxische stoffen (SPEAR, Liess en Van der Ohe, 2005). De aantallen zijn $\log_{10}(x+1)$ -getransformeerd om het effect van hoge dichtheden van bepaalde taxa te verminderen en de rol van taxa die weinig voorkomen te vergroten. Per monster worden daarna de verschillende knelpunten berekend als:
$$\text{Score knelpunt} = \frac{\sum (\text{Abundantie } i * \text{milieupreferentiescores } i)}{\sum (\text{Abundantie } i)},$$
waarbij i alle taxa zijn waarvoor een milieupreferentiescore bekend is.

Om de scores te iken, is voor ieder meetpunt in de beschikbare waterschapsdata een gemiddelde score over alle meetjaren berekend. Vervolgens is per watertype de score geijkt naar 0 tot 1 op basis van de 5%- en 95%-percentielen. Omdat de waarden voor oever en stroming zijn gebaseerd op positieve milieupreferenties, is voor deze knelpunten de score omgedraaid.

Vegetatie

Op basis van de indicatiewaarde voedselrijkdom kan een koppeling worden gemaakt met de belasting van de Zijdewetering met voedingsstoffen vanuit het effluent. Hiervoor is de indicatortabel van het CBS (1993) gebruikt (parameter voedsel_min, voedsel_max). Eerst zijn de bedekkingen op basis van de STOWA-Tansleyschaal voor vegetatieopnamen in watergangen omgezet naar de drie bedekkingsklassen zoals die in de KRW-maatlatten gehanteerd worden:

- bedekkingsklasse STOWA-Tansley 1-3 = 1 zeldzaam/schaars
- 4-7 = 2 frequent/plaatselijk
- 8-9 = 3 algemeen/dominant

Niet alle soorten in de vegetatieopnamen zijn water- en oeverplanten. Daarom is vervolgens op basis van de parameter vocht_min (categorie ≤ 2 ; CBS, 1993) een selectie uitgevoerd. Na deze selectie bleven er in totaal 56 soorten water- en oeverplanten over. Van deze soorten is de bandbreedte voor de parameter trofie bepaald via:

$$\text{Score knelpunt trofie} = \frac{\sum (\text{bedekkingsklasse } i * \text{voedsel_x score } i)}{\sum (\text{bedekkingsklasse } i)},$$
waarbij i alle taxa zijn waarvoor een milieu-preferentiescore bekend is.

Vertaling naar digital twin

Parameters voor koppeling ecologie in waterkwaliteitsmodel

Voor macrofauna zijn de parameters stroomsnelheid en organische belasting gebruikt als basis van de modellering (naar Verberk et al., 2012), voor vegetatie de parameter trofie (naar CBS, 1994). Vis is niet opgenomen in het model.

Macrofauna, stroomsnelheid, klassen:

1. stilstaand (< 5 cm/s)
2. zeer langzaam stromend (5-9 cm/s)
3. langzaam stromend (10-15 cm/s)
4. matig stromend (16-25 cm/s)
5. snel stromend (> 25 cm/s)

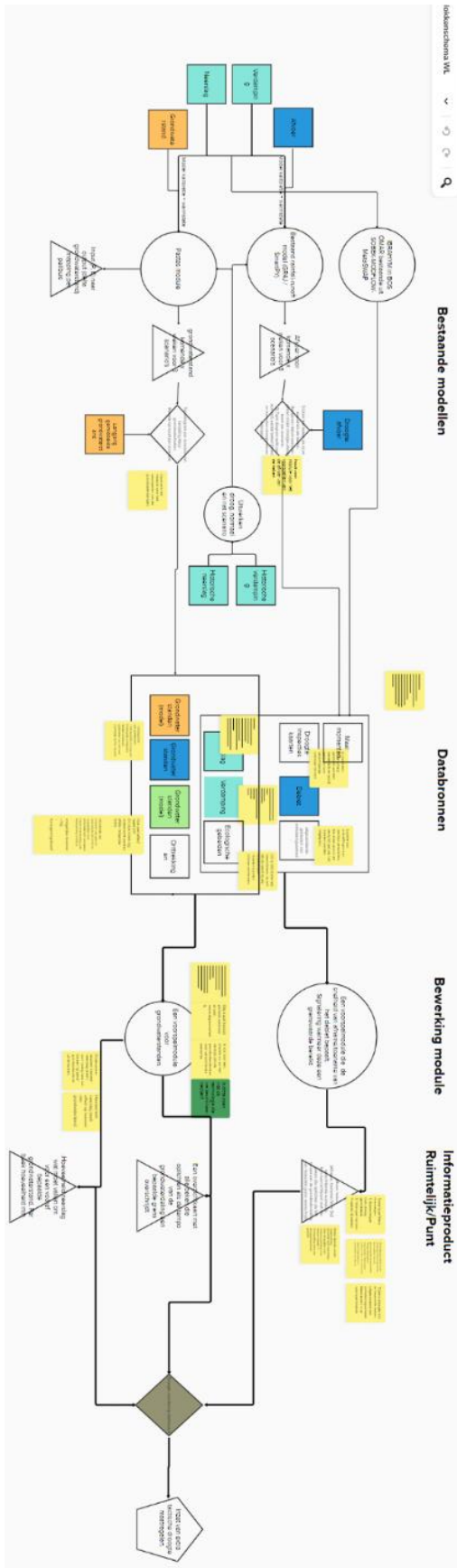
Macrofauna, saprobie, klassen:

1. oligosaproob ($< 0,1$ mg NH₄/L / > 8 mg O₂/L / < 1 mg BZV/L)
2. beta-mesosaproob (0,1-0,5 mg NH₄/L / 6-8 mg O₂/L / 1-5 mg BZV/L)
3. alfa-mesosaproob (0,5-4,0 mg NH₄/L / 2-6 mg O₂/L / 5-13 mg BZV/L)
4. polysaproob ($> 4,0$ mg NH₄/L / < 2 mg O₂/L / > 13 mg BZV/L)

Vegetatie, trofie, klassen:

1. oligotroof ($< 0,3$ kg drooggewicht/m²)
2. mesotroof (0,3-0,6 kg drooggewicht/m²)
3. eutroof ($> 0,6$ kg drooggewicht/m²)

Bijlage 2 Architectuur datastromen en modellen thema Droogte



Bijlage 3 Serious game over vertrouwen in de Digital Twin: voorbeelden van de spelmaterialen (scenario, rollenkaart en stemkaart)



Scenario 1

Achtergrond

Waterschap Vallei & Veluwe heeft onlangs een digital twin in gebruik genomen. Dit is een computermodel waarmee de waterstanden en interactie van het grondwater, oppervlaktewater en weersinvloeden binnen ons gebied kunnen worden berekend en voorspeld. Ook kan het effect van mogelijke acties door het waterschap ingeschat worden. Zie het blad De 'Digital Twin Waterbeheer' voor een nadere uitleg.

Het is maart. Na een droge zomer en winter zijn de waterstanden veel lager dan normaal rond deze tijd. In vorige jaren was in maart altijd sprake van een goed gevuld oppervlaktewatersysteem. Dit jaar is de situatie zoals afgebeeld op de Gebiedskaart. In jaren met normale regenval is er voldoende water in het gebied en zijn de meeste beken goed gevuld. De situatie nu is heel anders: vele beken staan bijna of geheel droog.

Weerbericht

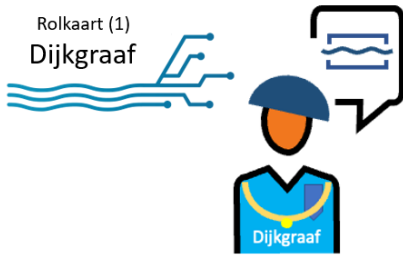
De lange-termijnprognose laat zien dat een groot neerslaggebied op ons afkomt.



Advies 'digital twin Waterbeheer'

Het standaardprotocol bij zo'n neerslagverwachting is het verlagen van de stuwen om de afvoercapaciteit te verhogen. Op basis van de huidige waterstanden en het weerbericht adviseert de digital twin de stuwen niet te verlagen waardoor het water blijft staan. De voorspelling is dat hierdoor in het hele gebied de waterstanden op peil komen en dat er daarmee een goede buffer wordt gevormd voor de steeds drogere zomers. Zonder neerslag in de komende weken is het onzeker of de watervoorraad voor de zomer voldoende kan worden aangevuld. Waterstanden op peil hebben onder meer veel invloed op de ecologie van De Veluwe, één van de belangrijkste natuurgebieden van Nederland. De digital twin geeft wel aan dat er bij dit beleid een kans is op wateroverlast in Apeldoorn, zoals op de foto's te zien.

Rolkaart (1)
Dijkgraaf



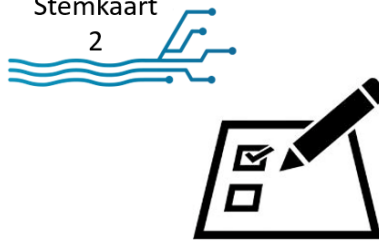
Dijkgraaf

De dijkgraaf stuurt de discussie van de adviseurs. Het is jouw taak om dit team een afgewogen besluit te laten nemen. Het is van belang de verschillende aandachtsgebieden mee te nemen. Ook speelt bestuurlijke polarisatie een rol (denk aan de BoerBurgerBeweging en de Partij voor de Dieren). Daarnaast is er intern bij het waterschap twijfel over de rol van een digital twin.

Na elke ronde vraagt de voorzitter aan iedereen een stem uit te brengen tot welke actie er moet worden besloten. Bij een gelijk aantal stemmen is de stem van de dijkgraaf beslissend.

De dijkgraaf zorgt ervoor dat de argumenten worden genoteerd op argumentkaarten.

Stemkaart
2



Negeer het advies van de DT en
vertrouw op de experts

Maximaal water afvoeren
naar de IJssel om
overlast nu te voorkomen

Bijlage 4 Samenvatting van de afsluitende evaluatie van de Droogte-dashboards

Droogte-dashboard Waterschap Limburg

Bij de start van het digital-twin-project had Waterschap Limburg bepaalde eisen en verwachtingen voor het dashboard. Hoewel niet volledig, voldoet het dashboard grotendeels aan deze eisen. Het bevat echter geen informatie over bepaalde maatregelen (zoals onttrekkingsverboden), omdat hiervoor onvoldoende data beschikbaar zijn.

Belangrijkste functies en toegevoegde waarde:

- Het dashboard biedt langetermijnvoorspellingen van droogval (4, 8, en 12 weken), uniek in vergelijking met bestaande informatie.
- Vooral nuttig voor inzicht in grondwaterstanden, omdat deze minder direct beïnvloed worden door regen dan beekafvoer.

Afwijkingen van de oorspronkelijke plannen:

- Beperkte datatoegang verhinderde het opnemen van effecten van specifieke maatregelen.
- Tijdslimieten in het project beperkten de diepgang.

Gebruik en relevantie:

- Het dashboard werd in 2024 niet gebruikt door het regieteam Droogte vanwege de natte omstandigheden. Daardoor kan geen uitspraak worden gedaan over de mate van bruikbaarheid.
- Het wordt als nuttig beschouwd voor toekomstverwachtingen, maar nog niet voor externe communicatie.
- Het ontwikkelproces heeft baat gehad bij het vroegtijdig bepalen van vragen en gebruikersbehoeften, wat achteraf als zeer waardevol werd ervaren. Hoewel het aanvankelijk vreemd leek om zo vroeg te focussen op vragen en gebruikersgroepen, bleek deze aanpak richting te geven en droeg deze eraan bij het uiteindelijke doel in het oog te houden. Deze vroege aandacht voor de besluitvormingsbehoeften leidde tot een nuttig inzicht: bij waterschappen spelen vaak niet-objectieve factoren, zoals imagoschade en belangenconflicten, een rol bij beslissingen. Door dit in het ontwikkelproces te adresseren, ontstond ruimte voor een meer objectieve besluitvorming. Dit proces werd als leerzaam ervaren en biedt groeipotentieel voor toekomstig gebruik van objectieve tools in besluitvorming.
- Gebruiksvriendelijkheid en visualisaties zijn verbeterd sinds de 'walkthrough' in het voorjaar, met nieuwe functies zoals toggles voor kaartlagen en een intuïtiever ontwerp.

Toekomstige verbeteringen en aanbevelingen:

- In de toekomst zou het nuttig zijn om droogte-effecten ook visueel in economische schade (bijv. aan gewassen) weer te geven.
- Zo mogelijk ruimtelijk gebiedsdekkende kaart tonen i.p.v. losse puntjes.
- Prioritering bij droogval vanwege kwetsbaarheid gebied zichtbaar maken.
- Het valideren van voorspellingen met de recent verzamelde gegevens wordt als belangrijk verbeterpunt genoemd.

Droogte-dashboard Waterschap Vallei en Veluwe

Projectkader en verwachtingen:

- Bij de start was er geen duidelijke casus, maar dit ontwikkelde zich gaandeweg. Workshops hebben geleid tot een casusbeschrijving voor een peilbeheerder (digital twin) en agrariër (voor project Digiflow).
- Het dashboard biedt inzichten, maar voldoet niet aan de verwachtingen:
 - Positief: Mogelijkheden voor bodemvochtvoorspellingen zijn inzichtelijk gemaakt.
 - Minimaal: Te beperkt qua locaties en gebruik, onvoldoende aansluiting bij oorspronkelijke doelen.

Afwijkingen van plannen:

- Redenen:
 - Data en menselijke capaciteit ontbraken.
 - Gebrek aan data en verbindingsproblemen met beschikbare datasets.
 - Onvoldoende eigenaarschap en duidelijkheid over rollen en verantwoordelijkheden in de ontwikkeling.
 - Ambitie en tijdsplanning niet in balans.

Gebruik in de praktijk:

- Het dashboard speelt momenteel geen rol bij droogtebesprekingen vanwege beperkte functionaliteit en actualiteit.

Procesbeoordeling:

- Sterke punten:
 - Workshop droeg bij aan helderheid over gebruikerswensen.
 - Er is geleerd over digital twin-ontwikkeling.
- Verbeterpunten:
 - Geen continuïteit na workshops, weinig tussentijdse communicatie.
 - Scope en haalbaarheid waren vanaf het begin onduidelijk.
 - Te veel losse groepen en partners, zonder centrale regie.

Beoordeling dashboard:

- Informatie:
 - Positief: Betrouwbaarheidsbanden aanwezig, maar context hiervan onduidelijk.
 - Negatief: Niet gebiedsdekkend, beperkte duiding van data en grafieken.
 - Technische details in uitleg maken het ongeschikt voor beoogde gebruikers.
- Functionaliteit:
 - Synchroon zoomen en interactieve meetpunten ontbreken.
- Presentatie:
 - Kleuren, schaal en legenda kunnen verbeterd worden voor duidelijkheid.

Aanbevelingen:

- Verbeterpunten:
 - Voorspellingen op basis van weersverwachtingen integreren.
 - Meer statusupdates en tijdige escalatie bij problemen.
 - Heldere rolverdeling en betere voortgangsbewaking.
- Te behouden:
 - Toelichting op data en betrouwbaarheid.
 - Lessen over digital twin-ontwikkeling meenemen.

Conclusie:

Hoewel het project waardevolle inzichten heeft opgeleverd, zijn ambitie, organisatie en afstemming met gebruikers kritieke aandachtspunten. Voor toekomstige projecten wordt aanbevolen eerder een duidelijke scope en regie te realiseren en tussentijdse evaluaties systematisch in te plannen.

Bijlage 5 Overzichtsvisualisatie Digital Twin Waterkwaliteit

Totstandkoming van de visualisatie

De cursieve delen van de tekst zijn tekstblokken uit de totaalvisualisatie die in deze bijlage wordt toegelicht. *De Zijdewetering dient als afwatering van de rioolwaterzuiveringsinstallatie Ede. Afvalwater uit Ede en de omliggende dorpen wordt via gemalen naar de zuivering gepompt. Het gezuiverde water (effluent) wordt geloosd op de Zijdewetering die uiteindelijk uitmondt in het Valleikanaal.*

Onder de druk van afvalstoffen en nutriënten in het afvalwater is het al jaren slecht gesteld met de ecologie in het gebied. Vooral in de zomer, als de hogere temperatuur en hogere zuurgraad ervoor zorgen dat meer ammonium wordt omgezet in ammoniak, hebben flora en fauna het zwaar te verduren.

Met behulp van een interactieve visualisatie is de situatie stap voor stap uitgelegd. Daarbij worden de volgende stappen gevolgd, volgens het DPSIR-model (Driver, Pressure, Stressor, Impact, Response). De drivers en pressures zijn in dit geval de productie van rioolwater door de inwoners van de omgeving Ede en de lozing van effluent op de Zijdewetering. Deze factoren nemen in druk toe wanneer er veel neerslag is en overstorten plaatsvinden:

De problemen verergeren bij hevige regenbuien. Regenwater wordt via regenpijpen en putten afgevoerd naar het riool en zo samen met het afvalwater uit huishoudens en industrie naar de zuivering getransporteerd.

De zuivering krijgt zo veel meer water te verwerken, waardoor het water sneller door het systeem geleid moet worden en minder goed gezuiverd kan worden. Hierdoor komen meer afvalstoffen in de Zijdewetering terecht.

Bij extreme neerslag kan het gebeuren dat de zuivering de hoeveelheid aanvoer niet kan verwerken. In dat geval kan er ongezuiverd rioolwater direct geloosd worden op de Zijdewetering. Dit zorgt ervoor dat daar nog meer afvalstoffen terechtkomen.

Dit leidt ertoe dat het waterlichaam stress ondervindt. Deze is uit te drukken in de fysisch-chemische waarden, bijvoorbeeld de zuurstofconcentratie en de concentratie ammonium.

De impact van deze milieucondities is te zien aan de slechte ecologische status, die kan worden uitgedrukt in de ecologische kwaliteitsratio, en in stresscores voor specifieke knelpunten als stroming, organische belasting en toxiciteit (zie ook toelichting Ecologie van de Zijdewetering):

Al is deze situatie slechts tijdelijk, het kan desastreuze gevolgen hebben voor de planten en dieren in de Zijdewetering. De grenzen van leefbare zuurstof- en ammoniumwaarden worden dan overschreden. Een organisme kan immers maar één keer doodgaan. Dit is te zien in de slechte ecologische status van de Zijdewetering.

Ook in de rioolsystemen zelf kan een overschot aan afvalwater ontstaan. Dat kan dan geloosd worden op overstortplekken in de woonkernen zelf, bijvoorbeeld in sloten of vijvers.

Om de ecologische status te verbeteren, kunnen maatregelen worden genomen (response):

Een maatregel die kan bijdragen aan het verminderen van de problemen in de Zijdewetering is het afkoppelen van de afvoer van hemelwater. Bewoners kunnen regentonnen plaatsen, putten in de bestrating kunnen aangesloten worden op infiltratieputten of via een tweede rioolbuis hemelwater apart afvoeren. Hierdoor kunnen de aanvoerpieken bij hevige neerslag sterk verminderd worden en is overstorten niet nodig. Voor deze maatregelen is de inzet van de gemeente noodzakelijk.

De visualisatie vertelt hiermee het oorzakelijke verhaal dat de toestand van de Zijdwetering verklaart.

Het waterschap heeft een intern dashboard ontwikkeld dat op basis van de gegevens van een aantal meetpunten en berekeningen de waterkwaliteit in de Zijdwetering kan monitoren (Figuur 1). Hieraan is duidelijk te zien dat zeer regelmatig gevaarlijke grenzen worden overschreden van zuurstoftekort en toxiciteit.

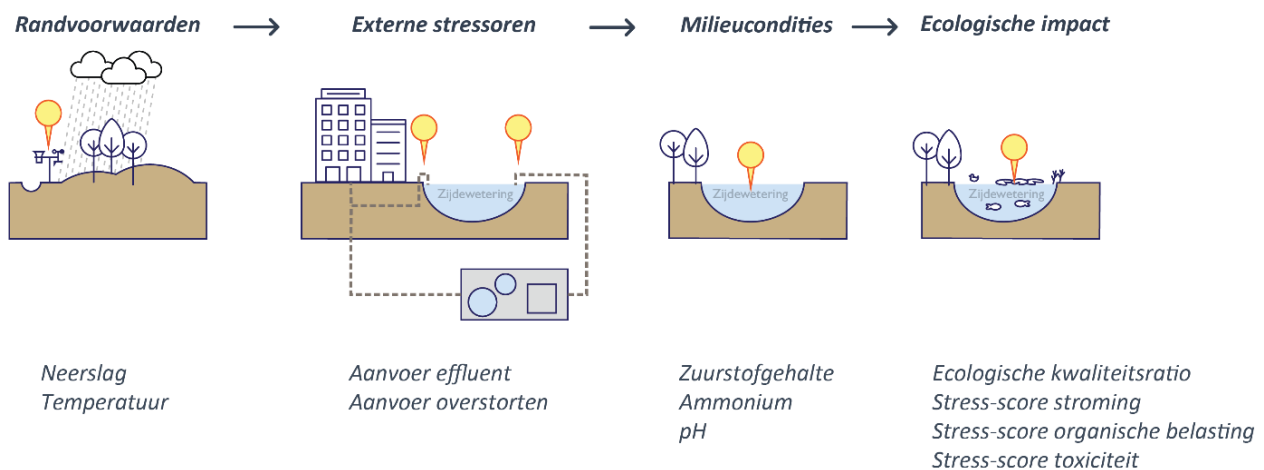
In het kader van het digital twin-project hebben Witteveen & Bos een model ontwikkeld dat de situatie kan simuleren. Hiermee kan de effectiviteit van verschillende maatregelen worden berekend.

Voorbeeldscenario: Om de gemeente te overtuigen, gebruiken medewerkers van het waterschap het dashboard om de gevolgen van het overstorten op de waterkwaliteit duidelijk aan te tonen. Met het model wordt berekend hoe de situatie zou kunnen verbeteren door het afkoppelen van 30% van het hemelwater in de woonkernen. Met deze informatie stapt het waterschap naar de gemeente om het belang van afkoppelen nogmaals te benadrukken en haar zo te stimuleren om op meer plaatsen maatregelen door te voeren.

Toelichting bij totaalvisualisatie: ecologie van de Zijdwetering

De ecologische toestand van de Zijdwetering wordt **als slecht tot ontoereikend** beoordeeld (KRW factsheet, 2024). In de periode 2012-2022 is de ecologische kwaliteitsratio (EKR, 0-1) gebaseerd op dit watertype voor macrofauna 0.19, voor vis 0.01 en voor de vegetatie 0.25.

Waarom is dit zo? Om meer inzicht te krijgen in de **redenen voor de lage ecologische kwaliteit**, kunnen we de **oorzakelijke keten** doorlopen (Figuur 58). De **randvoorwaarden** van het systeem worden gevormd door de statische toestand, waartoe bodemtype en verhang behoren, en de veranderlijke neerslag en temperatuur. **Externe stressoren** die op het systeem werken, zijn afvoer uit overstorten en effluent uit de rioolwaterzuivering. Deze stressoren beïnvloeden de **milieucondities** in het water, waaronder de zuurstofverzadiging, het fosfaatgehalte en de concentratie ammonium. De **ecologische impact** kan worden uitgedrukt in een ecologische kwaliteitsratio en in stresscores voor specifieke knelpunten als stroming, organische belasting en toxiciteit.

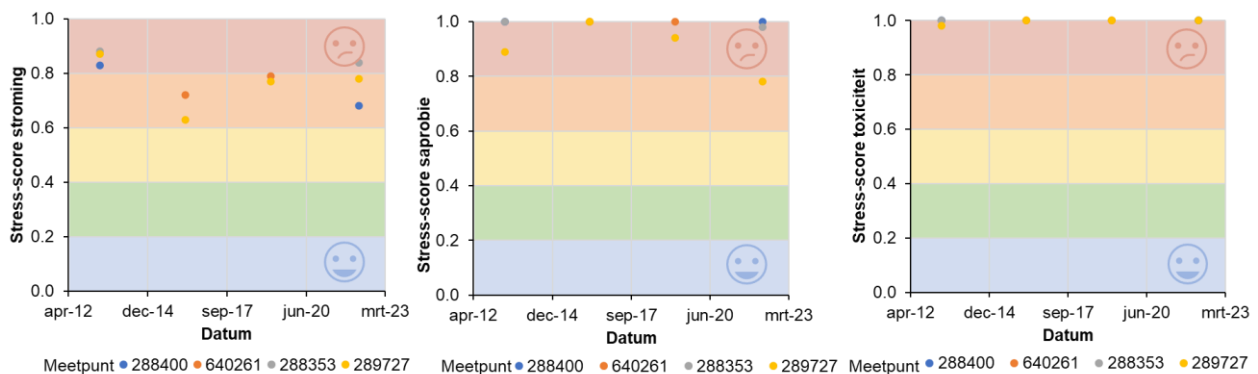


Figuur 58 De oorzakelijke keten geeft inzicht in de redenen voor de slechte ecologische toestand. Met gele pins zijn de gemeten toestanden aangeduid. Elk van deze punten representeert meetgegevens die in meer detail kunnen worden weergegeven op een dynamisch dashboard en met statische figuren.

De voeding van de Zijdwetering bestaat uit een groot deel uit **effluent** vanuit de rioolwaterzuivering in Ede. Wanneer er een **neerslagpiek** optreedt, kan het zijn dat het riool overbelast raakt en niet alle neerslag naar de rioolwaterzuivering kan sturen. In zo'n geval treden er **overstorten** op: directe lozingen van het riool op het oppervlaktewater. Met dit ongezuiverde water ontvangt het oppervlaktewater een overmaat aan nutriënten en toxische stoffen. Om deze organisch belasting af te breken, wordt de zuurstofvraag hoog en daalt het **zuurstofgehalte** in het water. Ook kunnen er hoge **ammoniumconcentraties** optreden. In

combinatie met een hoge **temperatuur** en een hoge **pH** kan dat er zelfs voor zorgen dat dit in het toxische ammoniak wordt omgezet.

Deze milieuomstandigheden zijn knelpunten voor de ecologie van de Zijdwetering. Dat is te zien in de **EKR-score**. We krijgen meer inzicht door te kijken naar de milieupreferenties en daarop gebaseerde stresscores van de organismen die in het water leven. Voor macrofauna is de parameter **stroming** een continu knelpunt, waarschijnlijk door lage en door het instroomeffluent soms sterk wisselende stroomsnelheid. De **organische belasting** is ook een knelpunt, wat wil zeggen dat er lage zuurstofconcentraties en hoge ammoniumconcentraties kunnen optreden. De factor **toxiciteit** laat ook slechte stresscores zien. Tezamen laat dit zien dat er een multi-stresssituatie aanwezig is voor de levensgemeenschap in de Zijdwetering, zie Figuur 59 en Figuur 60.

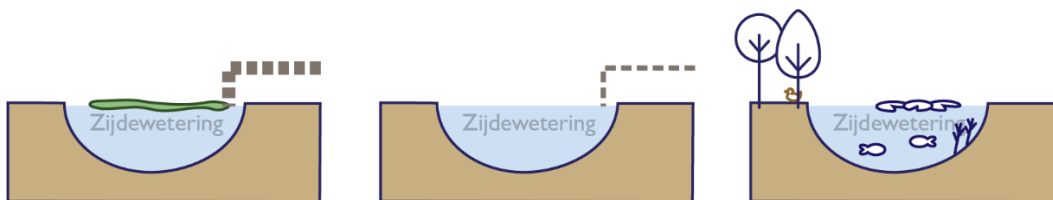


Figuur 59 Stressorscores voor de levensgemeenschap in de Zijdwetering, voor de knelpunten stroming, saprobie (organische belasting) en toxiciteit.



Figuur 60 Stressorscores voor de levensgemeenschap in de Zijdwetering, voor de knelpunten stroming, saprobie (organische belasting) en toxiciteit, weergegeven in het interne dashboard.

Er zijn enkele **maatregelopties** geschetst, in samenspraak met Waterschap Vallei en Veluwe, om de ecologische toestand van de Zijdwetering te verbeteren (Figuur 61). Deze omvatten 1) het verhogen van het zuurstofgehalte en het verlagen van concentraties nutriënten in de effluent van de rioolwaterzuivering, 2) het reduceren van het volume en de vuilvracht van overstorten in Ede en 3) een combinatie van beide opties. Door Witteveen & Bos is een model opgezet dat het systeem van de Zijdwetering simuleert. De effecten van de maatregelen op de zuurstofverzadiging, het fosfaatgehalte en de concentratie ammonium en ammoniak kunnen zo worden berekend.



Figuur 61 Ecologische toestand in de Zijdewetering, voor de huidige situatie (links), voor een situatie met een verlaagd volume overstorten en een verbeterde kwaliteit van het effluent (midden) en een ideale situatie (rechts) met een lagere toxische en organische belasting door minimale instroom vanuit overstorten en rioolwaterzuivering, beschaduwing en een herstelde levensgemeenschap.

Bronvermelding

KRW factsheet Zijdewetering (2024) <https://www.waterkwaliteitsportaal.nl/krw-factsheets>

Bijlage 6 Doorloop ('walkthrough') Droogte-dashboard Waterschap Limburg

25/04/2024

De evaluatie door een walkthrough of doorloop is uitgevoerd door een lid van de groep Visualisatie & Besluitvorming, de developer van het dashboard en een vertegenwoordiger van Waterschap Limburg. Deze is als poefpersoon gekozen, omdat zij een representatieve gebruiker is en sinds een halfjaar niet meer betrokken was geweest bij de dashboardontwikkeling.

Vooraf heeft de projectleider van het waterschap twee vragen opgesteld die als uitgangspunt dienen voor de proefpersoon (hierna 'deelnemer' bij het gebruik van het dashboard, een eenvoudige en een moeilijker te beantwoorden vraag:

1. Kan aan de hand van de scenario's een indicatie worden gegeven of en wanneer voor de grote Molenbeek grootschalige droogval aan de orde is?
2. In welke mate worden grondwaterstanddalingen verwacht in een extreem droog scenario? En hoe verhouden deze zich tot andere natte (2016, 2021) of juist droge jaren (2018, 2019)? Tevens is de bestuurder benieuwd of er sprake is van een generieke daling of dat droogte-effect vooral lokaal optreedt.

Procedure

1. We leggen uit wat de 'hardop denk-methode' inhoudt: zo veel mogelijk formuleren wat je waarneemt, hoe je stapsgewijs je informatie zoekt, waarom bepaalde onderdelen van de interface daarbij behulpzaam zijn, wat er onduidelijk is, waarom je een bepaalde actie onderneemt (ergens op klikken) en of er dan gebeurt wat je verwacht.
2. We vragen de deelnemer zich in te leven in de situatie waarin vraag 1 (use case) zich voordoet; en sporen haar aan om eerlijk en kritisch te zijn. Alles mag worden gezegd.
3. Ze deelt haar scherm en start het dashboard op.
4. Vanaf dat moment gaat ze 'hardop denken': ze zegt wat ze ziet, wat haar als eerste opvalt aan het dashboard, en waar ze voor haar zoekvraag naar gaat kijken en waarom, en probeert de informatie te vinden. Besprekingen hoe iets anders zou kunnen, worden geparkeerd tot na de doorloop.
5. De developer en ik maken aantekeningen van haar acties en opmerkingen. We geven geen feedback en stellen geen vragen tot na de tweede vraag/use case.
6. Dezelfde procedure voor vraag 2 (use case).
7. Na afloop bespreken we de punten waar de deelnemer tegenaan liep of opmerkingen over maakte; en bespreken we andere oplossingen. Ook wat wel moet blijven.

De deelnemer neemt de eerste vraag (use case) in gedachten. Ze deelt haar scherm en start het dashboard op.

- Het inloggen duurt lang, wat verwarring oplevert of het goed is gegaan.
- Ze kijkt in de balk rechtsboven; daar staat 'Welkom ...' Maar ziet dan de optie uitloggen, wat ze niet verwacht.
- Omdat ze niet goed weet waar te starten, klikt ze op grondwaterbeeld.
- Het laden duurt lang.
- Ze stelt voor eerst een beetje rond te kijken op het dashboard voor ze de vraag probeert te beantwoorden.
- Ze herkent de vier kaarten. Ze geeft aan de peilbuizen uit de Grote Molenbeek te zien op de kaart, ze herkent de nummers. Ze vermoedt dat ze in de andere kaarten peilbuizen ziet voor de verwachtingen.
- Ze vraagt zich af welke selectie van peilbuizen ze ziet – weet niet wat het zijn.
- Ze zoekt legenda bij de kaarten en de iconen. Omdat ze die niet vindt, klikt ze maar op 'open lagen'. Gedurende enige tijd wordt alles grijs – vertraging door het laden.
- Ze geeft aan uit ervaring met andere dashboards aan de linkerhand menu's te verwachten, dus daar zocht ze naar.
- Ze kiest bij achtergrondkaarten 'prioritering bij droogval', die lijkt interessant. Maar als ze teruggaat naar de kaarten, verschijnt deze niet. (De developer legt uit: de laag is nog niet geüpdatet.)
- Ze kiest nu Landgebruik. Zoomt in.

- Opnieuw mist ze de legenda en kan deze niet vinden.
- Ze begrijpt dat het handig is om die ondergrondkaarten alleen bij de eerste twee te tonen – dat maakt het beeld rustiger en evengoed bruikbaar.
- Ze zou als ondergrond wel een luchtfoto willen hebben. Door de actuele en meer nauwkeurige informatie over bebouwing en gewassen heb je meer contextinformatie.
- Ze klikt in kaart 2 op een punt, maar moet lang wachten voor er iets gebeurt. Er opent een nieuw tabblad.
- Ze weet nu niet meer waarop ze heeft geklikt, want die informatie ontbreekt.
- Ze vraagt over de grafieken: Wat is de voorspelling, waar zijn de (tijds)grenzen, waar vindt ze de informatie over de weergave? Is dit bijvoorbeeld op basis van percentielen?
- Ze kan zich bij de kleuren iets voorstellen, maar dat zal voor minder inhoudelijke mensen niet duidelijk zijn. Kijkt bij de icoontjes rechtsboven.
- Ze wil terug naar het beeld met de kaarten, lukt niet.

De developer licht toe: kies bij de icoontjes autoscale – maar ziet verder ook geen 'x' om af te sluiten. Later meldt ze dat je met Escape het window sluit.

- Ze sluit het tabblad af. Ze ziet in het vorige scherm een andere grafiek; er zit nu 2018 bij, die had ze net niet. Ze probeert in de grafiek te scrollen met de muis. De scrollfunctie met de muis werkt niet, daarvoor moet ze het icoon 'pan' gebruiken. Dat is lastig omdat je in de kaart erboven wel kunt scrollen. Het zijn twee tegenstrijdige handelingen in hetzelfde dashboard.
- Ze kiest nu 'Afvoeren'. Het laden duurt lang en je ziet vaag het inlogscherf weer. De opbouw van het beeld is eerst vreemd.
- Ze merkt op dat je zo'n dashboard niet zou gebruiken om snel vragen te beantwoorden – alleen als je tijd hebt om dingen uit te zoeken.
- Het kaartbeeld is voor haar nu 'abracadabra' – de kleuren zeggen haar niets. Waar zijn de legenda's?
- Grafiek: klopt het dat er veel water boven maaiveld komt?
- De achtergrondkleuren van de grafiek: ze kan zich niet voorstellen wat die betekenen.
- 2018 staat er vast in. Heeft ze ook andere keuzes? Voor droogte is het logisch, maar hier zou je andere jaren willen selecteren.
- Ze gaat nu over op vraag (use case) 1.
- Ze opent Droogval. Je ziet niet in de menubalk dat je dit hebt geselecteerd.
- De kaart geeft niet aan wat het stroomgebied Grote Molenbeek is; alleen deelgebieden.
- Voor de Beek is maar 1 afvoerpunt – het is een stroomgebied, dus er moeten meerdere zijn.
- Ze weet even niet meer welk meetpunt ze heeft geselecteerd – ze denkt dat ze eronder ziet welke is geselecteerd want de grafiek laadt niet opnieuw.
- Ze begint opnieuw. Ze klikt weer op de grafiek met verwachting dat ze kon scrollen – maar het plaatje gaat zelf scrollen. Waar eerst 'maaiveld' stond, is dat nu weg.
- Ze kan de vraag van de droogte-coördinator niet beantwoorden, het lijkt eerder op wateroverlast aan te gaan dan op droogval.
- (Komt er bij toeval achter dat ze 2018 kan uitzetten.)
- Ze vindt in- en uitzoomen in de grafiek lastig, kost veel tijd om het beeld goed te krijgen (met allerlei uitschieters).
- Ze zou nu eigenlijk naar een ander systeem (Fews) gaan kijken over de afvoer, om te bepalen wat normaal is. Wat ze nu ziet zegt haar niets, wat de afwijking is t.o.v. van normale afvoer (basisafvoer, droogteafvoer). Ze heeft een referentie nodig, ze moet weten waar ze naar kijkt.
- Ze mist ook info wat de achtergrondkleuren van de grafiek zijn.
- Gewoonlijk (andere systemen) is bruin droogteafvoer. Als ze dat aanneemt, dan ziet ze dat die al een tijdje eronder zit, plus de voorspelling.
- Ook zou ze kijken naar de weersvoorspelling. Dan is haar antwoord dat er zeker lokaal droogte kan ontstaan.
- Maar, ze heeft maar één meetpunt. Ze zou voor het bepalen van een antwoord meerdere meetpunten moeten hebben.
- En ze zou ook terug willen kijken wat er in het verleden is gebeurd (noemt: geen data = droogval).
- Als de droogte-coördinator het hele stroomgebied wil weten, zou ze het grondwater erbij nemen.
- Ze begrijpt niet precies wat de vinkjes zijn; ook de kleurcodering is onduidelijk. Heeft de neiging naar hun bollenkaart te gaan. Ze geeft aan dat die kleuren overeen zouden moeten komen.
- Voor nu is het één groot vraagteken wat alles is.

- Als ze klikt op Grote Molenbeek wordt er ingezoomd op alleen het noordelijke stukje; niet het hele stroomgebied.
- Ervan uitgaande dat blauw nat is, zou dat betekenen dat er veel regen wordt verwacht. Dat zag ze niet in de afvoeren – hoe kan dat? Kan niet goed zijn.

Er staan te veel tabs open op een bepaald moment.

- Bij de verwachting over 8 weken ziet ze 1 groene, wat afwijkend is. Ze wil dus toch bij afvoer kijken.
- Ze merkt dat ze niet ziet in welk scherm ze zit – titel ontbreekt. Er worden steeds nieuwe tabbladen geopend met dezelfde naam. Je weet dus niet wat op welk tabblad staat.
- De 12-weekse grondwatervoorspelling kan niet kloppen.
- Grafiek – opnieuw: wat betekenen de kleuren? Alles zit in de bovenste laag, in de groene kleur. Het is verwarrend dat het niet lijkt te kloppen met de voorspelling. Dus ze worstelt met het vormen van een betrouwbaar beeld.
- Ze kiest een ander punt – de grafiek toont hele andere achtergrondkleuren. Kleuren zijn dus niet met elkaar te vergelijken waardoor er geen analyse gedaan kan worden.

Hiermee ronden we de eerste vraag af.

Tweede vraag/use case:

- Ze zou niet weten hoe ze de genoemde jaren zou kunnen invoegen (of terughalen wat ze had weggehaald, nl. 2018).
- Het valt meteen op dat 12 weken een heel ander beeld geeft. Maar ze weet niet welk scenario ze nu ziet.

De developer: je ziet nu 'normaal'.

- Dat moet je dan wel in de titel zetten. Bijv. naast Open lagen – een drop-down waaruit je kunt kiezen.
- Waar is 'normaal' op gebaseerd? (Antwoord: Normaal is gebaseerd op historisch gedrag met verwachting). De deelnemer: ook dit moet in een toelichting staan.
- Als je een print screen zou willen doen, moeten ook de legenda's daarop zichtbaar zijn.

Nabespreking

Traagheid bij laden is een probleem. De developer gaat kijken wat eraan te doen valt.

Opbouw

Ze vindt het oké dat er twee tabs zijn, Grondwaterbeeld en Afvoer – die hoeven niet tegelijk in één scherm getoond.

Kaarten

Vier kaarten zijn prima; het tegelijk inzoomen is heel nuttig.

Ze maakte geen gebruik van de drop-down meetlocatie. Meeste vragen komen over een stroomgebied, dus ze is meer gefocust op de kaart, op een gebied daarop.

Bij afvoer kan dat anders zijn; het kan wel handig zijn als er iets is met een bepaalde peilbuis, dan zal je wel gebruikmaken van de drop-downmenu voor de selectie van peilbuizen. Bij afvoer moet de basisafvoer en droogteafvoer worden toegevoegd. Dat is hetgeen waarmee je afvoer vergelijkt en niet per se een ander jaar; dus dit is een andere case dan grondwater.

Lastig dat ze niet het hele stroomgebied kon selecteren, alleen de deelgebieden.

Ze vindt het juist wel fijn dat je per stroomgebied je punten kan filteren. Een drop-down om een groep punten selecteren zou wel fijn zijn.

Achtergrondkaarten zijn nuttig; maar ze zou ook een luchtfoto willen – is informatiever, herkenbaar. Daar staan zaken als bebouwing en boerenbedrijven op die invloed kunnen hebben op grondwater.

Legenda en toelichting moeten worden toegevoegd – we gaan bespreken wat direct in het scherm (hover of informatieveldje) en wat in achtergrondinformatie, bijvoorbeeld hoe berekeningen tot stand zijn gekomen). Het is nu onduidelijk welke scenario's je ziet.

Grafieken

De kleuring in de grafieken klopt nog niet, ze heeft nog niet de juiste classificaties gekregen. Is nu omgekeerd van wateroverlast.

De vinkjes zijn handmatige inspecties. De kleuren heeft de data-expert meegegeven.

De handmatige metingen: niet ouder dan één week (hooguit twee weken). Moet erbij worden vermeld.

Kleuren van de lijnen in de grafiek zijn gekozen – die vindt de deelnemer oké. (NB Nog testen op leesbaarheid bij kleurenblindheid, daar zijn tools voor).

De vlakken zijn op basis van de 'fases'. Maar die moeten duidelijker worden, moeten slaan op grondwatermetingen. De vlakken kloppen nu niet.

Het is wel handig om te weten in welke fase je nu zit.

De developer: dit ligt aan de data-kant. Nu verkeerde categorisering.

Kleuren moeten overeenkomen met de kleuren in de andere dashboards (FEWS?) (Die moeten ook later automatisch worden geüpdatet wanneer er een verandering komt.)

Voorstel: enkele punten kunnen openen en de grafieken onder elkaar zetten; bijvoorbeeld vier.

Picklist met jaren die beschikbaar zijn?

Scrollen in de grafiek. Inzoomen: door selectie in de grafiek. Is bang dat ze bij andere interactie weer functionaliteiten mist.

De deelnemer wil graag makkelijk in- en uit kunnen zoomen; en grafiek 'vastpakken' en schuiven zodat je snel naar een vorig punt kunt. Wat is begin- en eindpunt?

De developer – vier grafieken: is bang dat je kwijtraakt welke punten je laat zien in de grafiek. De deelnemer: je wilt zien welke zijn geselecteerd, en misschien ook de volgorde in de weergave?

De developer: vergelijk je altijd punten in hetzelfde stroomgebied?

De deelnemer: nee, kan uit verschillende stroomgebieden. Kan zich wel voorstellen dat je een tabblad open hebt van stroomgebied 1 en van stroomgebied 2. En dan binnen de kaart een stroomgebied selecteren.

Afvoer-referentiewaarde – de developer kijkt met de data-expert dat de basisafvoer (staat nu in FEWS) kan worden toegevoegd.

De developer-Neerslag: wordt niet getoond in het dashboard.

De deelnemer: is oké, kan het van elders halen. Wat wel nuttig zou zijn: in de voorspelling zie je nu niet waar die op is gebaseerd. Dat moet duidelijk zijn. Je ziet niet terug wat er is gebeurd in de metingen, je kunt de oorzaak (hoeveelheid regenval) niet zien.

De developer: dat visualiseren is lastig. Misschien link met FEWS maken.

De developer heeft info nodig van WL voor de uitleg. Zal haar best doen het logisch op te schrijven – dan gaat het naar ons.

De developer en leider van de test gaan dit rapporteren – sturen dit dan weer naar de deelnemer voor correcties.

Acties

- N&S: laden checken kan dit sneller?
- N&S: UX/UI aanpassingen op basis van feedback (de kleine aanpassingen voor nu).
- WL: Juiste codering toevoegen in de data en delen voor de bollen.
- WL: Informatie verschaffen over tot stand komen van scenario's.
- WL: bij afvoer de basis afvoer uit Fews trekken en delen via de Lizard API.
- WL: Data handmatige metingen checken (inspecties). Er moet datum bij, want als het te oud is, is het niet relevant.
- WL: Droogte bij prioritering, deze kaart zit niet goed in Lizard.
- Als er al punten zijn gewijzigd, is het misschien handig om nog eens een korte doorloop te doen?

Bijlage 7 Verslag van de workshop 'Besluitvorming met Digital Twins'

Gehouden op 18 oktober 2023 bij Waterschap Vallei en Veluwe te Apeldoorn.

Deelnemers: Thomas Berends (Nelen & Schuurmans), Bas Breman (Wageningen Environmental Research (WENR)), Hans Cappon (Wageningen University and Research (WUR) en Hogeschool Zeeland), Remco Castelijns (Waterschap Rijn en IJssel), Wido Derks (Waterschap Limburg (WL)), Melle Eijkelkamp (Waterschap Vallei en Veluwe (WSVV)), Marijn Gülpen (WENR), Joske Houtkamp (WENR), Joost Iwema (WENR), Dolf Kern (Staf Deltacommissaris), Jolkje Keuning (Vitens), Martin Knotters (WENR), Bob Leijnse (Waterschapshuis), Wim van der Meer (WSVV), Arjen van Nieuwenhuijzen (AMS, Witteveen+Bos), Rogier Pouwels (Wettelijke Onderzoekstaken (WOT) Natuur en Milieu), Janneke Remmers (WUR), Erik Schrier (Royal Eijkelkamp), Klaas Veenma (provincie Overijssel), Jasper van Voorst (WSV), Milly Wind-Cox (WSVV)

1 Welkom en introductie

Joske Houtkamp en Joost Iwema heten de aanwezigen hartelijk welkom. In het project 'Digital twin voor het Waterbeheer' werken we aan de digitalisering van waterschappen door het ontwikkelen van digital twins. Het doel van deze twins is het verbeteren van de informatievoorziening in waterschappen ten behoeve van plan- en besluitvorming.

In deze workshop 'Besluitvorming met Digital Twins' staan de volgende twee vragen centraal:

1. In hoeverre kunnen digital twins bijdragen aan effectievere, efficiëntere en beter onderbouwde besluiten?
2. Zullen digital twins besluitvorming gemakkelijker maken, en wat is hun relatie met onzekerheid in besluitvorming?

2 Presentatie Klaas Veenma: 'Zoeken naar ruimte voor onzekerheid in onzekere tijden'



Klaas Veenma, beleidsonderzoeker bij de provincie Overijssel, promoveerde in 2021 op een onderzoek naar de omgang met onzekerheid in infrastructuur- en ruimtelijke planning.

Het realiseren van alle grote ruimtelijke opgaven vraagt om een integrale en participatieve aanpak. Integraliteit en participatie hebben echter een keerzijde: de complexiteit van de besluitvorming neemt toe, en daarmee ook onzekerheden. Bovendien hebben we haast: voor veel opgaven zijn nú maatregelen nodig.

De vraag is hoe een balans te vinden tussen beheersing van het proces en ruimte voor ideeën. In het proefschrift 'Ruimte voor onzekerheid' is dat in de praktijk onderzocht, aan de hand van drie casussen: de reconstructie van de N340 Zwolle-Ommen, de aanleg van een bypass van de IJssel bij Kampen, en een nieuwe invulling van Vliegveld Twente. Partijen die bij besluitvorming zijn betrokken, kunnen onzekerheden proberen te verkleinen (certification), te vergroten (decertification) of te accepteren. Hoe harder beleidsmakers echter

onzekerheden proberen te verkleinen, hoe harder tegenstanders die proberen te vergroten. Beleidsmakers denken dat je door het verkleinen van onzekerheden weliswaar snel tot een besluit kunt komen, maar bereiken het tegenovergestelde. Beleidsmakers blijven streven naar *certification*, omdat ze haast hebben (resultaat boeken binnen een bestuurstermijn), uit gewoonte en automatisme, uit machtsrol en -positie, en omdat anderen erom vragen. Dit laatste lijkt te gebeuren wanneer beleidsmakers juist niet onzekerheid verkleinen, maar openstaan voor een adaptieve aanpak. Deze patronen zijn in de afbeelding hieronder weergegeven.

Patronen

1. Hoe harder beleidsmakers onzekerheden verkleinen, hoe harder tegenstanders die proberen te vergroten 
2. Beleidsmakers willen door verkleinen onzekerheden snel tot besluit komen, maar bereiken het tegenovergestelde 
3. Andere instrumenten, zelfde doel: beleidsmakers willen onzekerheidsreductie 
4. Andere actoren moeite met speelruimte beleidsmakers bij adaptieve aanpak 

Het verdient aanbeveling om beleidsmakers uit de reflex van certainification te halen, 'actie-reactie' te voorkomen door open dialoog, ruimte te bieden voor alternatieven, dus niet te snel 'trechteren' (focus op één plan) en digital twins te gebruiken om ruimte te geven aan alternatieven, en daarmee aan onzekerheid. Samenvattend is de belangrijkste conclusie dat te veel focus op onzekerheidsreductie leidt tot te snelle 'trechtering' en te weinig ruimte voor alternatieven, wat resulteert in problematische besluitvorming. Het gebruik van digital twins kan helpen om ruimte te geven aan alternatieven, en daarmee aan onzekerheden. De stelling die Klaas Veenma meegeeft aan de deelnemers van de workshop luidt dan ook: "Gebruik van digital twins voorkomt (te) snelle 'trechtering' en daarmee problematische besluitvorming." Een presentatie over het promotieonderzoek is te zien op <https://www.youtube.com/watch?v=bpMqEHquAew>. Het proefschrift is te vinden op https://pure.ruq.nl/ws/portalfiles/portal/180984600/Complete_thesis.pdf.

3 Presentatie Martin Knotters: "Onzekerheidsmonsters: hoe zien ze eruit en hoe ga je ermee om?"



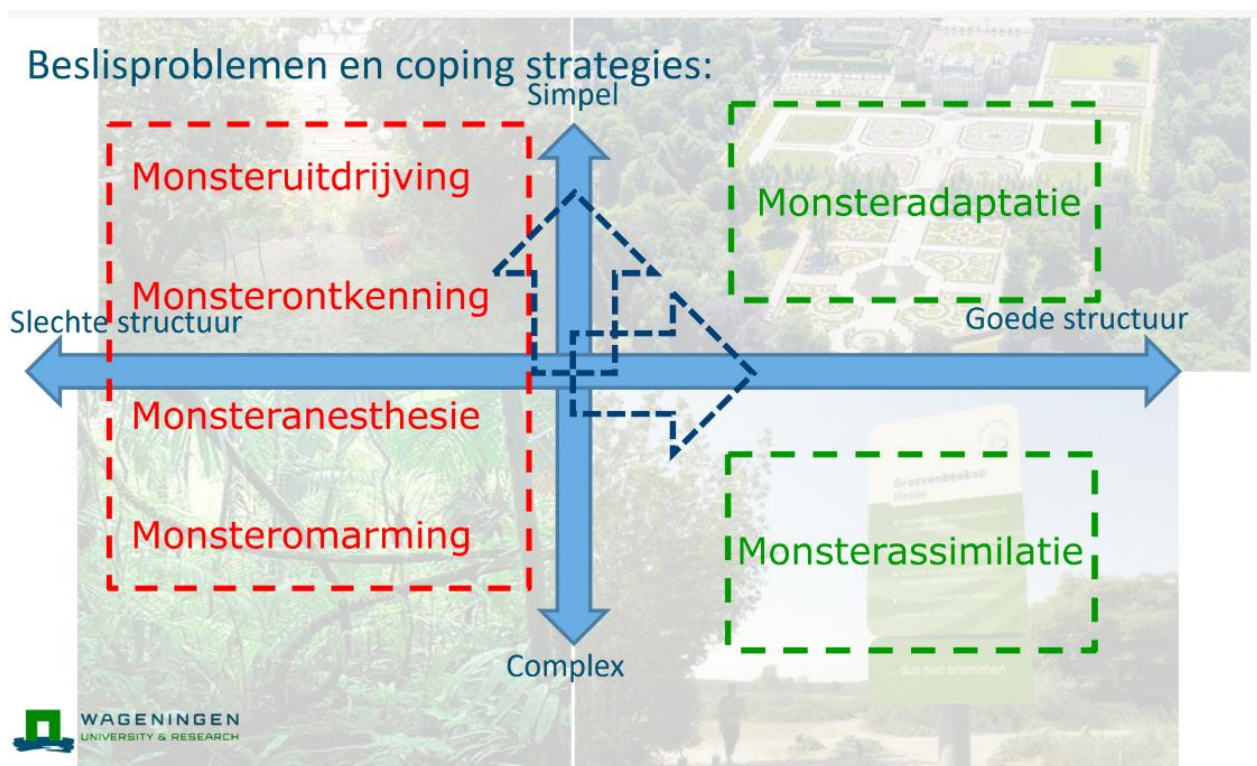
Als twee elkaar uitsluitende categorieën vermengd raken, ontstaan hybriden, die kunnen uitgroeien tot monsters. Onzekerheidsmonsters ontstaan als je wetenschap en beleid met elkaar kruist. Hoe wij met deze monsters omgaan, hangt af van hoe ze eruitzien, hoe ze op ons over komen en van de omgeving waarin we ze tegenkomen. Onzekerheidsmonsters kunnen een- en meerkoppig zijn, in ontwikkeling of volgroeid. Zij spuwen verschillende soorten onzekerheid uit: cognitieve, normatieve en strategische onzekerheid, kwantificeerbare en niet-kwantificeerbare onzekerheid, bekende en onbekende, diepe (Knightiaanse) onzekerheid.

De omgeving waarin onzekerheidsmonsters zich ophouden, het beslisprobleem, varieert van eenvoudig tot complex en van slecht tot goed gestructureerd, van goed onderhouden 'formele tuinen' tot 'verwilde tuinen' die in eerste aanleg formeel waren, van beheerde en bestudeerde natuur (zoals in Nederland) tot ondoordringbare oerwouden. Complexiteit betreft het beslisprobleem zelf. Structuur betreft de omstandigheden waaronder de beslissing moet worden genomen, zoals kennis en organisatie. Als tijdens een beslisproces bijvoorbeeld de verkeerde vragen worden gesteld, kan een beslisprobleem complexer worden dan nodig.

Kwantitatieve, statistische informatie over onzekerheid verwerken we op verschillende manieren. Snelle verwerking op basis van intuïtie en gevoel kan leiden tot vertekening. Analytische verwerking kost echter meer tijd en energie.

Bij een eenvoudig, goed gestructureerd beslisprobleem kan gekwantificeerde onzekerheid worden benut in een statistisch beslismodel, zoals een hypothesetoets. De beslissing wordt dan uitgerekend. Deze strategie heet **monsteradaptatie**. In goed gestructureerde, maar complexe beslisproblemen is niet alle onzekerheid te kwantificeren, maar kan het wel worden benoemd, zodat het een plaats krijgt in het beslisproces (**monsterassimilatie**). Is een beslisprobleem slecht gestructureerd, dan kan er ruimte ontstaan voor anekdotische strategieën: **monsteruitdrijving** (bijvoorbeeld door alsmaar proberen modellen te verbeteren), **monsterontkenning** (onzekerheid bagatelliseren als dit in jouw belang is), **monsteromarming** (onzekerheid benadrukken als dit jouw belang ten goede komt) en **monsteranesthesie** (consensus over de kwaliteit van informatie proberen te bereiken, zonder die kwaliteit daadwerkelijk te betrekken in het beslisproces).

Een digital twin voor het waterbeheer zou moeten bijdragen aan de structuur van beslisproblemen en zou erbij moeten helpen deze niet complexer te maken dan nodig, zodat het onzekerheidsmonster kan worden getemd met adaptatie en assimilatie en analytische verwerking van informatie wordt ondersteund.



Deze sessie begon en eindigde met een Mentimetervraag naar de criteria waaraan een goed besluit voldoet. De eerste uitkomst was:



Het hoogst scoorden “gedragen/draagvlak” en “transparant”, gevolgd door “duidelijk/duidelijkheid”, “uitlegbaar”, “duurzaam”, “doelmatig”, “doeltreffend” en “rechtmatig”. De sessie spitte zich vervolgens toe op de beslissing tot het instellen van een onttrekkingsverbod. Dit is een verbod op het onttrekken van oppervlaktewater zoals sloten, beken en andere watergangen en/of grondwater. Het verbod geldt voor gebruik van water voor landbouw en industrie en het besproeien van bomen en sportvelden. Overtreding kan leiden tot een boete. Als casus dient het onttrekkingsverbod bij Waterschap Vallei en Veluwe in 2022, dat voor oppervlaktewater betrekking had op plekken zonder aanvoermogelijkheid en voor grondwater op een strook van 200 meter langs kwetsbare beeklopen met waardevolle natuur. Bij het nemen van een beslissing over een onttrekkingsverbod worden de volgende vragen gesteld:

1. Welke partijen zijn betrokken?
2. Hoe groot zijn de gevolgen voor de partijen?

3. Welke afwegingen maakt het waterschap?
4. Wat zijn de gevolgen voor het waterschap als het besluit, achteraf gezien, niet juist was?
5. Was de kern van het probleem duidelijk?

De laatste vraag heeft betrekking op de oorzaken die ten grondslag liggen aan het onttrekkingsverbod en de gevolgen van het onttrekkingsverbod. Oorzaken zijn: droogte vanwege geringe neerslag, hoge temperaturen, toenemende verdamping en geringe aanvoer van water en slechte neerslagvooruitzichten (weinig tot geen). Mogelijke gevolgen zijn: impact van droogte op waterveiligheid (dijkbeheer), onomkeerbare natuurschade en problemen op het gebied van drinkwatervoorziening, energie, beregening, industrie, scheepvaart, landbouw, natuur, waterrecreatie en visserij.

Vervolgens kwam de vraag aan de orde: Wat was nodig voor de beslissing? Nodig is een advies van het waterbeeldoverleg met hydrologie, ecologie, juridisch, dijkexpert, communicatie (multidisciplinair overleg met diverse disciplines van het waterschap). Dit advies is gebaseerd op modellen, verwachtingen, waarnemingen en ervaringen. De procedure voor de totstandkoming (en intrekking) van een onttrekkingsverbod is vastgelegd in het Calamiteitbestrijdingsplan Watertekort. De volgende informatiebronnen waren in 2022 doorslaggevend bij het besluit voor een onttrekkingsverbod:

- Gevallen neerslag
- Meteogegevens (i.v.m. verdamping)

- Neerslagverwachting
- Inlaatcapaciteit
- Landelijke verdringsreeks: prioritering bij watertekort; voldoende water voor eerste drie prioriteiten
- Afstand tot kwetsbare beeklopen en waardevolle natuur

Onzekerheden speelden een rol bij de volgende vragen:

1. Hoe ontwikkelt de watervraag zich in de aankomende weken?
2. Hoe verloopt de afname van het bodemvocht?
3. Hoe betrouwbaar zijn de meteodata?
4. Hoe verloopt de discussie in het waterbeeldoverleg en tot welke scenario's leidt dit?

Discussie

In de discussie over de vraag hoe een digital twin kan helpen met het nemen van de beslissing kwam het volgende naar voren:

- Een digital twin kan bijdragen aan gedragen en transparante besluitvorming door ervoor te zorgen dat er meer duidelijkheid is, belangrijk in de communicatie met belanghebbenden.
- Door een digital twin kan het gesprek in gang komen en krijg je een soort early warning, waardoor belanghebbenden al eerder worden meegenomen in een beslissingsproces.
- Wil een digital twin bijdragen aan meer doelmatigheid, dan moet eerst meer duidelijkheid komen over geobjectiverde kosten en baten.
- Een digital twin kan ertoe bijdragen dat het beslisproces met een open blik voor alternatieven wordt begonnen (geen trechtering zoals in de eerste presentatie). Met een digital twin kunnen andere opties in beeld worden gebracht en doorgerekend.
- Data waar je het meest van weet, stop je in de digital twin, dus daar begint het trechteren al; er kan een onevenwichtig beeld ontstaan dat tot een bias leidt in de besluitvorming. Daarom zou ook zichtbaar moeten worden gemaakt welke data er ontbreken.
- Een digital twin kan een gespreksmiddel zijn bij besluitvorming.
- Een digital twin kan helpen om een beslisprobleem beter te structureren, dus een wildernis te veranderen in een 'geordende tuin' of een 'Nederlands natuurgebied' zoals in de beeldspraak van de tweede presentatie.
- Uiteindelijk kom je op een punt dat alles in beeld is gebracht en een besluit moet worden genomen. Een digital twin zou dan ook de onzekerheid in beeld moeten brengen, zodat deze een rol kan spelen in de besluitvorming. Daarbij moet worden gewaakt voor de reflex tot verdere onzekerheidsreductie (monsteruitdrijving).

Vervolgens werd de volgende Mentimetervraag gesteld:



De workshopssessie over een onttrekkingsverbod bij Waterschap Vallei en Veluwe in 2022 leidde er dus toe dat men de eerdergenoemde criteria bevestigd zag, maar dat doelmatigheid als criterium voor besluitvorming meer naar voren kwam. De criteria doelmatig, doeltreffend en rechtmatig scoorden in tweede instantie hoger dan in eerste instantie.

Reflectie door deskundigenpanel

Rogier Pouwels en Bas Breman reflecteerden op de discussie. Bas benadrukte de rol van transitie en gaf aan dat de rol van digital twin als tool voor besluitvorming en als gesprekstool door elkaar heen lopen. Bas vroeg zich af hoe systeemveranderingen zouden kunnen worden doorgerekend, want als niemand weet hoe het toekomstige systeem eruitziet, hoe kun je dat dan uitrekenen? Is dit misschien iets waar we van moeten zeggen dat de digital twin daar geen rol in kan spelen? Of dat dan het doel van de digital twin verandert van uitrekenen van onzekerheid naar analyseren van scenario's en naar communicatie? Digital twins zouden kunnen worden ingezet om meer inzicht te geven in normatieve onzekerheid, dus in hoe partijen in de wedstrijd zitten. In het gesprek moet niet alleen worden geprobeerd begrip te kweken, maar ook geprobeerd worden de ander te begrijpen. Bas noemt de podcast van WUR en Bart Brandsma: verschillende fasen in polarisatie – meer kennis is brandstof voor polarisatie. <https://www.wur.nl/nl/over-wageningen/onze-waarden/omgaan-met-polarisatie.htm>.

Rogier noemde de rol van een digital twin bij het proberen te begrijpen van een systeem en maakte daarbij onderscheid tussen harde en zachte informatie. Besluitvorming lijkt nu een negatieve kant te hebben, terwijl je systeem al eerder had laten zien dat een besluit nodig was. Een digital twin zou de positieve kant van beslissingen ook moeten laten zien. Angst voor een slecht besluit kan tot vertraging leiden. Rogier benadrukte vanuit zijn ervaring met de toepassing van modellen in het beleid dat communicatie cruciaal is. Wat een getal betekent of hoe het wordt geïnterpreteerd, is voor iedereen anders, daar zit nazorg bij. In het gesprek worden drempelwaarden gebruikt, die heel sturend kunnen zijn. Er zou echter niet al te hard alleen op drempelwaarden moeten worden gestuurd. De keuzes in het model en daarmee verschillende alternatieven en onzekerheid zouden ook getoond moeten worden.

5 Workshopssessie 2: Onzekerheid in besluitvorming. Wido Derks, Waterschap Limburg & Erik Schrier, Royal Eijkelpark



Ook de tweede workshopssessie behandelde de beslissing over het instellen van onttrekkingsverbod, met een voorbeeld uit 2023 van Waterschap Limburg. Aan de orde kwam de beschikbaarheid van objectieve data, teneinde het risico op een onterecht besluit te verkleinen en de rol van een digital twin hierbij.

Voor het nemen van een beslissing over het instellen van een onttrekkingsverbod was behoefte aan de volgende informatie:

- Informatie om de noodzaak van waterreductie voldoende te onderbouwen;
- Informatie die inzicht biedt in de situatie "wat als droogte op langere termijn doorzet";
- Trendlijnen die aantonen dat bijvoorbeeld het risico van droogval sterk toeneemt.

Lang is geaccepteerd dat bepaalde kennis ontbrak. Er worden generieke besluiten voor hele werkgebied genomen, maar de wens is maatwerk te

leveren per stroomgebied. Er wordt sterk geleund op de kennis van een kleine groep experts, wat kwetsbaarheid veroorzaakt.

Bestuurders hebben te maken met de volgende dilemma's:

- Waar doet een onttrekkingsverbod de meeste pijn (schade aan natuur/landbouw)?
- Kan er nog iets worden gedaan met 'noodmaatregelen', zoals zandzakken/infuuspompen e.d.?
- Wat is het handelingsperspectief in termen van tijd en geld?
- Wat is de maatschappelijke impact indien grote herverdelingsvraagstukken aan de orde zijn (drinkwatervoorziening, afschakelen industrie e.d.)?

In het verleden was bij Waterschap Limburg een algemeen beeld op basis van een beperkt aantal referentiebeken, het onderbuikgevoel van de bestuurder en het aantal bezorgde telefoontjes van bijvoorbeeld

terreinbeheerders doorslaggevend bij de beslissing over de instelling van een onttrekkingsverbod. Vanaf 2022 wordt gestreefd naar een geobjectiveerd beeld, zodat onder vergelijkbare omstandigheden dezelfde beslissing wordt genomen. Wel vindt altijd nog een check of deskundigenoordeel plaats. Met de komst van een digital twin vanaf 2023 en verder wordt gestreefd naar een ondersteund beeld met scenario's voor de langere termijn. Kennisvragen hierbij zijn:

- In welke mate zijn waterkwaliteitsproblemen te verwachten?
- Bij droogte over lange periode: hoeveel droogval treedt in beken op?
- Wat valt er in een worstcasesituatie te verwachten aan grondwaterstanddalingen?
- Hoeveel neerslag is nodig over periode X om de grondwatervoorraden voldoende aan te vullen?

De rol van een digital twin zou bij de beantwoording van deze vragen kunnen bestaan uit het maken van betere scenario's, het mogelijk maken van meer maatwerk op gedetailleerdere schaalniveaus en het genereren van kaartbeelden die meer inzoomen op lokale situaties.

Discussie

In de discussie kwam naar voren dat een digital twin in de 'koude fase' het besluitvormingsproces zou kunnen ondersteunen. De digital twin zou moeten worden gebruikt om de calamiteit 'droogte' te voorkomen, maar ook om op het moment zelf al zo veel mogelijk data te hebben. De 'koude fase' binnen het waterschap is de periode dat er nog geen droogte is (zoals in de winter), maar dat er wel al kan worden nagedacht over wat te doen bij droogte.

De vraag kwam naar voren of onzekerheid schijnzekerheid kan worden. Pluimen van hoe bijvoorbeeld de voorraad bodemvocht kan verlopen in de toekomst geven de kaders aan. Een digital twin zou schijnzekerheden juist moeten voorkomen en niet – door verkleinen van onzekerheid – een verkeerde indruk geven. Een digital twin zou ook zachttere data moeten bevatten. Men was het erover eens dat bestuurders moeten erkennen en durven accepteren dat er onzekerheid in een digital twin zit. Als je je alleen door beschikbare data laat leiden, dan laat je veel onzekerheid in de blinde hoek liggen. Niet alleen bestuurders 'trechteren', ook modelleurs doen dat.

Idealiter is een digital twin gebaseerd op data uit het verleden, maar wordt deze telkens realtime geactualiseerd. Een digital twin zou ook compatibel moeten worden gemaakt voor het toevoegen van nieuwe data, zoals over beregeningssystemen.

Een vraag die werd gesteld, luidde: dient een digital twin dient ter ondersteuning van beslissingen in een onzekere wereld? Ook werd opgemerkt dat het bij een digital twin toch blijft bij beslissen vanuit wat je weet, terwijl je ook in een omgeving moet handelen waar je niet weet waar de beslissingen toe leiden. Onzekere paden zouden niet moeten worden geblokkeerd, diverse scenario's moeten worden getoond. Bas Breman merkte op dat je ook van achteren naar voren moet kunnen denken: wat moet je doen om bij een bepaald resultaat uit te komen?

Martin Knotters viel het op dat het woord risico niet valt, laat staan risicoanalyse. Die is echter noodzakelijk om een doelmatige beslissing te nemen.

Reflectie door deskundigenpanel

Remco Castelijns (Waterschap Rijn en IJssel) en Melle Eijkelkamp (Waterschap Vallei en Veluwe) reflecteerden op de discussie. Remco merkte op dat er veel beelden zijn bij wat een digital twin kan zijn. De rekenkracht van computers neemt zo toe dat er veel kan – maar kun je wel alles doorrekenen? Het gaat ook veel kosten, is dat wel reëel? Doordat je veel kunt doorrekenen, kun je ook de onzekerheden in kaart brengen. Ook sentiment vanuit de maatschappij, bijvoorbeeld vanuit social media, kan worden meegenomen en statistisch worden geanalyseerd.

Melle merkte op dat een digital twin zou ook kunnen bijdragen aan het vastleggen van kennis. Kennis kan namelijk door personele wisselingen verloren gaan.

We hebben te leren hoe met digital twins om te gaan en hoe ze te gebruiken in besluitvorming. Je moet de tijd en ruimte nemen om ze te gaan gebruiken. Er moet een open dialoog zijn over hoe het middel wordt ingezet. Het raakt onderdelen van de besluitvorming, maar dekt niet alles.

De Mentimetervraag was vervolgens: Gaat de digital twin verandering brengen in hoe men nu omgaat met onzekerheid? De 20 reacties waren als volgt:

reactie	absolute frequentie (n=20)
Gedeeltelijk; Deels	3
Hangt af van de twin en de user	2
Ik hoop van wel.	1
It depends...	1
Ja; Ja zeker	4
Misschien; Het kan, maar heb twijfels; Ik twijfel	3
Nee; No way	3
Wordt onzekerheid dan schijnzekerheid?	1
?????	1

6 Afsluitende discussie



Een deskundigenpanel, bestaande uit Janneke Remmers (WUR), Wim van der Meer (WSVV) en Dolf Kern (Staf Deltacommissaris) bracht in een reactie naar voren dat ethische dilemma's een rol moeten spelen: hoever wil je gaan met het digitaliseren? Waterschappen onderzoeken nu hoe we digital twins kunnen inzetten, wat een digital twin nu eigenlijk is. De wil werd geuit om nu iets zien waarbij we inderdaad zien hoe deze gaat werken, niet vooral erover praten. Thomas Berends merkt op dat het domein overstijgende van de digital twin hier nieuw is, het heeft een overkoepelend perspectief. We pakken nu de casussen aan als optimalisatieslag, niet als transitie.

Als wenselijke toepassingen werden genoemd 'early warning' en trendanalyse: klimaatverandering maakt dat je onttrekkingsverboden eerder in gaat stellen. Het maakt het mogelijk ook op gebiedsniveau te bespreken of men wel op een goede plek zit, bouwt etc.

Bas Breman bracht twee vragen naar voren die gesteld moeten worden: 1) doen we de dingen goed, en 2) doen we de goede dingen? Dat laatste is de transitiekwestie.

Opgemerkt werd dat het vaak over 'de' digital twin ging, maar er zijn veel verschillende. De term digital twin wordt breed gebruikt. Er zijn veel ontwikkelingen gaande rondom digital twins, zowel qua domein, doel en toepassing, als in de 'maturity' (de mate waarin een digital twin is ontwikkeld, variërend van een digital twin die data verzamelt tot een autonome digital twin die het watersysteem begrijpt en stuurt). In dit project zijn de beschikbaarheid van realtime data en de beoogde rol als besturingssysteem belangrijke aspecten van de digital twin.

De vraag werd gesteld in wat voor omgeving de besluitvorming plaatsvindt: in de goed gestructureerde, formele tuinen of in de oerwouden? Willen we die omgeving gaan structureren? Of gaan daar andere stappen aan vooraf? We zijn snel geneigd om een digitale ontwikkeling aan te pakken.

Ten slotte werd de Mentimetervraag gesteld: Wat is voor u de belangrijkste boodschap of een nieuw inzicht dat u van de presentatie en workshopsessies hebt overgehouden? Dit zijn de 14 antwoorden:

- De monsters.
- Helderheid over wat je niet weet.
- Kunnen we in ons project ook denken aan transities?
- Dat we er nog steeds niet uit zijn wat een digital twin is.
- We moeten van praten naar doen.
- Wees helder wat je onder digital twin verstaat (en waarvoor gebruikt) en pas op dat je hem niet steeds complexer maakt.
- Naast harde waterdata ook zachtere data meenemen in digital twin.
- 'De werkelijkheid' is gelukkig niet erg geneigd zich wat aan te trekken van ons. Omarm de onzekerheid!
- Dat we het, ook zelf, blijkbaar nog heel moeilijk vinden om echt ruimte te maken voor onzekerheid. Ook in het nadenken over digital twin.
- Verschillende vraagstukken vragen om verschillende digital twins.
- Het is van groot belang dat we in het project digital twin voor het Waterbeheer de data-georiënteerde mensen en de beoogde gebruikers met elkaar laten praten.

- Een nieuwe vraag: Wat willen de waterschappen nou eigenlijk met een digital twin?
- Hoe definieert men onzekerheid? En hoe ervaart eenieder dit?
- Dat monsters aantrekkelijk kunnen zijn. Statistiek is leuk!

Reflectie achteraf van de organisatoren

Enkele dagen na de workshop hebben de organisatoren van de workshop (Joske Houtkamp, Marijn Gülpen, Joost Iwema, Jasper van der Voorst en Martin Knotters) opgeschreven wat volgens hen de belangrijkste lessen zijn:

De twee presentaties lieten duidelijk zien hoe er vaak met onzekerheid om werd gegaan en dat dit niet altijd de meest wenselijke manier was. Toch leek het in de tweede workshopssessie toch weer zo te zijn dat mensen in 'oude' patronen vielen. Zo werd er toch weer gesproken over nieuwe data die ertoe zouden leiden dat onzekerheid zal afnemen. Dit is een interessante waarneming die laat zien dat een verandering in de manier van denken lastig is.

Wat betreft onzekerheid in relatie tot digital twins en besluitvorming bij de waterschappen:

- Hoe men in de waterschappen omgaat met onzekerheid in besluitvorming verdient ook later in dit project aandacht: want wij moeten digital twin-producten opleveren die het gesprek over onzekerheid en hoe daarmee om te gaan mogelijk maken. In ieder geval moet een digital twin onzekerheid niet verhullen.
- Een digital twin moet duidelijk laten zien welke data het bevat, maar ook welke data niet, omdat die niet beschikbaar zijn of van onvoldoende kwaliteit. Het is een risico dat er een nadruk komt te liggen op kwantitatieve data, maar niet alles is te kwantificeren en op eenzelfde wijze te beoordelen. We moeten ons bewust zijn van het feit dat er ook grote verschillen zijn tussen mensen in hun waardering van numerieke data versus andere informatie.
- Een digital twin geeft de kans om zachtere data te benutten, dus niet alleen empirische/kwantitatieve data, maar ook resultaten van inspecties, beoordelingen etc. In de praktijk is dit echter moeilijk. Bij de digital twin voor Waterschap Limburg is dat vooralsnog niet goed gelukt. Data waar meer moeite in gaat zitten, worden nu ook niet meegenomen, daardoor vallen we terug op data die beschikbaar zijn, wat een risico geeft op bias (vertekening).
- Een dashboard moet onzekerheid van de data presenteren op een wijze die begrijpelijk is voor de gebruiker - en daarop is getoetst.
- Het structureren van beslisproblemen lijkt niet bewust te worden gedaan bij WSVV, maar bij WL is hier wel steeds meer aandacht voor bij het beslissen over een onttrekkingsverbod. Het zou dan goed zijn om ook onzekerheidsinformatie mee te nemen.
- Als we doen wat we deden, krijgen we wat we kregen. Een digital twin kan helpen om niet gelijk te trechteren en daarmee uit de reflex van certainification te komen.
- Zowel de onzekerheid als monsters zijn mooie input voor het project.
- Dat informatie over onzekerheid nuttig is bij het nemen van beslissingen wordt ingezien, ook dat benutting van deze informatie de doelmatigheid van beslissingen kan vergroten.
- Informatie over onzekerheid kan worden benut als naar betere structurering van beslisproblemen wordt gestreefd, waardoor deze niet complexer lijken dan ze zijn.

De definitie van een digital twin blijft voor discussie zorgen. Dé digital twin bestaat niet, het vernieuwende in deze digital twin is dat het domein overstijgend is. Maar voor bijvoorbeeld visieachtige vraagstukken is een andere digital twin nodig. Ook de rol van een digital twin in de organisatie blijft een onderzoeksvraag.

In ons eindrapport met framework/aanbevelingen voor waterschappen die digital twins willen inzetten, moeten we ook een hoofdstuk inruimen om onze ervaringen met de game, met de workshop en wat we verder nog gaan leren, te delen. We merkten in de workshop hoe belangrijk het is expliciet aandacht te besteden aan onzekerheid in het kader van het gebruik van digital twins.

Aanbevelingen voor het project

Voor het laatste jaar van het project bevelen wij op basis van de resultaten van de workshop het volgende aan:

- Denk goed na over welke beslissingen moeten worden genomen op basis van de digital twins. Onzekerheidsinformatie zal hierin een grote rol moeten spelen en ook als iets positiefs worden gezien en daarmee benut worden als extra informatie.
- Breng de resultaten vanuit de thema's en verdiepingsgroepen en de beoogde producten (de dashboards en visualisaties) zo veel mogelijk onder de aandacht van de beslissers en bestuurders van de waterschappen.

Vanuit het project zijn waardevolle inzichten ontstaan over beschikbaarheid van data en relevante kennis en over de eventuele obstakels bij het opnemen in een digital twin. Bij de waterschappen is meer nagedacht en gesproken over de vraag hoe besluiten nog beter te kunnen onderbouwen. Dit laatste jaar van het project is daarom een goede periode om te bepalen hoe de informatievraag en het informatieaanbod op elkaar aansluiten en of een digital twin veranderingen teweeg kan brengen in de organisatie wat betreft de integratie van de vraagstukken en daarmee de integratie van verschillende vakgebieden binnen het waterschap.

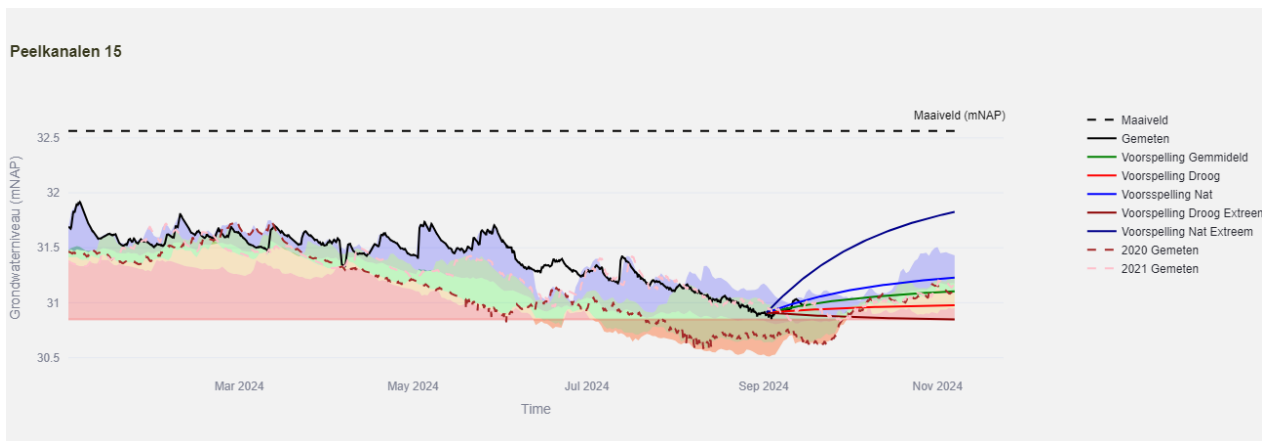
- Maak als waterschap gebruik van de mogelijkheid om besluitvorming te objectiveren, die er is door de toenemende beschikbaarheid in data.
- Houd bij besluitvorming meer rekening met data over kosten en baten, zodat het beslisprobleem meer gestructureerd kan worden en een beslissing geobjectiveerd kan worden.
- Zorg bij het starten van een digital twin-project dat alle lagen van de waterschapsorganisatie vertegenwoordigd zijn, zodat de digital twin niet vooral op het niveau van de hydrologen, die bijvoorbeeld naar droogte of zuivering kijken, wordt ontwikkeld, maar al een doorkijk kan geven naar vraagstukken op grotere schaal.

Samenvattend kan de digital twin meer betekenen dan nog meer informatie bieden aan de bestuurders voor een specifiek beslisprobleem. De digital twin kan meer 'evidence' geven over de hydrologische aspecten e.d., maar ook daarop meer en andere berekeningen laten uitvoeren. De digital twin kan in visualisatie en besluitvorming een bijdrage leveren aan een integrale blik en daarmee kan het waterschap een betere afweging maken bij besluiten.

Bijlage 8 Verslag van de workshop Kwantificeren en visualiseren van onzekerheid

Gehouden op 26 september 2024.

Startpunt van de workshop was de visualisatie in het droogte-dashboard Limburg van voorspelde grondwaterstanden voor één locatie, zie Figuur 62. Dit voorbeeld van een tijdreeksmodel staat model voor andere grondwaterstandreeksen, afvoerreeksen, reeksen van concentraties en staat in principe ook model voor ruimtelijke modellen zoals kaarten.



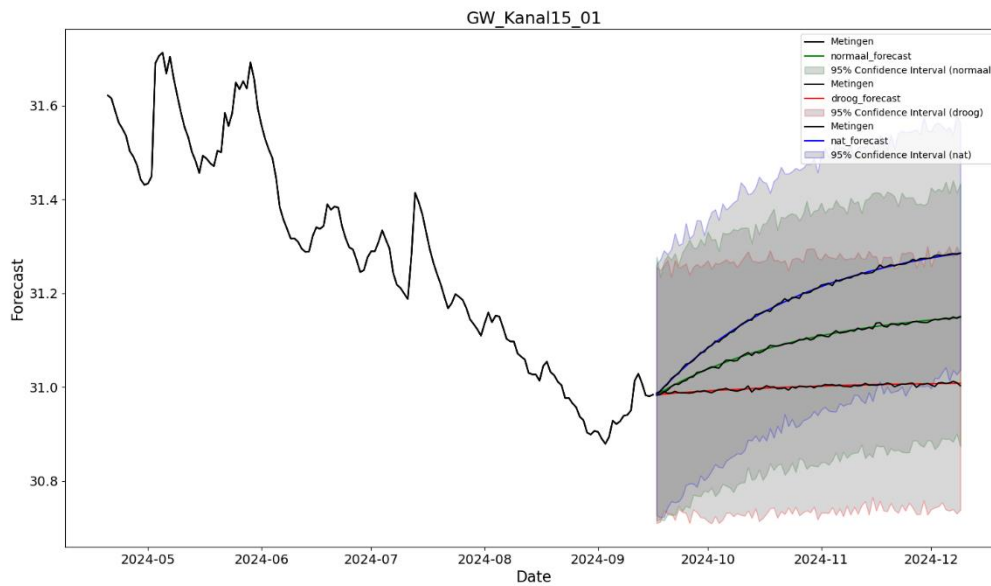
Figuur 62 Voorbeeld van een tijdreeks van grondwaterstanden op het droogte-dashboard van Waterschap Limburg, met voorspellingen voor een gemiddeld, droog, nat, extreem droog en extreem nat scenario. De gekleurde vlakken geven de overlappende grondwaterstandsreeksen van voorgaande jaren aan. In deze tijdreeksgrafiek is geen onzekerheid weergegeven.

De voorspellingen vanaf september 2024 betreffen vijf weerscenario's: gemiddeld, nat, droog, extreem nat, extreem droog. De voorspellingen zijn uitgevoerd door scenarioreeksen van neerslag en verdamping met een tijdreeksmodel te transformeren in grondwaterstanden. Figuur 37 geeft hiervan een voorbeeld. Deze figuur laat zien dat er een afstand is tussen het model en de waarnemingen, die de onzekerheid van de modelvoorspellingen weergeeft. Met deze onzekerheid is geen rekening gehouden in Figuur 62. Het gebruikte tijdreeksmodel is het Pirfict-model zoals dit geïmplementeerd is in de Pastas-software (Collenteur e.a., 2019). Alleen de deterministische, mechanistische component van dit model is gekalibreerd en daarna toegepast om te voorspellen, nadat de fit is verbeterd met behulp van machinelearning (Figuur 35). Om tijdens de workshop toch visualisaties van onzekerheid over de dynamiek van de grondwaterstand te kunnen tonen, is deze gekwantificeerd door middel van bootstrapping (resampling met teruglegging) uit de verschillen tussen gemeten en gemodelleerde grondwaterstanden (ruis), met de volgende veronderstellingen:

1. De ruis is niet gecorreleerd met de deterministische fit;
2. De ruis is onafhankelijk, heeft constante variantie en is gemiddeld 0.

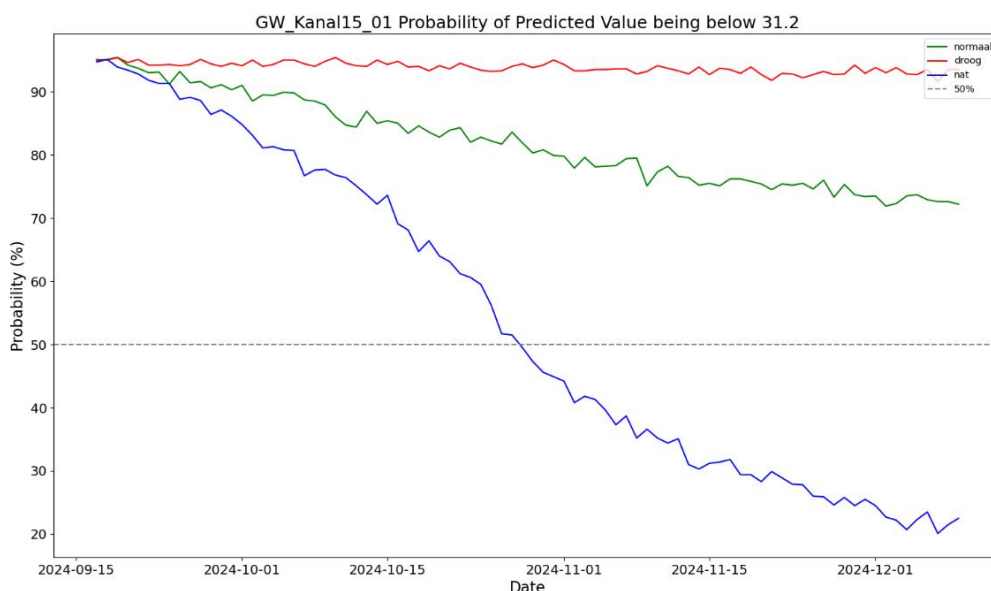
Uit het linkerdeel van Figuur 37, de verschillen tussen gefitte lijn en waarnemingen, blijkt wel dat deze veronderstellingen waarschijnlijk niet opgaan. Niettemin ligt de gekwantificeerde onzekerheid in de grootteorde als die gevonden werd bij validaties van tijdreeksmodellen, bijvoorbeeld door Knotters en De Gooijer (1999). Uiteraard moeten tijdreeksen in de toekomst zodanig worden gemodelleerd dat de ruis voldoet aan de modelveronderstellingen en dus gebruikt kan worden om onzekerheid te kwantificeren. Met behulp van bootstrapping genereerden we 1000 realisaties van grondwaterstand-verlopen. Figuur 63 geeft de gekwantificeerde onzekerheid weer in de vorm van 95%-voorspellingsintervallen rond drie weerscenario's,

berekend uit de 1000 gegenereerde realisaties. Merk op dat de breedte niet toeneemt met de tijd. De voorspellingen zijn niet conditioneel op de waarnemingen, waardoor de onzekerheid gedurende het begin waarschijnlijk conservatief wordt ingeschat.

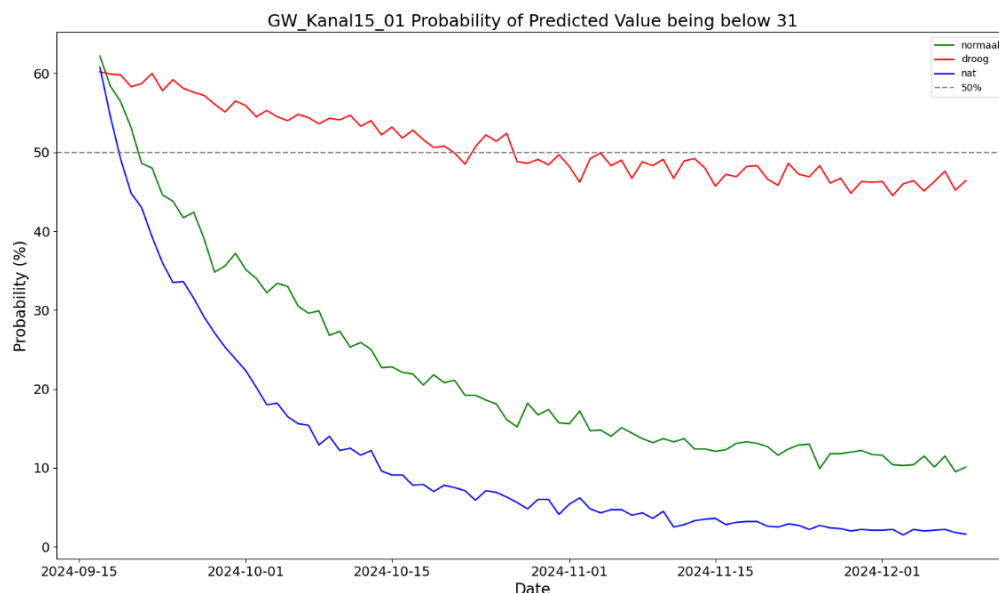


Figuur 63 Voorbeeld van een tijdreeks van grondwaterstanden zoals dit zou kunnen worden weergegeven op het droogte-dashboard van Waterschap Limburg. Rond het normale, droge en natte scenario zijn 95%-voorspellingsintervallen weergegeven op basis van de ruiscomponent van het tijdreeksmodel, niet-conditioneel op het gemeten verloop.

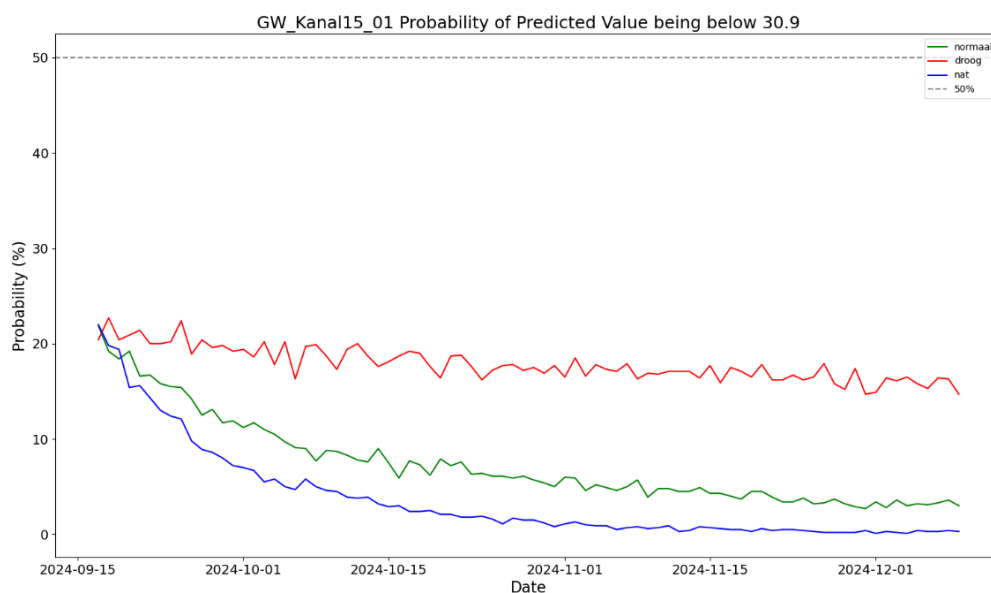
Als alternatief voor een visualisatie van onzekerheid met behulp van bandbreedtes, die in het geval van Figuur 63 95%-voorspellingsintervallen weergegeven, zijn in Figuur 64 tot en met Figuur 67 de kansen weergegeven dat de grondwaterstand daalt onder een kritisch niveau dat door de gebruiker is opgegeven.



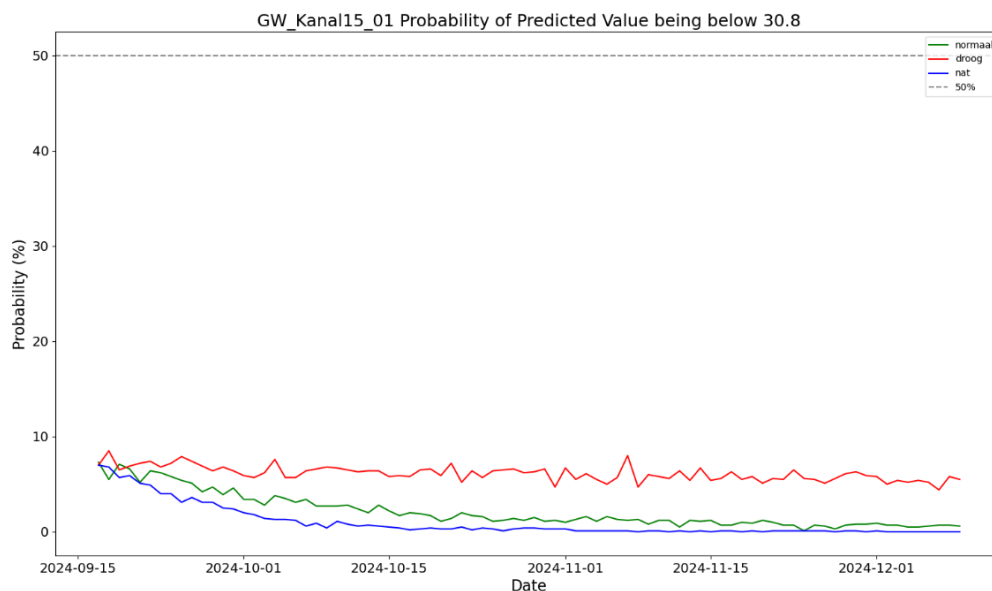
Figuur 64 Voorbeeld van een tijdreeks van onderschrijdingskansen van een kritische grondwaterstand van 31.2 m + NAP, zoals dit zou kunnen worden weergegeven op het droogte-dashboard van Waterschap Limburg, voor een normaal, een droog en een nat scenario. Een kans van 100% betekent zekerheid dat het kritische niveau wordt onderschreden, een kans van 0% betekent zekerheid dat het kritische niveau niet wordt onderschreden, bij een kans van 50% zijn over- en onderschrijding even waarschijnlijk.



Figuur 65 Voorbeeld van een tijdreeks van onderschrijdingskansen van een kritische grondwaterstand van 31.0 m + NAP, zoals dit zou kunnen worden weergegeven op het droogte-dashboard van Waterschap Limburg, voor een normaal, een droog en een nat scenario. Toelichting: zie Figuur 64.



Figuur 66 Voorbeeld van een tijdreeks van onderschrijdingskansen van een kritische grondwaterstand van 30.9 m + NAP, zoals dit zou kunnen worden weergegeven op het droogte-dashboard van Waterschap Limburg, voor een normaal, een droog en een nat scenario. Toelichting: zie Figuur 64.



Figuur 67 Voorbeeld van een tijdreeks van onderschrijdingskansen van een kritische grondwaterstand van 30.8 m + NAP, zoals dit zou kunnen worden weergegeven op het droogte-dashboard van Waterschap Limburg, voor een normaal, een droog en een nat scenario. Toelichting: zie Figuur 64.

Tijdens de workshop werd ook een kaart van een deel van Friesland getoond, die analoog aan Figuur 64 tot en met Figuur 67 de kansen tweedimensionaal weergeeft dat de grondwaterstand een bepaald kritisch niveau overschrijdt (Knotters et al., 2022, Figuur 9). De deelnemers aan de workshop gaven de volgende antwoorden op de vraag 'Hoe kwantificeren en visualiseren we onzekerheid in de Digital twin voor het Waterbeheer?' en reflecties op benutting van kennis van onzekerheid bij besluitvorming:

1. Over tijdreeksgrafieken met bandbreedtes, zoals de 95%-voorspellingsintervallen in Figuur 63, werd opgemerkt dat deze weergave van onzekerheid goed voldoet om een algemene indruk te krijgen. Ook werd opgemerkt dat er bij het thema Waterzuivering bandbreedtes worden berekend die in breedte toenemen met de tijd, en dat dit ook logischer is dan de bandbreedtes in Figuur 63 die een constante breedte hebben. Zoals opgemerkt, is dit het gevolg van de veronderstellingen waaronder de 95%-voorspellingsintervallen in Figuur 63 zijn geconstrueerd.
2. Over tijdreeksgrafieken met kansen dat de grondwaterstand onder een bepaald kritisch niveau komt, zoals in Figuur 64 tot en met Figuur 67, werd opgemerkt dat dit een goede weergave van onzekerheid is als beslissingen moeten worden genomen. Opgemerkt werd dat je direct kunt zien wat de kans op onderschrijding is, dat je er signaleringsregels aan kunt koppelen die medewerkers actief attenderen op mogelijke onderschrijdingen en dat ze inzicht geven in het risicoaspect van beslissingen. Als kanttekening werd opgemerkt dat gebruikers wel zeker moeten zijn over de kritische waarde die zij opgeven, omdat anders alsnog verkeerde beslissingen worden genomen. Bij relatief eenvoudige beslisproblemen kan weergave van onzekerheid in onder- of overschrijdingskansen echter prima werken.
3. Over kaarten die een ruimtelijk beeld geven van de kansen dat kritische niveaus in een gebied worden onder- of overschreden, werd opgemerkt dat deze nuttig zijn om een totaalbeeld te verkrijgen en te combineren zijn met andere kaarten, zoals de grondgebruikskaart, de bodemkaart en kaarten met ecologische kenmerken. Een beslissing op gebiedsniveau is relevanter dan op puntniveau. Een kritische ondergrens moet op gebiedsniveau worden ingesteld en zegt op puntniveau weinig.
4. Er werd opgemerkt dat de bruikbaarheid van tijdreeksgrafieken en kaarten met kansen verder wordt vergroot als de kansen worden vermenigvuldigd met effecten tot risico's. Hierbij werden financiële risico's genoemd en de kosten-batenafweging van het vergrote risico van natschade door water vast te houden om het risico van droogteschade te verkleinen. Ook risico's die niet eenvoudig in monetaire waarden zijn uit te drukken werden genoemd, zoals ecologische schade en psychologische schade die bij bewoners kan optreden door bijvoorbeeld derving van woongenot.
5. Genoemd werd dat onzekerheid eenduidig, uniform gevisualiseerd zou moeten worden, waarbij wel rekening wordt gehouden met verschillen in grootheden en tijdschalen. Ook kunnen verschillen in methode van kwantificering en visualisatie leiden tot verkeerd gebruik van gekwantificeerde onzekerheid.

-
6. Geadviseerd werd om aan te sluiten bij bestaande systemen waarin onzekerheid wordt gekwantificeerd en gevisualiseerd, en te adviseren over hoe dit in de toekomst kan worden verbeterd. Ook werd geadviseerd om de enorme kennis over visualisatie van onzekerheid die online beschikbaar is te benutten.
 7. Wat betreft benodigde expertise werd opgemerkt dat de weergave van onzekerheid niet voor iedereen leesbaar hoeft te zijn, omdat de informatie bedoeld is voor specialisten die de taak hebben op basis van deze informatie, gecombineerd met andere informatie, een advies te geven of een keuze te maken. Als een weergave van onzekerheid zoals met bandbreedtes (Figuur 63) wordt gepresenteerd aan een bredere groep, dan zou niet de weergave moeten worden vereenvoudigd, maar beter moeten worden toegelicht. Want vereenvoudiging kan tot ongewenst informatieverlies leiden. Opgemerkt werd dat er altijd een expert nodig is om de informatie te duiden en hydrologen en statistici moeten samenwerken om tot het resultaat te komen dat tot goede beslissingen kan leiden, gebaseerd op statistisch correcte interpretatie van data en modelresultaten voor zowel droogte-wateroverlast, waterkwaliteit als waterzuivering. Dataexperts zouden kennis moeten hebben van onzekerheid en de achterliggende theorie en moeten hiermee bewust kunnen omgaan. Mensen die werkzaam zijn in de waterschapsector zouden onzekerheid en statistiek als structurele onderdelen van hun werk moeten gaan zien.

Naast de bovenstaande opmerkingen met betrekking tot kwantificering en visualisatie van onzekerheid in de Digital twin voor het Waterbeheer werden de volgende, algemenere opmerkingen geplaatst:

1. Het is belangrijk om helder te zijn over de betrouwbaarheid van de informatie waarop beslissingen worden gebaseerd. Informatie over betrouwbaarheid wordt echter vaak complex gevonden. Ook wordt verlangd dat onderzoekers 'zekerheid' leveren. De vraag is dus hoe onzekerheidsinformatie moet worden gepresenteerd, zodat het begrepen en benut wordt.
2. Hoewel intuïtie en emotie een rol spelen in besluitvorming is het de taak van onderzoekers om rationele besluitvorming te faciliteren.
3. Bij digital twins wordt gebruikgemaakt van modellen en machinelearning, maar er wordt vanaf het begin onvoldoende rekening mee gehouden dat onzekerheid moet worden gekwantificeerd.
4. Belangrijk is of een digital twin wordt toegepast in een omgeving met een beperkt aantal parameters of in een omgeving die is omgeven van de onzekerheden.
5. Belangrijk is om bij visualisatie van onzekerheid rekening te houden met het verschil in dynamiek tussen beslissingen bij calamiteiten en beslissingen in bijvoorbeeld droogtesituaties. Er zijn verschillen in tijdhorizon en maatschappelijke impact.
6. Te veel focus op onzekerheid kan verlamrend werken op het ontdekken van nieuwe toepassingen.

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3406
ISSN 1566-7197



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Rapport 3406
ISSN 1566-7197



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.
