



KWR 2024.049 | Maart 2024

Digital Twin voor verbeterd voorraadbeheer bij ASR-systemen

Ontwikkeling en verkenning van de
potentie

Samenwerkingspartners



Rapport

Digital Twin voor verbeterd voorraadbeheer bij ASR-systemen

Ontwikkeling en verkenning van de potentie

KWR 2024.049 | Maart 2024

Opdrachtnummer

403855-001

Projectmanager

ir. H.J.M. (Eric) Broers

Opdrachtgever

TKI Watertechnologie

Auteur(s)

Dr. G. (Gilian) Schout (KWR), L.P. (Lennart) Brokx MSc (KWR), A. (Alifita) Ariestivi MSc (KWR),
ir. B.C.A. (Boyan) Domhof (Deltares)

Kwaliteitsborger(s)

N. (Niels) Hartog, PhD

TKI Samenwerkingspartners

Lucas Borst (PWN), Bas van Kuijk (Rijk Zwaan), Kees-Jan van der Made (Wiertsema & Partners),
Joeri van Engelen, Ida de Groot-Wallast (Deltares)

Keywords

Digital Twin, ASR, OWB, zoetwateropslag

Jaar van publicatie
2023

Meer informatie
Dr. Gilian Schout
T +31 6 54294203
E gilian.schout@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR

Maart 2024 ©

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

Samenvatting

Ondergrondse waterberging van zoetwater (OWB of 'Aquifer Storage and Recovery' (ASR)) is een techniek die in veel sectoren kan worden toegepast voor het verduurzamen van het watergebruik en het robuuster maken van de zoetwatervoorziening. In Nederland wordt deze techniek met name in de glastuinbouw al veelvuldig toegepast. Echter is er op dit moment bij gebruikers van dit soort systemen beperkt inzicht in de actuele zoetwatervoorraad, wat kan leiden tot suboptimaal gebruik van de ASR-systemen. Een Digital Twin, een virtuele 'kloon' die het werkelijke ASR-systeem nabootst, biedt in theorie de potentie om tot optimale benutting te komen. Om inzicht te krijgen in deze potentie en wat daar voor nodig is, was het doel van dit project was om Digital Twins te ontwikkelen voor twee ASR-systemen, en te evalueren of en hoe er tot een 'proof-of-concept' gekomen kan worden. Dit om een verbeterd inzicht te krijgen in de mogelijkheden en meerwaarde van digital twins voor ASR.

De twee hiervoor gebruikte casussen zijn een ASR-systeem voor de glastuinbouw in Dinteloord en een ASR-systeem voor de drinkwatervoorziening in Hoorn. Hiervoor zijn numerieke grondwatermodellen ontwikkeld die op basis van historische en actuele pompegevens het echte systeem proberen na te bootsen. Om deze modellen real-time mee te laten lopen met de fysieke ASR-systemen werden dagelijkse monitoringsgegevens van de ASR-putten geïmporteerd en werden de numerieke modellen iedere dag geactualiseerd. De monitoringsgegevens en de modelresultaten werden vervolgens gevisualiseerd in een beslissingsondersteunend dashboard. Voor de integratie tussen de ASR-systemen, de numerieke modellen en het dashboard is gebruik gemaakt van de Delft-FEWS software. Naast de actualisatie van de modellen tot de huidige situatie werden in het systeem ook dagelijks twee toekomstscenario's gesimuleerd met verschillende onttrekkingsdebieten, om een inschatting te krijgen van de nog winbare hoeveelheid opgeslagen zoetwater in de ondergrond. De ontwikkelde systemen hebben uiteindelijk ongeveer een jaar digitaal 'meegedraaid' met de fysieke ASR systemen.

Resultaten laten zien dat de koppeling van modelsimulaties en monitoringsgegevens technisch gezien mogelijk is, en dat de visualisatie hiervan op een dashboard meer inzicht biedt in de actuele zoetwatervoorraad als geheel dan in de huidige praktijk het geval is. Echter, op het niveau van individuele putfilters bleken de modellen alleen voor een subset van de putten de werkelijkheid goed na te bootsen. Bij de overige putten werd namelijk ofwel de timing ofwel de mate van verzilting tijdens de onttrekkingsfase niet goed voorspeld. Het inschatten van de nog resterende hoeveelheid bruikbaar water is bij die putten dan ook niet mogelijk, en in zijn geheel kan het ontwikkelde systeem dan ook niet betrouwbaar genoeg worden geacht om een sterke verbetering in het operationeel beheer van de ASR systemen mogelijk te maken.

Verdere kalibratie en optimalisatie van de modellen voor beide ASR systemen zou nodig zijn om de toegevoegde waarde te vergroten. Het is echter de vraag in hoeverre een goede match tussen model en werkelijkheid mogelijk is voor ieder putfilter. Hiervoor zou met name de heterogeniteit van de ondergrond veel gedetailleerder in het model ingebouwd moeten worden. Aangezien deze slechts beperkt bekend is, zou daar aanvullende karakterisatie voor nodig zijn. Naast het correct inbouwen van heterogeniteit in het model speelt ook mee dat er bij de opzet van het systeem rekening gehouden de capaciteit van de rekenserver en de gewenste frequentie waarmee het dashboard geactualiseerd moest worden. Om de gewenste frequentie te kunnen behalen moesten er juist versimpelende concessies gemaakt worden in termen van de temporele en ruimtelijke resolutie van de grondwatermodellen, en daarmee de accuraatheid van de modelvoorspellingen.

Al met al zijn bij dit onderzoek een aantal belangrijke beperkingen naar voren gekomen voor de potentie en mogelijke toegevoegde waarde van Digital Twins voor het operationeel beheer van ASR systemen. Hoewel het

technisch gezien mogelijk is gebleken om een digitale versie te koppelen aan de verzameling van veldgegevens, is er ook een spanningsveld tussen enerzijds de behoefte om voldoende snel online te kunnen rekenen en anderzijds de intrinsieke 3D complexiteit van de ondergrond die het een uitdaging maakt om tot digitale versies van het fysieke systeem te komen, en daadwerkelijke Digital Twins voor ASR mogelijk te maken. Voor verdere ontwikkeling naar verbeterd data-gedreven beheer van ASR-systemen voor opslag van zoet water in brakke of zoute aquifers zal dit geadresseerd moeten worden op basis van kosten-baten analyse ten opzichte van andere investeringen in alternatieven zoals aanvullende, gerichte grondwatermonitoring.

Inhoud

Samenwerkingspartners	2
Rapport	3
Samenvatting	4
Inhoud	6
1 Inleiding	8
1.1 Ondergrondse waterberging	8
1.2 Digital Twin	8
1.3 Doelen en activiteiten	8
1.4 Leeswijzer	9
2 Beschrijving ASR locaties en beschikbare veldgegevens	11
2.1 Hoorn	11
2.1.1 Systeembeschrijving	11
2.1.2 Beschikbare data	12
2.2 Dinteloord	13
2.2.1 Systeembeschrijving	13
2.2.2 Beschikbare data	13
2.2.3 ERT-metingen april 2022	15
3 Numerieke modellen: modelopzet, validatie en scenario's	16
3.1 Numerieke simulaties	16
3.2 ASR Hoorn	16
3.2.1 Geohydrologie	16
3.2.2 Puteigenschappen	18
3.2.3 Gebruiksscenario's	18
3.2.4 Modelopzet	18
3.2.5 Validatie	19
3.3 Dinteloord	21
3.3.1 Geohydrologie	21
3.3.2 Puteigenschappen	22
3.3.3 Gebruiksscenario's	22
3.3.4 Modelopzet	22
3.3.5 Validatie	23
3.3.6 Resultaten ERT metingen	24
4 Data-model integratie met FEWS	28
4.1 Introductie in Delft-FEWS	28
4.2 Opzet systeem	28

4.3	Workflows	29
4.3.1	Data import	29
4.3.2	Modelruns	29
4.4	Ontsluiting via webservice	31
4.5	Server	31
5	Beslissingsondersteunend dashboard	32
5.1	Aansturing	32
5.2	Functionaliteiten	33
5.3	Potentiële aanvullingen voor toekomstige ASR dashboards	33
6	Lessons learned	36
6.1	Opzet en ontwikkeling van de Digital Twins	37
6.2	Toegevoegde waarde Digital Twins t.o.v. conventionele monitoring en voorraadbeheer	Error! Bookmark not defined.
7	Conclusies en verdere ontwikkeling	40
8	Referentielijst	42
I.	Meetresultaten ERT-metingen	43
II.	TDS model vs. metingen Dinteloord	45
III.	Ontsluiting data via webservice	54

1 Inleiding

1.1 Ondergrondse waterberging

Ondergrondse waterberging van overtollig zoetwater speelt een belangrijke rol bij de verduurzaming van het waterverbruik in de agrarische, industriële en drinkwatersector. Ondergrondse waterberging (OWB), ook wel ASR ('Aquifer Storage and Recovery') genoemd, is een oplossing voor het kunnen overbruggen van de droge periodes, waarin te weinig neerslag door het bergen van grote hoeveelheden neerslag in de winter. Ten opzichte van meer traditionele wateropslagsystemen, zoals hemelwaterbassins en drinkwaterkelders, heeft ASR een aantal belangrijke voordelen. Zo is de beschikbare ondergrondse ruimte veel groter, is de ruimte die bovengronds nodig zeer beperkt, zijn er geen verliezen door verdamping, en is het water onder de grond beter beschermd tegen atmosferische en biologische vervuiling.

In Laag-Nederland is het grondwater over het algemeen brak tot zout. Door vermenging van het zoete opgeslagen water met het brakke of zoute natuurlijke grondwater en vervorming van de zoetwaterbel door oprijving is een deel van het opgeslagen zoete water niet meer terug te winnen. Op dit moment hebben gebruikers echter geen inzicht in de hoeveelheid opgeslagen zoet water die nog bruikbaar teruggewonnen kan worden. Dit in tegenstelling tot bij meer traditionele vormen van wateropslag, zoals drinkwaterkelders of hemelwaterbassins, waar de resterende hoeveelheid water in de opslag te allen tijde duidelijk is. Door deze onzekerheid worden ASR-systemen mogelijk suboptimaal gebruikt, en kan men bijvoorbeeld onverwachts door de voorraad heen zijn óf wordt juist onnodig veel water geïnfilteerd, wat extra kosten met zich meebrengt. Om deze redenen valt er mogelijk winst te behalen door gebruik te maken van innovatieve beheersystemen voor ASR, zowel financieel als wat betreft duurzaam water- en energieverbruik.

1.2 Digital Twin

Een Digital Twin of Digitale Tweeling is een virtuele versie van een in de werkelijkheid bestaand systeem dat op basis van frequent geactualiseerde meetgegevens het fysiek bestaande systeem nabootst. Het kan daarmee ook gebruikt worden om het huidige functioneren inzichtelijk te maken en toekomstig functioneren te voorspellen (Savić, 2022). Dergelijke systemen werden in de jaren zestig al veelvuldig gebruikt door NASA (Conejos Fuertes et al., 2020) en vinden de laatste jaren ook steeds meer hun weg binnen de watersector. Zo zijn er ondertussen al systemen ontwikkeld voor distributienetwerken van drinkwater (Conejos Fuertes et al., 2020; Martínez Alzamora et al., 2021; Savić, 2022), maar is er ook onderzoek gedaan naar geohydrologische toepassingen zoals Digital Twins voor het monitoren van zoutwaterinrusie (Leon et al., 2023), de verspreiding van verontreinigingen (Sookhak Lari et al., 2022) en voor het voorspellen van droogte en overstromingen (Henriksen et al., 2023).

Een Digital Twin voor ASR-systemen is tot op heden nog niet ontwikkeld, terwijl het concept van een Digital Twin hier wel geschikt voor lijkt. Enerzijds is er namelijk behoefte aan beschikbaarheid van gegevens over de nog beschikbare hoeveelheid opgeslagen zoetwater. Anderzijds wordt er bij ASR-systemen over het algemeen gemonitord en is er praktische ervaring met het modelleren van dit type systemen, waardoor het ook technisch haalbaar zou moeten zijn.

1.3 Doelen en activiteiten

Het primaire doel van dit TKI-project was om inzicht te krijgen in de potentie van Digital Twins voor ASR systemen die zoet water in brakke tot zoute aquifers opslaan, en wat daar voor nodig zodat het voor de gebruikers van ASR-systemen inzichtelijk gemaakt wordt wat de actuele staat is van de ondergrondse zoetwatervoorraad is en hoeveel zoetwater er nog nuttig kan worden teruggewonnen. Hierbij wordt de gebruiker dan van informatie voorzien via een online dashboard, dat wordt gevoed met actuele monitoringsdata en de resultaten van numerieke simulaties

voor het voorspellen van de toekomstige ontwikkeling van de zoetwatervoorraad.

In dit project hebben we de mogelijkheid voor het ontwikkelen van een digital twin voor twee dergelijke ASR systemen onderzocht: één voor een groot glastuinbouwbedrijf (Agro & Food cluster Nieuw Prinsenland) en één voor een drinkwaterbedrijf (PWN). Deze verschillende toepassingen stellen verschillende eisen aan het ASR-systeem waarop de Digital Twin getest kon worden. Op basis van de ervaringen die zijn opgedaan bij het ontwikkelen en in de lucht houden van deze twee Digital Twins is verder onderzocht hoe (1) zo'n systeem zo slim mogelijk kan worden ingericht en (2) wat de toegevoegde waarde is van een Digital Twin voor het beheer van een ASR systeem. Bij het kijken naar de toegevoegde waarde van het systeem wordt dit afgewogen tegen de huidige wijze van beheer en monitoring van ASR-systemen. Aanvankelijk was onderzoek naar 'alternatieve indicatoren' van ASR prestaties ook expliciet onderdeel van het project. Door tijd die nodig was voor het opzetten van de Digital Twin zelf (het primaire doel) was hier echter geen ruimte meer voor. De verschillende onderdelen van het project, de opbouw van het Digital Twin-systeem, en potentiële toekomstige toevoegingen zijn samengevat in Figuur 1-1.

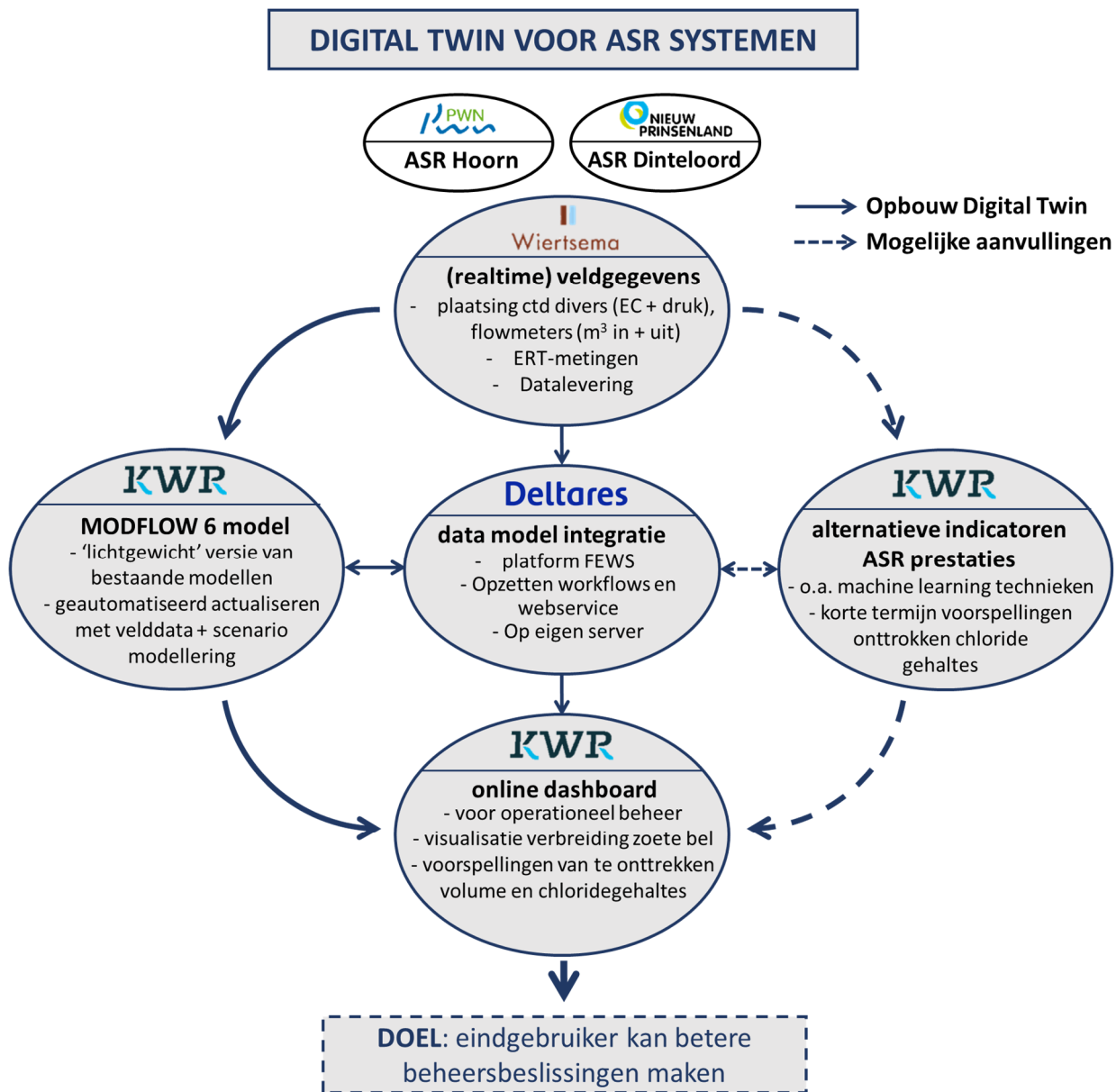
De twee in dit rapport beschreven casussen zijn gebruikt om te evalueren of en hoe er tot een 'proof-of-concept' gekomen kan worden. Dit om een verbeterd inzicht te krijgen in de mogelijkheden en meerwaarde van digital twins voor ASR als digitaal beheersysteem voor ASR-systemen, inclusief een online dashboard waarop naast de meest actuele veldgegevens ook informatie over het systeem volgend uit up-to-date numerieke grondwatermodellen beschikbaar zijn.

1.4 Leeswijzer

In deze rapportage is een overzicht gegeven van de achtergrond, ontwikkeling, status en potentiële aanvullingen van de ontwikkeling van Digital Twins voor de ASR-systemen in Hoorn en Dinteloord. In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van beide ASR-systemen in de fysieke werkelijkheid, inclusief de monitoring en daaraan gekoppelde beschikbare velddata. Daarna worden de verschillende onderdelen van het systeem één voor één besproken:

- Hoofdstuk 3: De opzet en validatie van de numerieke modellen voor de ASR-systemen.
- Hoofdstuk 4: De integratie tussen de numerieke modellen en de beschikbare velddata.
- Hoofdstuk 5: De ontwikkeling en opbouw van het dashboard waarop de velddata en modelresultaten getoond worden.

In Hoofdstuk 6 wordt het ontwikkelde systeem op de weegschaal gelegd om inzichtelijk te maken wat de tijdens het project geleerde lessen zijn met betrekking tot het opzetten en operationeel houden van een Digital Twin voor een ASR systeem, wat de toegevoegde waarde er van is ten opzichte van conventionele (veld)monitoring, hoe ze in de toekomst nog verder geoptimaliseerd kunnen worden, en wat eventuele alternatieven zouden kunnen zijn.



Figuur 1-1. Opzet en samenhang van de verschillende projectonderdelen. Aanvankelijk was onderzoek naar 'alternatieve indicatoren' ook expliciet onderdeel van het project. Door tijd die nodig was voor het opzetten van de Digital Twin zelf (het primaire doel) was hier echter geen ruimte meer voor.

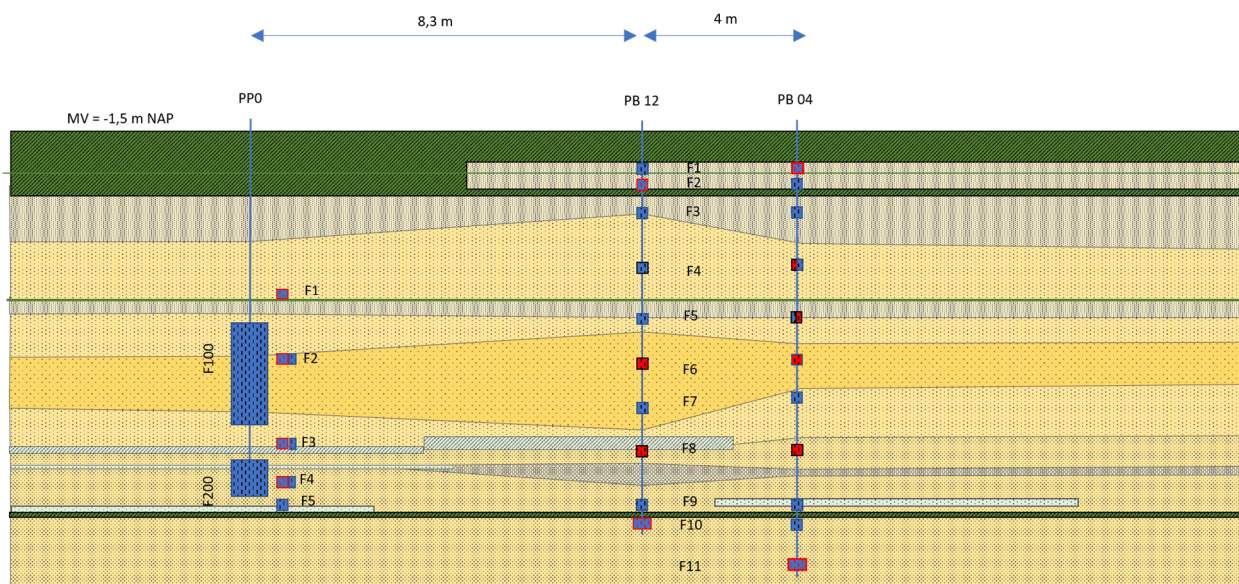
2 Beschrijving ASR locaties en beschikbare veldgegevens

2.1 Hoorn

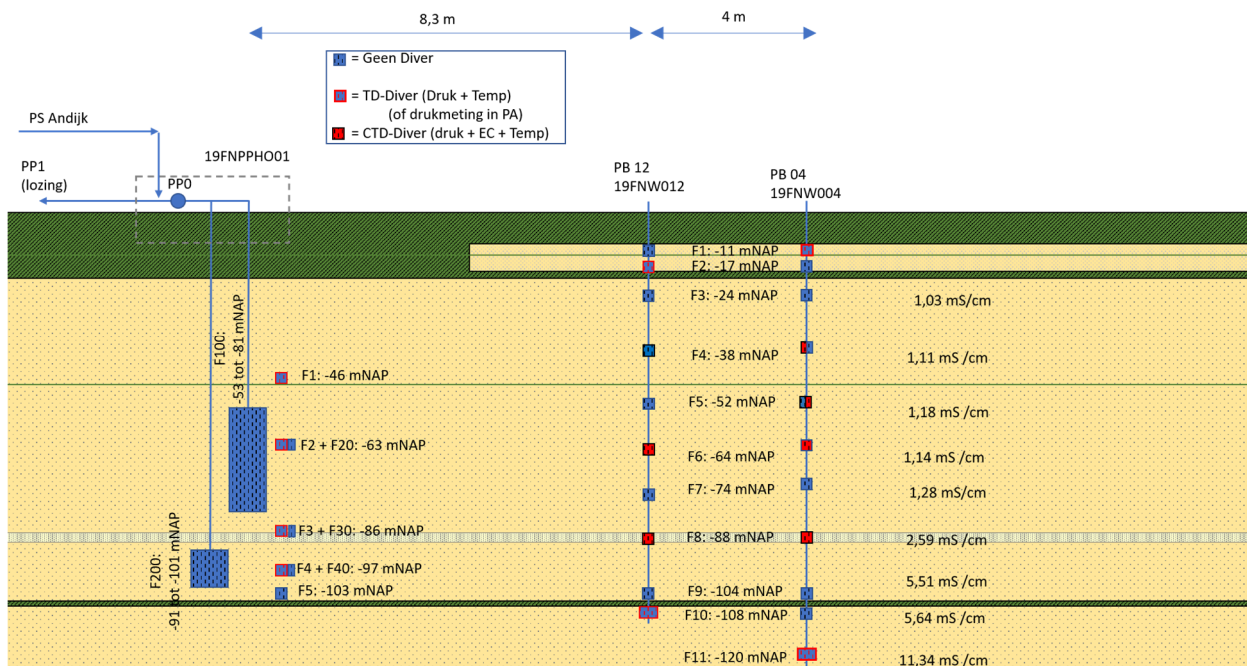
2.1.1 Systeembeschrijving

In mei 2020 is het drinkwaterbedrijf PWN begonnen met de ontwikkeling van een pilot om te onderzoeken of een ASR-systeem bij het distributiepompstation in Hoorn een geschikte optie is voor het creëren van een strategische drinkwatervoorraad. Hierbij wordt gebruik gemaakt van gezuiverd oppervlaktewater dat afkomstig is uit Andijk. Wanneer het ASR-systeem ontwikkeld wordt kan deze gebruikt worden om dag/nacht verschillen in watervraag te overbruggen, als seizoensberging en/of als calamiteitenvoorziening. Wanneer de pilot succesvol blijkt en het ASR-systeem opgeschaald wordt, zou de het systeem in de ordegrootte van honderdduizenden kubieke meters kunnen bergen (Zuurbier, Ros, et al., 2018).

In februari 2021 is de pilot gestart. Tijdens de pilot wordt water geïnfiltreerd en onttrokken door 1 put met 2 filters die onafhankelijk van elkaar water kunnen onttrekken en infiltreren (Figuur 2-1). Het bovenste filter heeft een lengte van ca. 28 meter en bevindt zich in de Formatie van Urk. Het onderste filter heeft een lengte van ca. 10 meter en bevindt zich in de Formatie van Appelscha. De filters zijn gescheiden door een discontinue dunne scheidende laag. Deze laag is bij de put en bij een peilbuis op 8 meter van de put wél aangetroffen maar bij een peilbuis op 12 meter van de put niet.

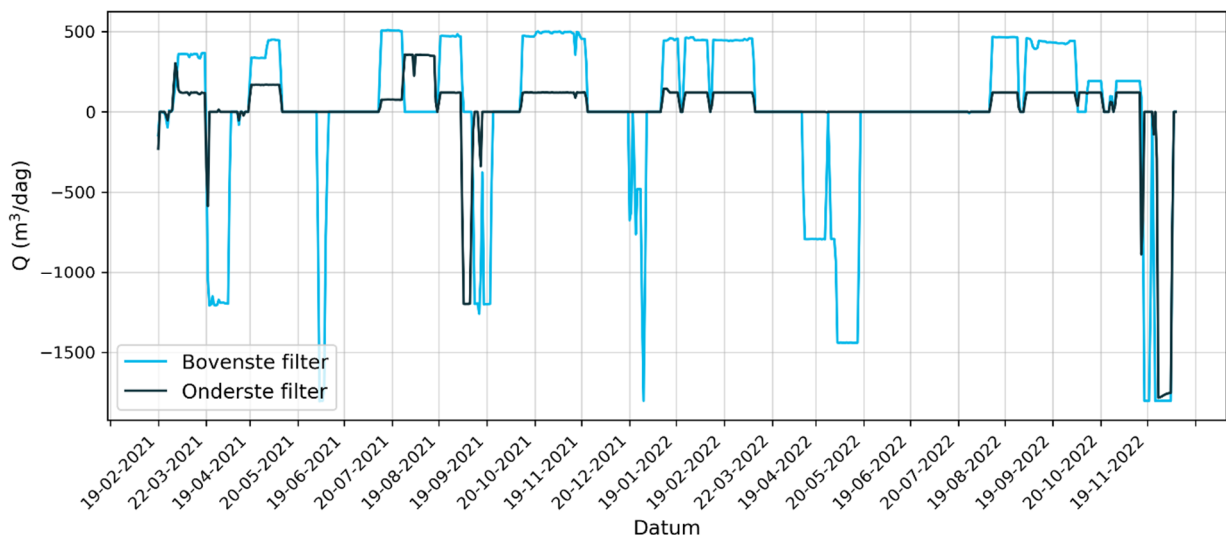


Figuur 2-1. Geohydrologische opbouw en relatieve locatie van de put- en monitoringsfilters van de ASR-pilot in Hoorn. Figuur geleverd door PWN.



Figuur 2-2. Locaties en dieptes van de divers en put- en monitoringfilters van de ASR-pilot in Hoorn. Figuur geleverd door PWN.

De totale looptijd van de pilot was ca. 2 jaar, tot en met december 2022 (Figuur 2-3). Binnen deze tijd is de potentie voor ASR in Hoorn getest aan de hand van een zestal infiltratie en onttrekkingscycli. Hierbij geldt dat de geïnfiltreerde en onttrokken hoeveelheden in het bovenste filter over het algemeen een stuk hoger waren dan in het onderste filter. In totaal is er in het bovenste filter ca. 102.000 m³ geïnfiltrerd en ca. 115.000 m³ onttrokken, en in het onderste filter ca. 38.000 m³ geïnfiltrerd en ca. 28.000 m³ onttrokken.



Figuur 2-3. Verpompte debieten tijdens de pilot voor de ASR-pilot in Hoorn.

2.1.2 Beschikbare data en datagebruik

Bij de ASR-pilot in Hoorn wordt in de putten continue gemonitord. Eén keer per half uur wordt de gemonitorde data geregistreerd. De gemonitorde parameters zijn:

- Volumestroom door de infiltratieleiding voor elk van de filters (m³/uur);
- Volumestroom door de onttrekkingsleiding voor elk van de filters (m³/uur);
- Stijghoogte in allebei de filters (mNAP);
- Stijghoogte in de omstorting van allebei de filters (mNAP);

- Geleidbaarheid in de leiding van/naar elk van de filters (mS/m);
- Temperatuur in de leiding van/naar elk van de filters (°C).

Ook zijn er verschillende peilbuizen geplaatst rondom de put, waarin wekelijks de chlorideconcentratie en het elektrisch geleidingsvermogen worden bemonsterd. Op basis hiervan kan een beeld worden verkregen van de locatie en verplaatsing van de zoetwaterbel. Daarnaast wordt ook het gezuiverde oppervlaktewater dat vanuit Andijk richting Hoorn wordt verpompt bemonsterd om de kwaliteit van het infiltratiewater in kaart te brengen.

De monitoringsdata van de pilot in Hoorn wordt met enige regelmaat handmatig aangeleverd door waterleidingbedrijf PWN. In tegenstelling tot het systeem in Dinteloord (zie Paragraaf 2.2) kan het systeem in Hoorn dus (nog) niet direct aan het Digital Twin-systeem gekoppeld worden.

2.2 Dinteloord

2.2.1 Systeembeschrijving

In het glastuinbouwgebied Agro & Food Cluster Nieuw Prinsenland in Dinteloord is een ASR-systeem aangelegd ten behoeve van de seizoensopslag van hemelwater en gezuiverd effluent afkomstig van een suikerfabriek (Zuurbier & Ros, 2017; Zuurbier & Van Dooren, 2019). Het ASR-systeem heeft een buffercapaciteit van ongeveer 200.000 m³ en levert gedurende de zomermaanden gietwater aan de glastuinbouw (Figuur 2-4). De eerste bron is in februari 2016 in gebruik genomen en het systeem is in de periode tot en met september 2018 uitgebreid tot 8 bronnen.

Het ASR-systeem is verdeeld in 4 clusters van 2 putten, welke min of meer in een rechte lijn zijn geplaatst (Figuur 2-5). De eerste put die gerealiseerd is, Put 1, bestaat uit 4 onder elkaar gelegen putfilters. De eerste meetresultaten bij deze put lieten zien dat opdrijving relatief beperkt was tijdens opslag, daarom is er voor gekozen om de overige 7 putten slechts met 2 in plaats van 4 putfilters af te werken. De filters zijn geplaatst op ca. 13 tot 30 m-NAP in het zandige gedeelte van de Formatie van Waalre. Bij de laatste evaluatie van het systeem in augustus 2022 was er in totaal ca. 700.000 m³ in het systeem geïnfiltrerd en ca. 435.000 m³ uit het systeem onttrokken.

2.2.2 Beschikbare data en datagebruik

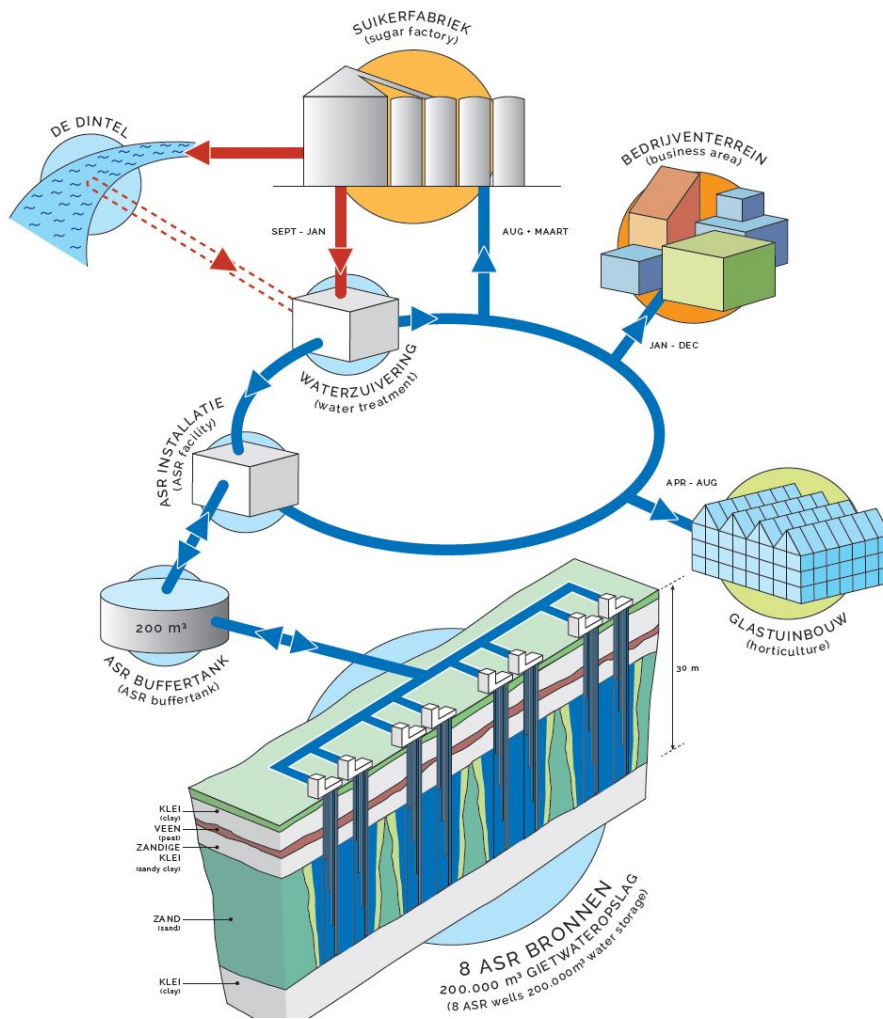
De putfilters van het ASR-systeem worden continue gemonitord. Tot september 2017 werd de monitoringsdata iedere 10 minuten weggeschreven, sindsdien is dit ieder uur. De gemonitorde parameters zijn:

- De elektrische geleidbaarheid in ieder putfilter (mS/m);
- Het totaal geïnfiltrerd volume in ieder putfilter (m³);
- Het totaal onttrokken volume in ieder putfilter (m³).

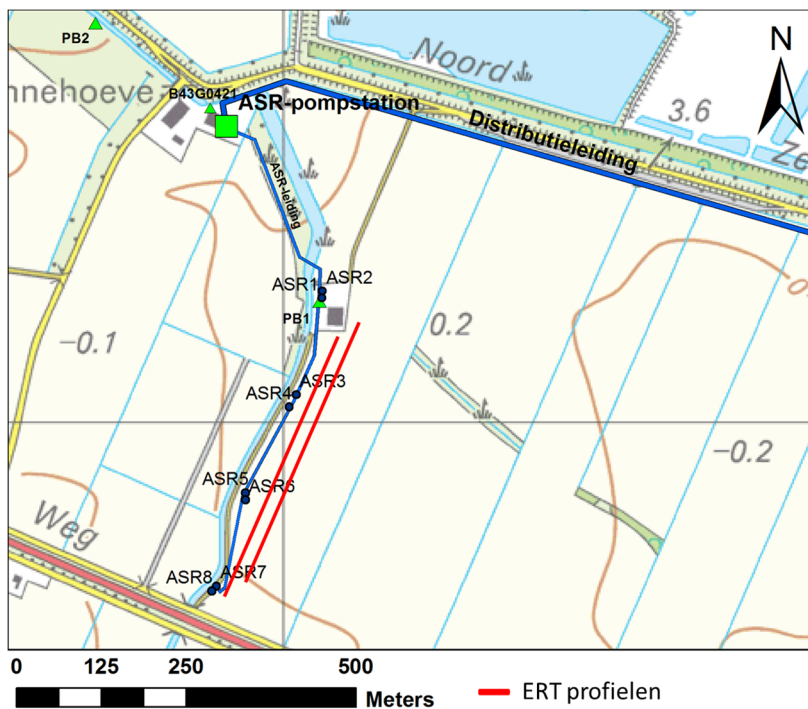
Via een automatisch aangestuurd systeem worden putten uitgeschakeld wanneer de gemeten EC hoger is dan een door de gebruiker te bepalen grenswaarde. Deze waarde is in principe ingesteld op 0,3 mS/cm. Bij een evaluatie van de werking van het systeem in 2022 (Brokx et al., 2022) bleek dit systeem echter niet helemaal correct te werken. Zo werd bij een aantal putten ondanks een overschrijding van de grenswaarde toch water onttrokken. Bij andere putfilters werd juist niet onttrokken terwijl de EC onder de grenswaarde lag.

De in de putfilters gemonitorde data wordt automatisch ontsloten via een FTP-server, waardoor de data direct beschikbaar is en ingezien kan worden via een gekoppeld dashboard. Dit betekent dat de data ook real-time beschikbaar is voor koppeling aan het Digital Twin-systeem.

In de twee peilbuizen nabij het ASR-systeem (Figuur 2-5) wordt de stijghoogte en de elektrische geleidbaarheid gemonitord met CTD-divers. De data uit de peilbuizen moet handmatig uitgelezen worden en kan dus niet direct gekoppeld worden aan het Digital Twin-systeem. Bij nadere waterkwaliteitsanalyses wordt het influent en het effluent van het systeem bemonsterd.



Figuur 2-4. Schematische weergave van het gietwatersysteem in Dinteloord (Zuurbier & Ros, 2017).

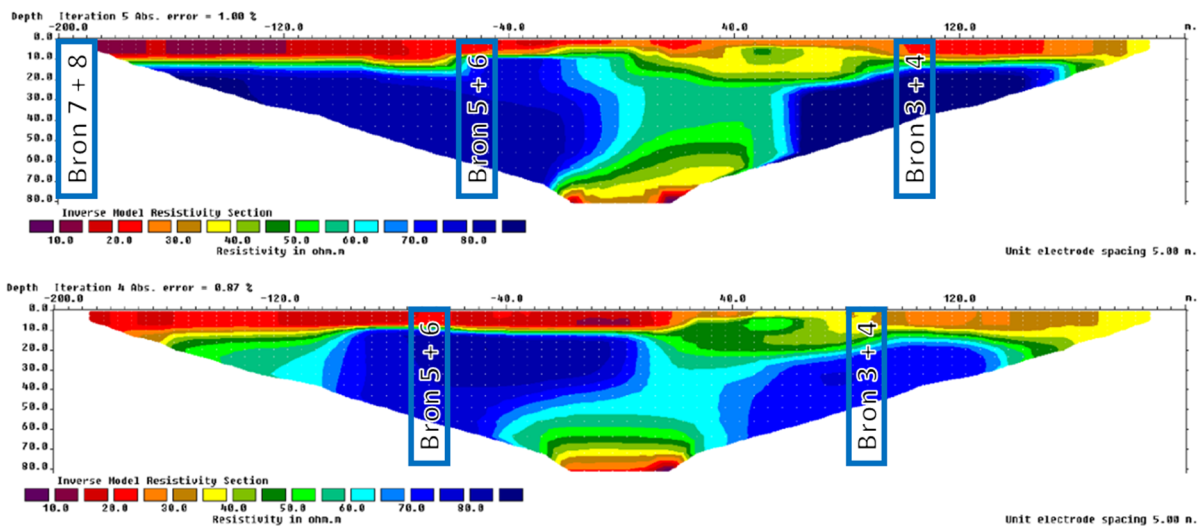


Figuur 2-5. Overzicht van de bronlocaties en monitoringsputten (PB1 en PB2) van de ASR in Dinteloord (Zuurbier & Van Dooren, 2019). Ook getoond zijn de profielen van de door Wiertsema uitgevoerde ERT metingen.

2.2.3 ERT-metingen april 2022

Op 26 april 2022 is door Raadgevend Ingenieursbureau Wiertsema & Partners (hierna: Wiertsema) een tweetal ERT-metingen ('Electrical resistivity tomography') uitgevoerd, een type elektrische weerstandsmeting. Gezien dit systeem al sinds 2016 operationeel en er enige onzekerheid bestond omtrent de precieze boekhouding van de verpompte volumes door de jaren, was het beoogd doel van deze metingen om nauwkeuriger de actuele verbreiding van de zoetwaterbellen van het ASR-systeem. Resultaten van de metingen zijn beschreven in (Van der Made & Groen, 2022)).

Uitgangspunt bij deze metingen is dat het zoete geïnfilterde water een hogere elektrische weerstand heeft, oftewel minder geleidend is, dan het ietwat brakkere natuurlijke grondwater. De metingen zijn uitgevoerd langs twee lijnen parallel aan de ASR-putten om zo twee profielen van de weerstand te verkrijgen. De locaties van de lijnen is gekozen op basis van tussentijdse resultaten van het grondwatermodel (Hoofdstuk 3.3). De eerste meting is uitgevoerd op 20-35 meter van de putten, de tweede op de verwachte rand van de zoetwaterbel 45-60 meter van de putten. Een resultaat van de ERT-metingen is weergegeven in Figuur 2-7. Over het algemeen geldt hier dat de hogere weerstandswaarde de locatie van de zoetwaterbel representeren, al wordt de weerstand ook beïnvloed door het formatiemateriaal. De weerstandsmetingen laten voornamelijk de locatie van de zoetwaterbel bij ASR-putten 3+4 en 5+6 zien. De waterbellen van ASR-putten 1+2 en 7+8 liggen grotendeels buiten het meetgebied. De overige meetresultaten van de ERT-metingen zijn opgenomen in Bijlage I.



Figuur 2-6. Figuur 2-7. Resultaten van de ERT-metingen uitgevoerd door Wiertsema. Boven: meting 1 op 20-35 meter van de putten. Onder: meting 2 op 45-60 meter van de putten (van der Made & Groen, 2022). De meting is zuid-noord uitgevoerd, met aan de linkerkant het zuiden (ASR-put 7+8) en aan de rechterkant het noorden (ASR-put 1+2). Locaties van de bronnen langs de x-as zijn indicatief. Zie Figuur 2.5 voor de locatie van de ERT lijnen op de kaart.

3 Numerieke modellen: modelopzet, validatie en scenario's

3.1 Numerieke simulaties

Voor het uitvoeren van de numerieke simulaties wordt gebruik gemaakt van MODFLOW 6 voor geohydrologische modellering waarin grondwaterstroming en stoftransport dynamisch worden gekoppeld (Langevin et al., 2017). Voor het invoeren en wegschrijven van de invoerparameters wordt gebruik gemaakt van het Python-pakket FloPy (Bakker et al., 2018).

Dichtheidsstroming als gevolg van dichtheidsverschillen tussen zoet en zout water wordt meegenomen in de simulaties, gebruik makend van een lineair verband tussen het zoutgehalte (in de vorm van 'Total Dissolved Solids' (TDS)) en de dichtheid van het grondwater. Om ondanks de dichtheidsverschillen toch stabiele initiële condities en randvoorwaarden in het model te creëren zijn de initiële stijghoogtes en stijghoogtes bij de randvoorwaarden gecorrigeerd op basis van de methoden beschreven door (Langevin et al., 2019).

3.2 ASR Hoorn

3.2.1 Geohydrologie

De lagenopbouw van het model (Tabel 3-1) is overgenomen uit een eerdere modelstudie voor de ASR in Hoorn (Ros & Boer, 2020) en aangepast naar aanleiding van nieuwe inzichten over de geohydrologie bij het ASR-systeem. Belangrijkste aanpassing is de toevoeging van twee dunne kleilagen op 87-89 m-mv en 91-93 m-mv die in de eerdere studie niet meegenomen werden maar in later uitgevoerde metingen aangetroffen zijn. Deze kleilagen bevinden zich tussen de twee filters van het ASR-systeem (Tabel 3-1).

De onderkant van het model is gelijk aan de hydrologische basis van het eerste watervoerende pakket op de ASR-locatie, op de bovengrens van de Formatie van Maassluis. De bovenste 9,40 m van de deklaag worden niet meegenomen in de modelsimulaties, aangezien de hydrologische effecten die hier optreden door het ASR-systeem ten aanzien van het functioneren van de ASR zelf verwaarloosbaar worden geacht.

Het maaiveld op de ASR-locatie bevindt zich op 1 m-NAP en de initiële stijghoogte is 2,5 m-NAP over de gehele diepte. De zoutconcentraties C_{TDS} (g/l) van het grondwater, uitgedrukt in 'Total Dissolved Solids' (TDS), worden berekend aan de hand van een lineair verband dat is afgeleid aan de hand van EC-metingen (mS/cm) en TDS-metingen op de pilotlocatie in Hoorn. Hiervoor geldt:

$$C_{TDS} = 0,8 EC$$

Omdat EC-metingen slechts op enkele diepteintervallen verricht zijn, is er gebruik gemaakt van een lineaire interpolatie voor het inschatten van de initiële TDS-concentraties over de gehele diepte van het model.

Tabel 3-1. Lagenopbouw gebruikt voor grondwatermodel voor de ASR in Hoorn. Putfilters bevinden zich in de blauw gearceerde lagen. Cursieve waarden voor de C_{TDS} zijn direct afgeleid van de EC-metingen, tussenliggende waarden zijn geïnterpoleerd. De gele rijen geven zandige lagen weer, de grijze rijen kleiige lagen.

Laag	Top m NAP	Bot m NAP	Porositeit -	S_s -	K_h m/d	K_h/K_v	c d	C_{TDS} g/l
1	-10,9	-13,3	0,35	1,0E-04	5	10		0,96
2	-13,3	-14,0	0,2	1,0E-03	0,01	10	700	0,96
3	-14,0	-16,0	0,35	1,0E-04	5,8	10		0,95
4	-16,0	-18,0	0,35	1,0E-04	5,8	10		0,94
5	-18,0	-20,0	0,2	1,0E-03	0,01	10	2000	0,93
6	-20,0	-22,0	0,35	1,0E-06	11,6	4		0,91
7	-22,0	-24,0	0,35	1,0E-06	11,6	4		0,90
8	-24,0	-26,0	0,35	1,0E-06	11,6	4		0,89
9	-26,0	-28,0	0,35	1,0E-06	11,6	4		0,89
10	-28,0	-30,0	0,35	1,0E-06	11,6	4		0,89
11	-30,0	-31,5	0,35	1,0E-06	11,6	4		0,89
12	-31,5	-33,0	0,35	1,0E-06	11,6	4		0,89
13	-33,0	-34,5	0,35	1,0E-06	16	3		0,89
14	-34,5	-36,5	0,35	1,0E-06	23,8	2		0,89
15	-36,5	-38,5	0,35	1,0E-06	23,8	2		0,89
16	-38,5	-40,5	0,35	1,0E-06	23,8	2		0,90
17	-40,5	-42,5	0,35	1,0E-06	23,8	2		0,90
18	-42,5	-44,5	0,35	1,0E-06	23,8	2		0,91
19	-44,5	-46,5	0,35	1,0E-06	23,8	2		0,92
20	-46,5	-48,0	0,35	1,0E-06	40	2		0,93
21	-48,0	-48,5	0,3	1,0E-04	10	2		0,93
22	-48,5	-50,5	0,35	1,0E-07	18,4	2		0,94
23	-50,5	-52,5	0,35	1,0E-07	24,8	2		0,95
24	-52,5	-54,0	0,35	1,0E-07	30	2		0,97
25	-54,0	-55,5	0,35	1,0E-07	30	2		0,98
26	-55,5	-57,0	0,35	1,0E-07	30	2		1,00
27	-57,0	-58,5	0,35	1,0E-07	30	2		1,02
28	-58,5	-59,5	0,35	1,0E-07	30	2		1,03
29	-59,5	-61,0	0,35	1,0E-07	50	2		1,04
30	-61,0	-62,5	0,35	1,0E-07	40	2		1,06
31	-62,5	-64,0	0,35	1,0E-07	40	2		1,08
32	-64,0	-65,5	0,35	1,0E-07	40	2		1,13
33	-65,5	-67,0	0,35	1,0E-07	40	2		1,19
34	-67,0	-68,5	0,35	1,0E-07	50	2		1,25
35	-68,5	-70,5	0,35	1,0E-07	50	2		1,32
36	-70,5	-72,5	0,35	1,0E-07	50	2		1,40
37	-72,5	-74,0	0,35	1,0E-07	45	2		1,46
38	-74,0	-75,5	0,35	1,0E-07	45	2		1,52
39	-75,5	-77,0	0,35	1,0E-07	45	2		1,58
40	-77,0	-78,5	0,35	1,0E-07	45	2		1,71
41	-78,5	-80,0	0,35	1,0E-07	45	2		1,83
42	-80,0	-81,5	0,35	1,0E-07	45	2		1,96
43	-81,5	-83,0	0,35	1,0E-07	45	2		2,09
44	-83,0	-84,5	0,35	1,0E-07	40	2		2,22
45	-84,5	-86,0	0,35	1,0E-07	34	2		2,34
46	-86,0	-87,5	0,35	1,0E-07	34	2		2,47
47	-87,5	-88,5	0,35	1,0E-07	34	2		2,58
48	-88,5	-89,5	0,35	1,0E-07	0,1	10	100	2,75
49	-89,5	-90,5	0,35	1,0E-07	0,1	10	100	2,92
50	-90,5	-91,5	0,35	1,0E-07	17	2		3,09
51	-91,5	-92,5	0,35	1,0E-07	17	2		3,26
52	-92,5	-93,5	0,35	1,0E-07	0,1	10	100	3,43
53	-93,5	-94,5	0,35	1,0E-07	0,1	10	100	3,60
54	-94,5	-95,5	0,35	1,0E-07	10	2		3,77
55	-95,5	-96,5	0,35	1,0E-07	30	2		3,94
56	-96,5	-97,5	0,35	1,0E-07	30	2		4,11
57	-97,5	-98,5	0,35	1,0E-07	30	2		4,34
58	-98,5	-99,5	0,35	1,0E-07	30	1		4,56
59	-99,5	-101,0	0,35	1,0E-07	30	1		4,78
60	-101,0	-102,5	0,35	1,0E-07	30	1		5,12
61	-102,5	-103,5	0,35	1,0E-07	30	1		5,46
62	-103,5	-104,5	0,35	1,0E-07	10	2		5,68
63	-104,5	-105,5	0,35	1,0E-07	10	2		5,77
64	-105,5	-105,9	0,3	1,0E-06	0,090	10	44,444444	5,83
65	-105,9	-106,4	0,3	1,0E-06	0,090	10	55,555556	5,87

66	-106,4	-107,5	0,3	1,0E-08	15,9	3	5,95
67	-107,5	-112,5	0,3	1,0E-08	34,5	2	6,22
68	-112,5	-117,5	0,3	1,0E-08	34,5	2	8,16
69	-117,5	-121,5	0,3	1,0E-08	52	1	9,90
70	-121,5	-131,5	0,3	1,0E-08	59,06	1	9,90
71	-131,5	-141,5	0,3	1,0E-08	59,06	1	10,52
72	-141,5	-181,5	0,3	1,0E-08	59,06	1	14,22
73	-181,5	-221,5	0,3	1,0E-08	59,06	1	20,44
74	-221,5	-261,5	0,3	1,0E-08	59,06	1	20,44

3.2.2 Puteigenschappen

De pilot voor het ASR-systeem in Hoorn bestaat uit één put met twee filters die onafhankelijk van elkaar kunnen onttrekken en infiltreren. Het bovenste filter is geplaatst op 52,5-83 m-NAP in de Formatie van Urk. Het onderste filter is geplaatst op 95,5-104,5 m-NAP in de Formatie van Appelscha.

De door PWN aangeleverde historische pompdata bestaat uit momentopnamen van gemeten stroomsnelheden (in m³/uur). Het verpompte volume tussen twee van deze momentopnamen is berekend op basis van de gemiddelde stroomsnelheid van en het tijdsverschil tussen deze momentopnamen. Het verpompte volume per dag, gebruikt als modelinput, is gelijk aan de som van de volumes tussen de momentopnamen op een dag. Voor bepaalde momentopnamen is de stroomsnelheid niet geregistreerd en is er geen geldige waarde in de dataset. Voor deze momentopnamen is de stroomsnelheid ingeschat op basis van een lineaire tijdsafhankelijke interpolatie tussen de twee meest nabijgelegen momenten waarop het debiet wel correct geregistreerd is.

In beide filters worden de infiltratie- en onttrekkingsdebieten over de modellagen verdeeld op basis van de relatieve kD-waarde (de doorlatendheid maal de laagdikte) van iedere modellaag ten opzichte van de totale kD van de modellagen waarin de putten zich bevinden. De injectieconcentratie in beide filters is 0,55 g/l. Naast de TDS-concentratie is er ook een tweede conservatieve stof toegevoegd aan het model die de fractie infiltratiewater in de bodem beschrijft, waarbij een waarde van 1 gelijk is aan 100% infiltratiewater en een waarde van 0 gelijk is aan 100% natuurlijk grondwater.

3.2.3 Gebruiksscenario's

In het Digital Twin-systeem wordt, in aanvulling op het actualiseren van de modellen op basis van de actuele meetgegevens, ook een tweetal gebruiksscenario's gedraaid om iedere dag een inschatting te kunnen maken van de hoeveelheid zoet water die nog door beide putten onttrokken kan worden:

Scenario 1, maximale capaciteit:

- 3 weken lang onttrekken aan 100 m³/uur;
- Scenario waarin de ASR ingeschakeld wordt omdat een andere bron (bijv. Andijk) tijdelijk wegvalt;
- In het uiteindelijke ontwerp bestaat de ASR in Hoorn uit 10 putten die in totaal 1000 m³/uur moeten kunnen onttrekken bij calamiteiten, dit scenario beslaat dus 1/10^e hiervan met één put.

Scenario 2, 'pieken scheren':

- 6 weken lang onttrekken aan 50 m³/uur.
- Opvangen van hoge watervraag vanuit Andijk in droge periodes.

In beide scenario's wordt 2/3^e onttrokken uit het bovenste filter en 1/3^e uit het onderste filter. Door op deze manier gebruik te maken van de verschillende putfilters worden de negatieve effecten van opdrijving deels gemitigeerd, wat gunstig is voor het opslagrendement (Zuurbier et al., 2014).

3.2.4 Modelopzet

Voor het simuleren van het ASR-systeem wordt gebruik gemaakt van een 3D-model, met de ASR-put in het centrum van het model. Omdat de achtergrondstroming verwaarloosbaar is en de gelaagdheid in het modelgebied nagenoeg horizontaal, had er ook gebruik gemaakt kunnen worden van een radiaal symmetrisch model. Echter is er

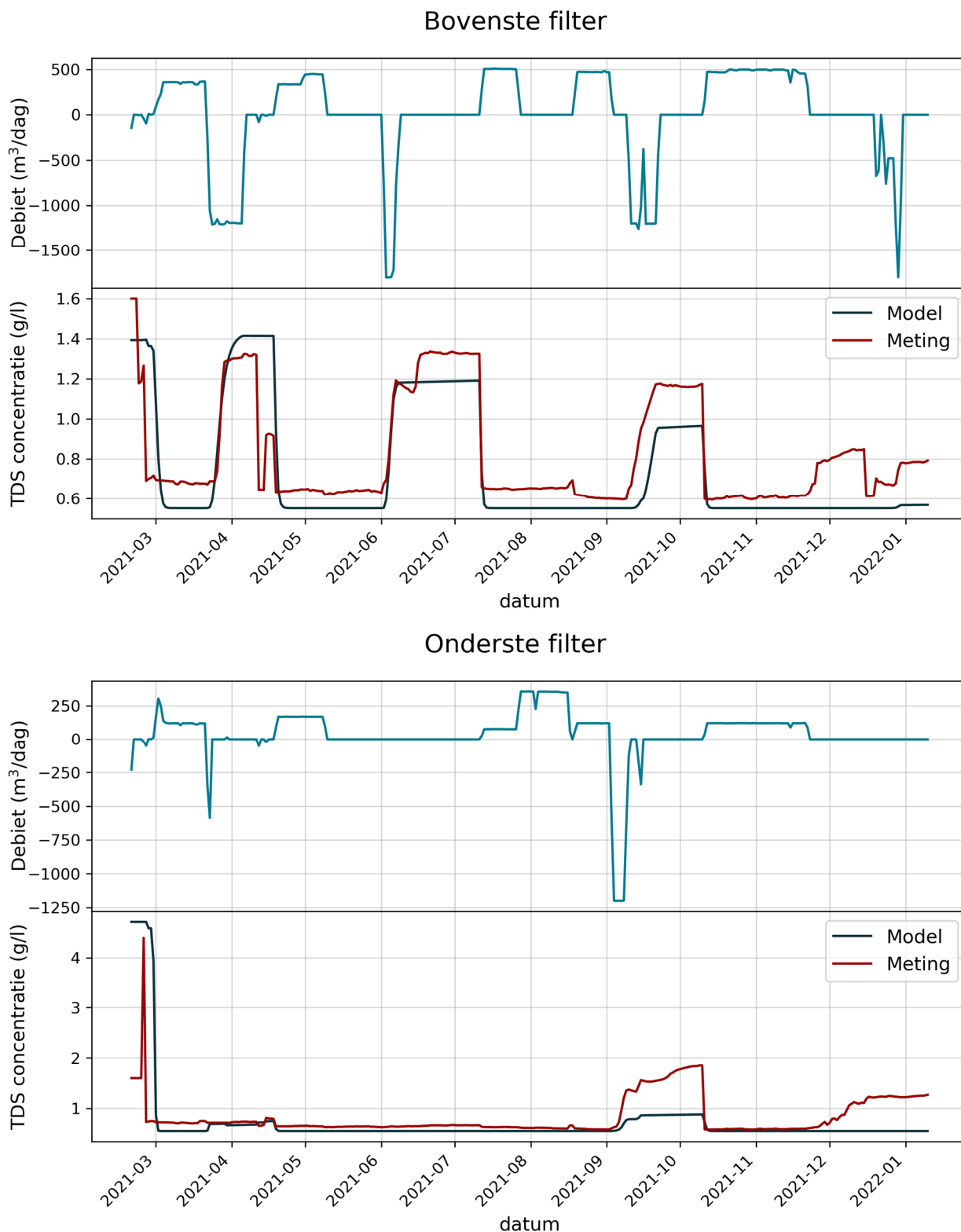
gekozen voor een 3D model omdat een 3D-model uitbreiding tot een model met meerdere putten vergemakkelijkt wanneer ervoor gekozen wordt de ASR-pilot door te ontwikkelen. Daarnaast zijn bepaalde lagen rondom het ASR-systeem niet overal aanwezig (Figuur 2-1) en kan er bij een 3D-model in een later stadium nog gekozen worden om deze variaties in ruimte aan te brengen in het model (heterogeniteit), wat met een radiaal symmetrisch niet mogelijk is.

Het model bestaat uit 80 kolommen, 80 rijen en 74 modellagen. Rondom de put is de celgrootte 5 bij 5 meter. Deze discretisatie is overgenomen vanuit de eerder gemaakte modellen voor dit systeem (Ros & Boer, 2020). Vanaf een afstand van 100 meter van de put neemt de celgrootte geleidelijk toe tot 100 meter op de randen van het model. De verticale discretisatie is zoals weergegeven in Tabel 3-1. Om dichtheidsstroming beter te kunnen simuleren is de laagdikte op de diepte van de putten verfijnd tot 1,5 m bij putfilter 1 en 1 m bij putfilter 2.

Op de modelranden, zowel aan de buitenranden als de onder- en bovenrand, worden de concentraties (TDS + infiltratiewater) in het grondwater constant gehouden. De stijghoogte aan de buitenranden van het model worden bepaald op basis van een 'general head boundary', waarmee een vastgelegde stijghoogte op een grotere afstand wordt nagebootst. Door de toepassing van een 'general head boundary' kan het modelgebied kleiner gehouden worden en dus rekentijd worden bespaard, hetgeen belangrijk is voor de toepassing in een Digital Twin systeem waar de rekentijd snel beperkend is. Hydrodynamische dispersie in het model is gelijk gesteld aan 0,1 m horizontaal in de stroomrichting en 0,01 m loodrecht op de stroomrichting.

3.2.5 Validatie

Ter validatie zijn de modelresultaten vergeleken met de TDS-concentraties volgend uit de EC-metingen in de putfilters. Deze vergelijking is afgebeeld in Figuur 3-1. In het bovenste filter is de timing en piek van de doorbraak van zouter achtergrondwater tijdens onttrekking vergelijkbaar voor het model en de metingen, zeker tijdens de eerste twee cycli. Voor het onderste filter is de timing van de doorbraak in het 3^e kwartaal van 2021 wel gelijk, maar is het zoutgehalte van het onttrokken water in de praktijk hoger dan van de modelresultaten. Tijdens de laatste onttrekkingscyclus, eind 2021, vallen de metingen en de modelresultaten niet langer goed samen in zowel het bovenste als het onderste filter. De gemeten EC (en dus de TDS-concentratie) loopt hier al op bij beide filters vóórdat er wordt onttrokken. Enerzijds zou dit kunnen betekenen dat door opdrijving het brakke water de filters al bereikt heeft. Anderzijds zou het ook een meetfout kunnen zijn die optreedt wanneer de pompen van de put uitstaan, zoals ook geldt voor de metingen in Dinteloord (Paragraaf 3.3). Tijdens de laatste cyclus is wel een kleine toename van de TDS in het bovenste filter waarneembaar in de modelresultaten, die qua timing samenvalt met de laatste toename van de gemeten waarde, maar qua grootte niet.



Figuur 3-1. Debieten, TDS-concentraties uit het model en TDS-concentraties op basis van de in de filters gemeten EC-waarden (op basis van $C_{TDS} = 0,8$ EC) in het bovenste filter (a) en het onderste filter (b).

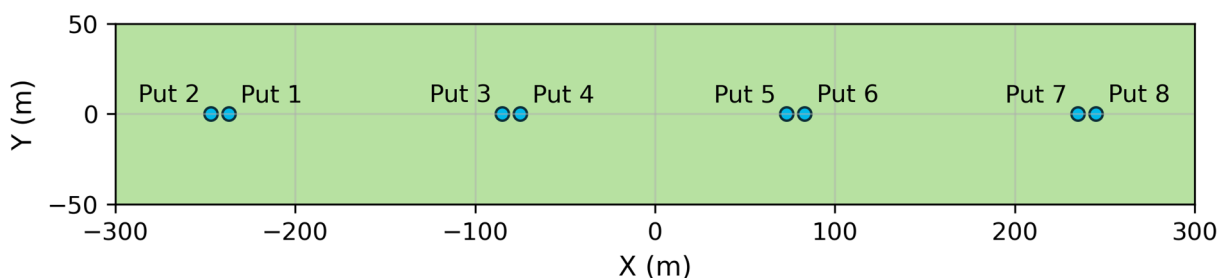
32	-39,0	-44,0	0,2	1,0E-05	0,02	2500	10	1,00
33	-44,0	-49,0	0,2	1,0E-05	0,02	2500	10	1,00

3.3.2 Puteigenschappen

Het ASR-systeem in Dinteloord bestaat uit 8 putten die ieder meerdere putfilters bevatten. Put 1 bestaat uit 4 putfilters, Put 2 t/m 8 ieder uit 2 putfilters (Tabel 3-2). De bovenste helft en onderste helft van de filters wordt gescheiden door een dunne slecht doorlatende laag met een weerstand van 25 d. Omdat de putten van ASR-systeem redelijk op één lijn liggen (Paragraaf 2.2), worden deze in het grondwatermodel allemaal geplaatst op één lijn op de x-as (Figuur 3-2). Gezien de putten per tweetal geschakeld zijn ontstaan er op die manier er vier verschillende zoetwaterbellen.

Per putfilter wordt bijgehouden wat het totale geïnfilterde en onttrokken volume is sinds het systeem in gebruik is genomen. Deze data is omgerekend naar een volume per dag door voor elk filter het laatste meetmoment te pakken en hier het totale volume van de dag ervoor van af te trekken. De debieten op de dagen waarvoor data ontbreekt, door bijvoorbeeld een storing, zijn ingeschat door een lineaire interpolatie van de totale volumes tussen het laatste en eerste moment waarvoor wel data beschikbaar was.

Net als voor het systeem in Hoorn worden de onttrekkings- en infiltratiedebieten per modellaag waarin een filter zich bevindt verdeeld aan de hand van de kD -waarde (transmissiviteit) van de betreffende modellaag. De injectieconcentratie (C_{TDS}) is 0.02 g/l voor alle filters.



Figuur 3-2. Putlocaties van het ASR-systeem in Dinteloord tijdens de simulaties.

3.3.3 Gebruiksscenario's

Aan de hand van een tweetal scenario's wordt het nog te onttrekken volume uit de verschillende putfilters ingeschat. In beide scenario's wordt het onttrekkingsdebiet evenredig verdeeld over de putten, en binnen de putten over de filters, en is het debiet constant voor alle filters gedurende het hele scenario.

Scenario 1, maximale capaciteit:

- 100 m³/uur totaal door het gehele systeem gedurende 21 dagen (12.5 m³/uur per put).
- Scenario waarin de ASR wordt ingezet als belangrijkste waterbron tijdens droge periodes; pieklast.

Scenario 2, 'pieken scheren':

- 10 m³/uur totaal door het gehele systeem gedurende 60 dagen (1.25 m³/uur per put).
- Scenario waarin enkel wordt onttrokken om de bovengrondse reservoirs op peil te houden.

3.3.4 Modelopzet

De modelopzet is grotendeels overgenomen uit eerdere modellen voor studies van het betreffende ASR-systeem (Van Dooren & Ros, 2019; Zuurbier & Ros, 2017). Omdat de putten in het model op één lijn liggen (Figuur 3-2) en ook de geohydrologische condities constant worden geacht in de horizontale richting, wordt de as waarlangs de 8

putten geplaatst zijn als spiegelas gebruikt. Dit halveert het benodigde modeldomein, waardoor de rekentijden ook significant afnemen.

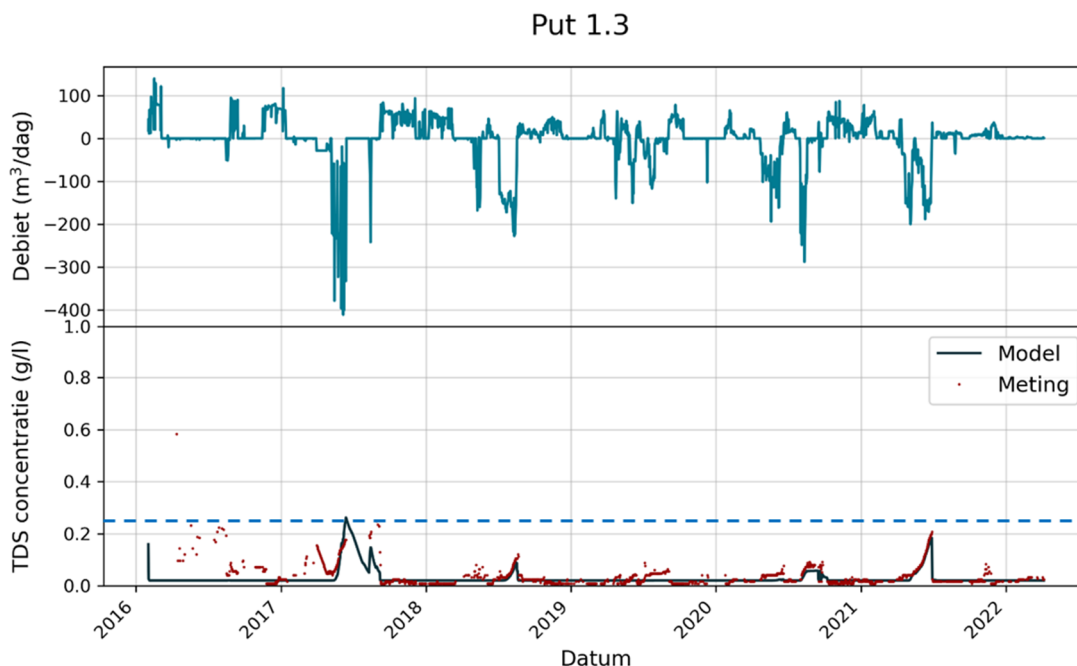
Het model bestaat uit 292 kolommen, 73 rijen en 33 modellagen. Rondom de putten is het modelgrid in de horizontale richting verfijnd tot 2x2 meter. Vanaf 50 meter van de putten neemt de celgrootte geleidelijk toe tot 80 meter aan de randen van het model. De verticale discretisatie is weergegeven in Tabel 3-2 en bestaat uit lagen van 1 meter bij de putfilters, om de diepte van de filters goed te kunnen weergeven. Op de linker- en rechterraand van het model worden zowel de stijghoogte als de TDS-concentratie constant gehouden. Longitudinale hydrodynamische dispersie in het model is gezet op 0,1 m. Loodrecht op de stroming, zowel horizontaal als verticaal, is de dispersie gezet op 0,01 m.

3.3.5 Validatie

Ter validatie van het model zijn de uit de historische simulatie resulterende TDS-concentraties vergeleken met de EC-metingen. Net als voor de ASR in Hoorn is hierbij de volgende conversie gebruikt:

$$C_{TDS} = 0,8 EC$$

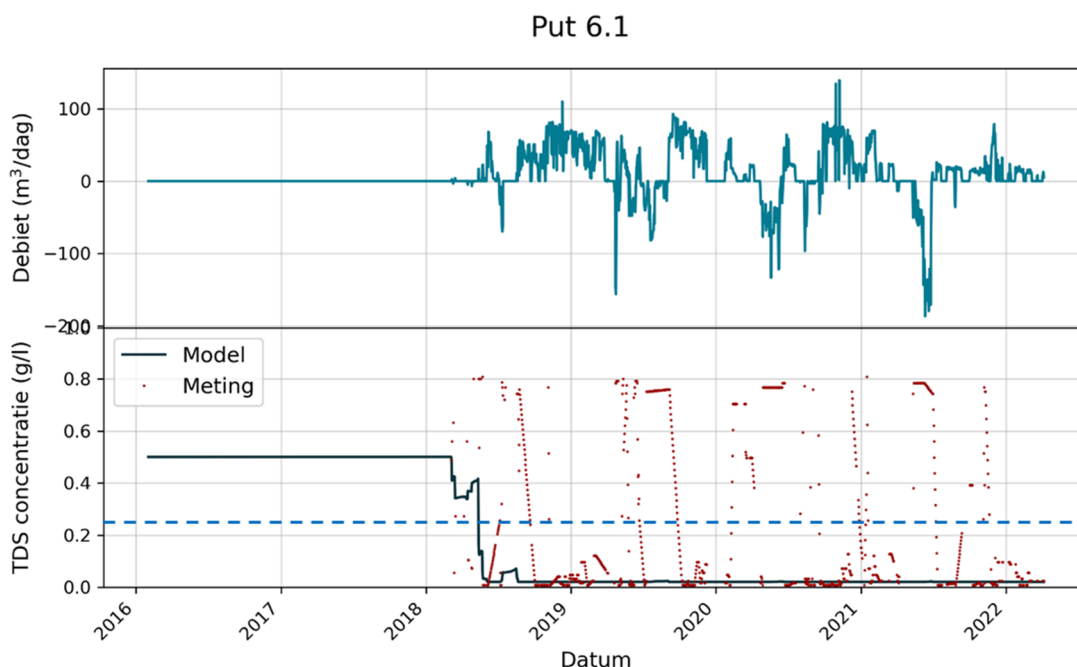
De resulterende vergelijking voor alle putfilters zijn terug te vinden in Bijlage II. Te zien is dat bij sommige putfilters de concentratiepieken in de modellen en de metingen goed samen samenvallen. Een voorbeeld hiervan is putfilter 1.3 die is afgebeeld in Figuur 3-3.



Figuur 3-3. Debieten, TDS-concentraties uit het model en TDS-concentraties op basis van de in de filters gemeten EC-waarden (op basis van $C_{TDS} = 0,8 EC$) het 3^e filter van Put 1. De blauw gestreepte horizontale lijn geeft de ingestelde grenswaarde weer voor het zoutgehalte waarbij de put uitgeschakeld zou moeten worden ($EC = 0,3 \text{ mS/cm}$, ofwel $TDS \sim 0,24 \text{ g/l}$).

In andere putten is dit echter veel minder het geval. Met name in de filters van put 5 t/m 8 is er nauwelijks overeenkomst tussen de gemeten en gemodelleerde waarden. Deze mismatch kan verschillende oorzaken hebben. In een aantal gevallen zal de oorzaak niet de modelopzet zijn maar onbetrouwbare EC-metingen, bijvoorbeeld door gebrekkige kalibratie van de sensoren. Zo neemt de gemeten EC in sommige gevallen sterk toe tijdens een periode waarin er geïnfiltererd wordt, zoals begin 2020 en eind 2021 in Putfilter 6.1 (Figuur 3-4). Maar de mismatch toont ook de moeilijkheid aan van het precies willen kalibreren van een complex grondwatermodel met in totaal unieke 18 putfilters. Waar in het model uitgegaan wordt van een lateraal homogene bodemopbouw en alleen een

verticale gradiënt in zoutgehalte van het grondwater, zullen er in de werkelijkheid lokale verschillen en laterale trends zijn. Er is geen voor de hand liggende manier om een dergelijk complex model op het niveau van iedere individuele putfilter precies en langdurig kloppend te krijgen. Het verkrijgen van een zo goed mogelijke fit tussen de modelvoorspellingen en de metingen was ook geen doel op zich in dit project.



Figuur 3-4. Debieten, TDS-concentraties uit het model en TDS-concentraties op basis van de in de filters gemeten EC-waarden (op basis van $C_{TDS} = 0,8$ EC) het 1^e filter van Put 6. De blauw gestreepte horizontale lijn geeft de ingestelde grenswaarde weer voor het zoutgehalte waarbij de put uitgeschakeld zou moeten worden (EC = 0,3 mS/cm, ofwel TDS ~ 0,24 g/l).

3.3.6 Resultaten ERT metingen

Bij het systeem in Dinteloord zijn een aantal ERT-metingen uitgevoerd (Van der Made & Groen, 2022), zie ook Paragraaf 2.2.3. Dit systeem is al sinds 2016 operationeel en voor sommige periode bestaat er onzekerheid over de juistheid van de gegevens over de hoeveelheid geïnfiltrerd en onttrokken zoet water. Afwijking tussen de gemodelleerde hoeveelheid netto infiltratie en de daadwerkelijke zou kunnen verklaren waarom de modelresultaten voor een deel van de putten in het systeem afwijken van de veldmetingen. De ERT metingen zijn dus uitgevoerd om een verbeterd actueel inzicht in de verbreiding van de zoetwaterbel te verkrijgen om de uitkomsten van de modellen aan te toetsen.

Uit de eerste analyse van de ERT-metingen door Wiertsema kon in ieder geval worden geconcludeerd dat in beide profielen het geïnfiltrerde zoete water wordt waargenomen. Het geïnfiltrerde water is dus aanwezig op minimaal 45 meter van de bronnen, en de daadwerkelijke buitenrand van het opgeslagen zoetwater is dus niet in kaart gebracht. Daarnaast lijken de waterbellen van bron 5+6 en bron 7+8 aan elkaar te zijn vastgegroeid.

In Figuur 3-5 zijn verschillende interpretaties ('inversiemethoden') van de meetresultaten van de ERT-meting in Dinteloord (Paragraaf 2.2.3) weergegeven voor de lijn ongeveer parallel aan de putten, op 20-35 meter afstand. Over deze interpretaties zijn de contouren van de zoetwaterbellen uit het grondwatermodel (Paragraaf 3.3) geplot voor dezelfde datum. Tussen de vier interpretaties zijn duidelijke verschillen waarneembaar. De onderste twee interpretaties (waarin bij de inversie de aanwezigheid van een kleilaag expliciet is meegenomen) komen qua diepte van de zoetwaterbellen het meest overeen met verwachting op basis van de diepten van de ASR-filters en de modelresultaten.

De ERT-metingen en modelresultaten laten echter niet een gelijk beeld zien:

- Bij de metingen lijken de zoetwaterbellen van putten 5+6 en 7+8 aan elkaar gegroeid; dit beeld komt echter niet naar voren uit de modellering.
- De zoetwaterbellen van putten 3+4 en 5+6 lijken in de metingen juist meer gescheiden te zijn dan volgt uit de modellering.
- De onderkant van de zoetwaterbel lijkt dieper te liggen dan volgt uit de modellering.

Verschillende processen kunnen ten grondslag liggen aan deze verschillen:

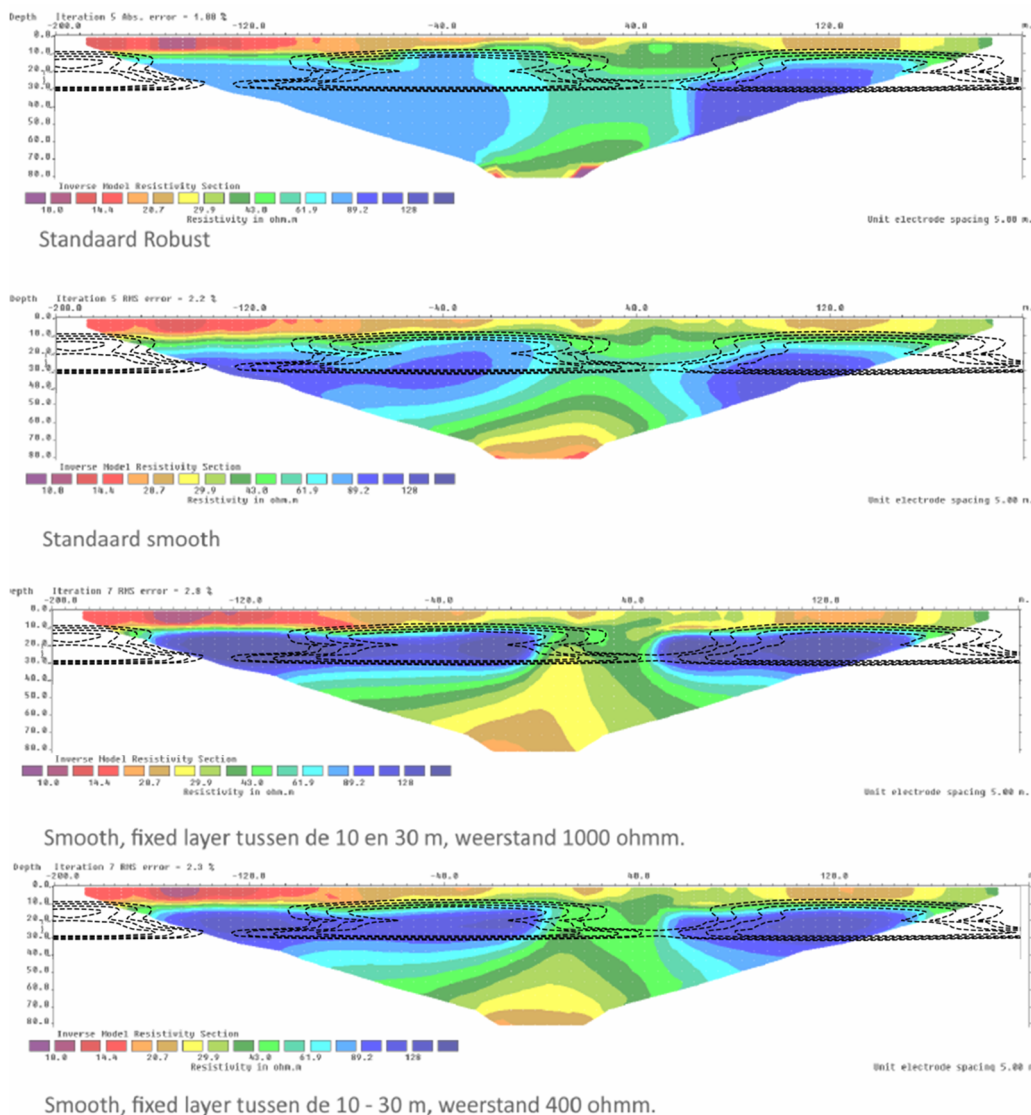
- In het model is aangenomen dat de ondergrond horizontaal volledig homogeen is; in de praktijk is dit echter zelden het geval en is er sprake van een zekere mate van heterogeniteit. Verschillen in de doorlatendheid van het watervoerende pakket waarin geïnfiltreerd wordt en de weerstand van de onder- en bovenliggende afsluitende lagen kunnen allen zorgen voor een andere vorm en ligging van het volume opgeslagen zoetwater. Afhankelijk van de bij de ERT analyse gehanteerde inversiemethode lijkt het dat de kleilaag op 30 m-mv een lagere weerstand heeft dan aangenomen in is de modellering (500 dagen) waardoor het geïnfiltreerde water tot grotere diepte heeft bereikt.
- Naast de doorlatendheid kan ook de porositeit variëren of afwijken van de in het model aangenomen waarden, gelijk aan 0,35 voor watervoerende pakketten en 0,2 voor scheidende lagen. De porositeit bepaald namelijk het ondergrondse volume wat nodig is om een zeker hoeveelheid water op te slaan. Wanneer de porositeit van het opslagpakket 0,3 i.p.v. 0,35 zou zijn, zou het benodigde ondergrondse volume met ca. 17% toenemen.
- De afstand tussen de ASR-putten en de lijn van de ERT-meting fluctueert enigszins, terwijl de doorsnede een contante afstand vanaf de puttenlijn weergeeft. Daarnaast liggen de ASR-putten in de praktijk niet precies op één lijn (Figuur 2-5), maar is dit in het model wel het geval omdat ervoor is gekozen de afstand tussen naastgelegen putten te baseren op de praktijksituatie en de gekronkelde lijn van putten 'recht te trekken'.

Naast de hier besproken ERT-meting is er ook een meting uitgevoerd op 45-60 meter van de putten (zie Figuur 2-7). Op basis van deze meting is door (Van der Made & Groen, 2022) geconcludeerd dat de zoetwaterbel op het meetmoment in ieder geval op die afstand ook nog aanwezig, overeenstemmend met de modelresultaten.

Bij de toepassing van ERT bij toekomstige projecten is het van belang dat, naast de huidige metingen parallel aan de puttenrij, de volgende metingen worden uitgevoerd om een compleet beeld te krijgen van het volume zoetwater:

- Een nulmeting voorafgaand aan de aanleg van het ASR-systeem zodat het onderscheid tussen lithologische effecten op de gemeten weerstand en effecten van verschillen in zoutgehalte eenvoudiger gemaakt kan worden tijdens interpretatie.
- Metingen loodrecht op de ASR-putten om een completer beeld te krijgen van de locatie en grenzen van de zoetwaterbellen.

In afwezigheid van deze metingen zijn de ERT-metingen die uitgevoerd zijn bij Dinteloord niet gebruikt voor daadwerkelijke kalibratie van het grondwatermodel, maar alleen als kwalitatieve check op de (on)juistheid van de numerieke modellen.



Figuur 3-5. Resultaten van de verschillende inversiemethoden voor de interpretatie van de ERT-metingen op 20-35 m van de putten, met daaroverheen geplote de contouren (van binnen naar buiten: 0,03, 0,1, 0,3 & 0,45 g/l) van de zoetwaterbel uit modelresultaten de dag van de meting (26 april 2022) op 22 m van de putten. Van links naar rechts zijn de zoetwaterbellen van put 7+8, put 5+6 en put 3+4 zichtbaar. De zoetwaterbel van put 1+2 ligt buiten het meetgebied. Resultaten ERT-metingen verkregen uit van der Made & Groen (2022).

3.4 Reflectie op de geschiktheid van de modellen voor beide locaties als basis voor een Digital Twin

De resultaten in dit hoofdstuk laten zien dat de modellen het gedrag van de ASR systemen maar deels kunnen reproduceren. Op het niveau van individuele putfilters werden er belangrijke verschillen gevonden tussen de gemodelleerde en gemeten waarden. Voor een deel valt dit te verklaren door foutieve en niet goed onderhouden meetsensoren bij de putfilters, maar daar bovenop zorgt variatie en onzekerheid in de geohydrologie ervoor dat de aanname van een homogene bodemopbouw en zoet-zoutverdeling niet toereikend is. Het gaat hierbij dus zowel om verschillen in bijvoorbeeld de gelaagdheid, doorlatendheid en porositeit van de bodem, maar ook in het zoutgehalte en de stroomsnelheid van het grondwater. Keuzes in de modelopbouw die deels genomen zijn om de benodigde rekenkracht en tijd binnen de perken te houden, zoals de toepassing van een spiegelas bij het model voor Dinteloord en de numerieke discretisatie (cel- en tijdstapgrootte), dragen daarnaast ook bij aan een bepaalde mate van afwijking tussen de modelresultaten en de meetgegevens uit het veld.

Hoewel een dergelijke mate van afwijking tussen individuele meetpunten en de modeluitkomsten gebruikelijk is voor complexe grondwatermodellen, betekent dit wel iets voor de toepasbaarheid van deze modellen in Digital

Twins. Hoewel een Digital Twin niet in alles het fysieke systeem precies hoeft te reproduceren is wel van belang om goed genoeg te kunnen voorspellen hoeveel bruikbaar water er nog voorradig is, voor zowel individuele putten als het systeem als geheel, zodat beheerbeslissingen hierop gebaseerd kunnen worden. Gezien de huidige mate van overeenkomst tussen de modellen en de werkelijkheid is het de vraag in hoeverre de gebruikers de modellen daadwerkelijk hiervoor kunnen gebruiken. De gemodelleerde EC is voor een deel van de putten namelijk significant hoger of lager dan de in het veld gemeten waarde. In andere gevallen komt de timing van de verzilting tijdens de onttrekking niet overeen. Een door het model berekende zoetwatervoorraad voor deze putten zou daardoor niet betrouwbaar zijn. Deze modellen lijken dus niet daadwerkelijk meer inzicht geven in de ondergrondse zoetwatervoorraad dan wat er puur op basis van de gemeten EC bij de putten al vast te stellen is. Door de Digital Twin systemen toch op basis van deze modellen verder te ontwikkelen kan het nut van deze systemen in de praktijk verder worden onderzocht. Bovendien kon er ervaring opgedaan worden wat technisch gezien nodig is om dergelijke systemen op te tuigen en in de lucht te houden.

Vergaande kalibratie van de modellen en verdere veldkarakterisatie zou de overkomst met de veldmetingen nog kunnen verbeteren. Voor het systeem in Hoorn is het aannemelijk dat deze ook nog aanzienlijk verbeterd kan worden o.b.v. additionele velddata en op basis van een groter aantal doorlopen cycli. Gezien het veel grotere aantal putfilters en de langere historie (met mogelijk foutieve registratie van in het verleden verpompte debieten) waarop het model gefit moet worden zal het voor het systeem in Dinteloord echter moeilijk zijn om hier nog heel grote stappen in te maken, en is het onwaarschijnlijk dat dit voor iedere put voldoende kloppend is te krijgen..

4 Data-model integratie met Delft-FEWS

4.1 Introductie in Delft-FEWS

Om de ASR modellen real-time mee te laten draaien en deze modelresultaten op een gestandaardiseerde manier te ontsluiten is gebruik gemaakt van de Delft-FEWS software. Deze software, ontwikkeld door Deltares, is van origine ontwikkeld voor operationeel waterbeheer en het genereren van overstromingsverwachtingen. In de basis is het een workflow-manager met een database om de data op te slaan. Met de workflow-manager kunnen workflows worden gestart die data kunnen importeren en/of exporteren en met deze data kunnen ook weer modellen gedraaid worden. De software bevat ook een grafische interface, maar deze wordt alleen achter de schermen gebruikt voor debug doeleinden.

De software is zeer flexibel in opzet door een modulaire aanpak, maar is daardoor ook zeer complex en te uitgebreid om hier te beschrijven. De basis dient geconfigureerd te worden door de daarvoor specifieke xml-bestanden aan te passen. Hiermee kunnen functies aan en uit worden gezet en kunnen de verschillende stappen van de workflows worden aangemaakt.

4.2 Opzet systeem

Het ASR Delft-FEWS-systeem bestaat uit de basis met daar bovenop een webservice component. In een typisch FEWS-systeem draait de basis op een aparte server met daaronder een database server en naast de basis verschillende sub-processen die de workflows (eventueel parallel) kunnen draaien. Echter is de installatie en het onderhoud van deze systeemopzet tijdrovend. Daarom is besloten deze opzet niet te volgen, maar voor een standalone systeem te gaan.

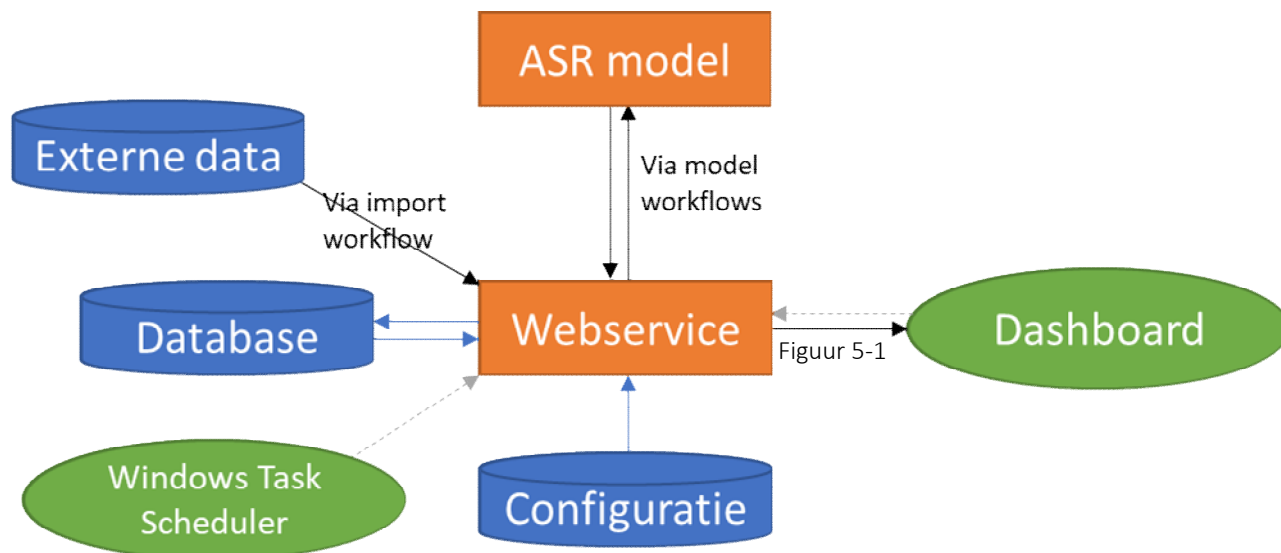
Het standalone systeem bevat in feite alle verschillende onderdelen van een typisch FEWS-systeem, maar dan in 1 pakket dat op elke computer lokaal gedraaid kan worden. Dit type wordt vooral gebruikt om de FEWS-systeemconfiguratie aan te maken en te testen alvorens het op het daadwerkelijke operationele systeem belandt. Desondanks kan een standalone systeem wel worden gebruikt om deze semi-operationeel te maken met behulp van de webservice. Een nadeel t.o.v. een volledige systeemopzet is dat met een standalone systeem maar 1 workflow gelijktijdig gedraaid kan worden en dat zolang de webservice draait, de FEWS client met grafische interface niet geopend kan worden. Echter is dit laatste probleem vooral voor het debuggen door de beheerder een probleem, maar niet voor de toepassing met het dashboard aangezien FEWS daarvoor alleen als backend daarvoor dient.

Het ASR FEWS-systeem is als volgt opgezet (zoals gevisualiseerd in Figuur 4-1):

- De spin in het web is de webservice. Deze zorgt dat alle workflows worden gestart zodra een seintje van de Windows Task Scheduler binnenkomt, dat er uitwisseling van data is tussen de interne database en de modellen/import en dat data naar het dashboard wordt geleverd als het dashboard daar om vraagt.
- In de Task Scheduler van Windows staan taken gedefinieerd om de workflows voor het importeren van data en het draaien van het model in gang te zetten. De taken worden gestart met tussenpozen van 1 uur in de volgende volgorde: 1) importeren van data, 2) actualisatie historische model, 3) scenario 1 model, 4) scenario 2 model. De webservice krijgt het signaal binnen om de betreffende workflow te starten en zet deze dan in de wachtrij. Als er op dat moment geen workflow draait, zal de eerste uit de wachtrij worden gestart totdat de wachtrij is afgewerkt.
- Om de taken te draaien is een configuratie nodig waarin staat beschreven hoe de import van externe data moet verlopen en hoe de modellen moeten worden gedraaid. Dit gaat via een set XML-bestanden die in een vooraf

gedefinieerde mappenstructuur staan opgeslagen. In deze bestanden worden de benodigde opties opgegeven die de FEWS-software uitleest en op basis hiervan wordt aangestuurd.

- De workflow voor importeren importeert de externe beschikbare data (zie 4.3.1).
- De workflows voor het model draaien het model met de gemeten of verwachte pompdebieten en exporteren de modelresultaten weer naar FEWS (zie 4.3.2).



Figuur 4-1. Overzicht Delft-FEWS ASR systeem. Groene vlakken geven externe entiteiten aan, blauwe vlakken databronnen en oranje vlakken processen (ASR model kan ook worden gezien als databron). Blauwe pijlen geven interne datastromen weer, grijze gestreepte pijlen seintjes voor actie webservice om uit te voeren en zwarte pijlen datastromen van/naar extern. Voor de levering van data van de Webservice aan het Dashboard wordt verwezen naar Paragraaf 5.1.

4.3 Workflows

4.3.1 Data import

De data import workflow importeert de data die extern beschikbaar is. Voor Dinteloord is dit data in de vorm van csv-bestanden, die dagelijks worden bijgewerkt op een FTP-server. Voor Hoorn zijn dit handmatige aangeleverde Excel-bestanden, waarvoor tijdelijk op basis van de gemeten data een cyclische extrapolatie gemaakt. Dit gebeurt met een apart Python script buiten FEWS wat een csv-bestand produceert dat FEWS kan inlezen.

4.3.2 Modelruns

De tijdstap van het model is per dag en het Digital Twin systeem wordt daarmee ook één keer per dag geüpdatet. De gemeten pompdebieten worden daarvoor eerst geaggregeerd naar een per dag tijdstap voordat deze vanuit FEWS naar het model worden gestuurd. In de FEWS-database wordt ook de laatste actuele status van het model opgeslagen (de stijghoogtes en zoutconcentratie in elke cel). Iedere dag wordt het model met gemeten pompdebieten voor die specifieke dag opnieuw gedraaid (op basis van de laatste actuele status) om deze vervolgens als nieuwe actuele status weer op te slaan. Vanuit deze laatste actuele status worden dan daarna de verschillende gebruiksscenario's (zie paragraaf 3.2.3 en 3.3.3) gemodelleerd.

Voordat het MODFLOW model kan draaien worden vanuit FEWS de pompdebieten naar het model geëxporteerd. Om te zorgen dat deze op de juiste manier worden verwerkt zodat het model er weet van heeft wordt eerst een pre-adapter gedraaid. Deze zet de geëxporteerde pompdebieten in het goede format en zet de state bestanden (van de laatste actuele status) op de juiste plek. Voor Dinteloord geldt dat alle debieten door 2 worden gedeeld, omdat het model de helft van het gehele modelgebied bevat (gezien er gebruikt wordt gemaakt van een spiegelas in het model, zie paragraaf 3.3.4).

Daarna wordt het model gedraaid. Dit model is iets aangepast zodat deze een log bestand produceert die FEWS kan uitlezen en zodat het model de juiste tijdsinstellingen en de state bestanden oppakt.

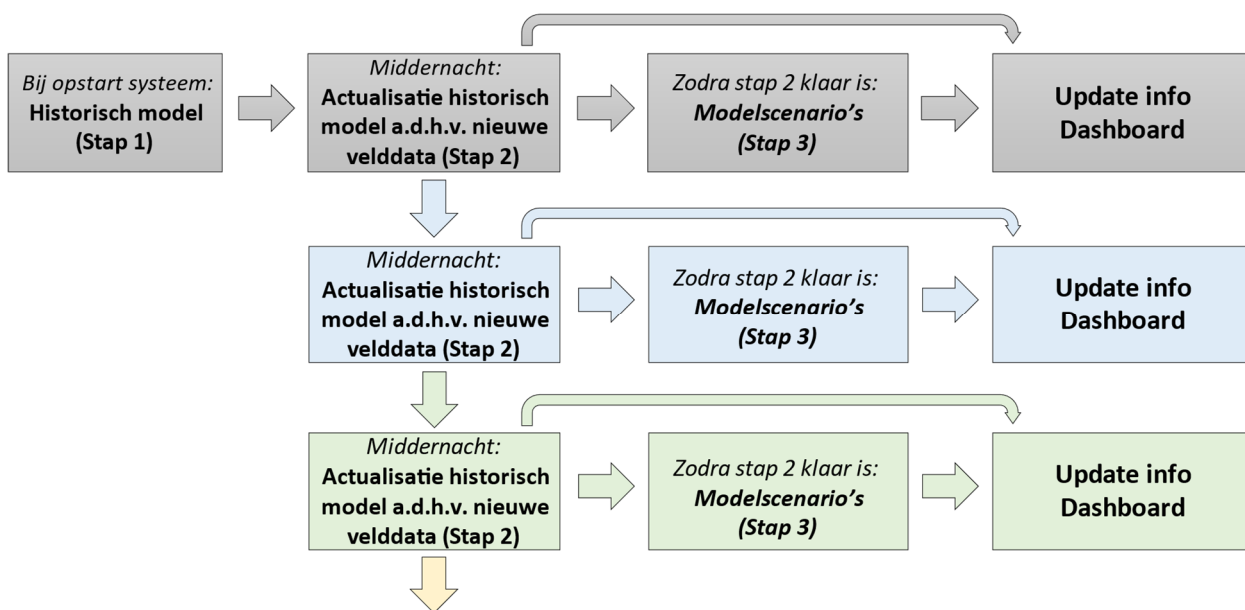
Wanneer het model gedraaid is, wordt tot slot een post-adapter gedraaid. Deze adapter zorgt ervoor dat de modelresultaten die in het MODFLOW eigen bestandsformaat staan opgeslagen om worden gezet naar NetCDF-bestanden die FEWS kan inlezen. Daarnaast wordt de laatste actuele status van het model uitgelezen op de laatste tijdstap van het model en worden de grondwaterstanden en concentraties op dat moment opgeslagen in aparte state bestanden. Voor Dinteloord wordt nog een specifieke actie uitgevoerd om te zorgen dat het 'halve' model wordt gespiegeld zodat de modelresultaat op het volledige modelgrid voor FEWS beschikbaar is.

Als laatste stap wordt via een FEWS transformationModule per cel van het modelgrid een verticaal profiel geïnterpoleerd uit een modelgrid met alle lagen. Dit is voor de webservice data ontsluiting nodig, omdat deze data van alleen individuele locaties (momenteel) kan leveren en niet een volledige modelgrid. Per individuele cel van het grid kan dus wel een verticaal profiel worden geleverd waarbij per hoogte (laag in modelgrid) een bekende waarde is. Om het volledige modelgrid te reconstrueren moeten dus de verticale profielen voor alle cellen worden opgevraagd en daarna op de juiste volgorde aan elkaar worden 'geplakt'.

Omdat de ASR-systemen al bestonden vóór de ontwikkeling van de Digital Twin, wordt eerst het volledig historische model tot de opstartdatum gedraaid (Figuur 4-2), als een soort initialisatie. Vanaf dat punt wordt de actualisatie van het model dagelijks om middernacht gestart. Deze modelrun vult de missende dag aan zodat om middernacht de status van het model (state) is bijgewerkt om daarmee de scenario's te draaien. De input van de run zijn de gemeten pompdebieten die via de data import workflow zijn binnengehaald.

Omdat voor het systeem in Hoorn geen real-time data kan worden opgehaald, maar deze handmatig wordt aangeleverd en toegevoegd, wordt de periode tussen het einde van de laatst aangeleverde data en de dag waarop het dashboard wordt bezocht gesimuleerd met 'onechte' infiltratie- en onttrekkingscycli. Deze onechte cycli zijn een herhaling van de cycli die daadwerkelijk zijn uitgevoerd bij dit systeem, startend met de infiltratiecyclus in april 2021.

De modelruns voor de scenario's worden dagelijks gestart nadat de historische modelrun is voltooid (Figuur 4-2).



Figuur 4-2. Visualisatie van het processchema voor het aansturen van de grondwatermodellen vanuit Delft-FEWS.

4.4 Ontsluiting via webservice

Het dashboard kan data opvragen via de webservice. Hiervoor is een API beschikbaar waarmee op een gestandaardiseerde manier de data kan worden opgevraagd en deze staat beschreven op [FEWS Web Services - DELFT-FEWS Documentation - Deltares Public Wiki](#).

Tabel 4-1 geeft de beschikbare parameters in de webservice weer inclusief onder welke filter deze aanwezig is en in welke systeem (Hoorn en/of Dinteloord) deze beschikbaar is. Voor een verdere omschrijving van de beschikbare data op en werkwijze voor het opvragen van data van de webservice wordt verwezen naar Bijlage III. In het volgende hoofdstuk zal verder worden ingegaan op het gebruik van de data en hoe deze weergegeven wordt op de webservice.

Tabel 4-1. Overzicht beschikbare data op de werbservice.

Data	Hoorn	Dinteloord
Geleidbaarheidsmeting	x	x
EGV-meting	x	
Chloridemeting	x	
Temperatuurmeting	x	
Meting grondwaterstanden	x	
Meting pompdebieten	x	x
Zuurstofmeting	x	
Meting totaal volume		x
Debieten in simulaties scenario's	x	x
Grondwaterstanden in simulaties historie	x	x
Zoutconcentratie (TDS) in simulaties historie	x	x
Drinkwaterfractie in simulaties historie	x	
Grondwaterstanden in simulaties scenario's	x	x
Zoutconcentratie (TDS) in simulaties scenario's	x	x
Drinkwaterfractie in simulaties scenario's	x	

4.5 Server

Om de gegevens voor iedereen in het project beschikbaar te maken en niet alleen lokaal bij (een van de) onderzoekspartijen is er voor gekozen het hele systeem te installeren op een externe 'Virtual Private Server' (VPS). De specificaties van deze server moesten uiteraard voldoende zijn om genoeg rekenkracht te kunnen leveren om de modellen snel genoeg te kunnen draaien en genoeg opslagcapaciteit bieden om de modelresultaten te kunnen bewaren. Hierin moest weer een balans gevonden worden met de kosten voor het hosten en het dataverkeer. Gekozen is uiteindelijk voor een VPS met 6 CPUs van 1 GHz, 24 RAM werkgeheugen en 1000 GB schijfruimte. Maandelijks kosten voor het hosten van dit systeem waren, afhankelijk van de mate van dataverkeer, bijna €700,- per maand.

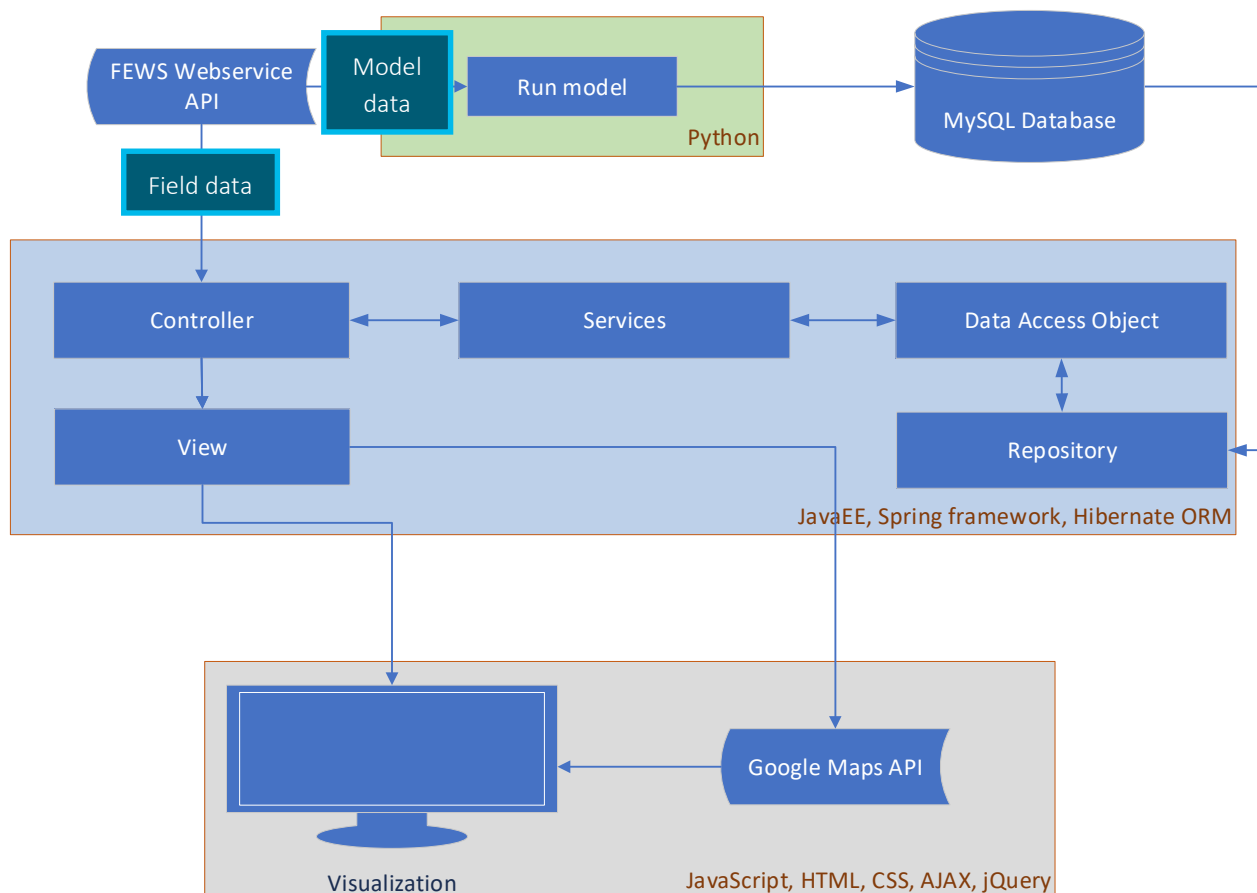
5 Beslissingsondersteunend dashboard

5.1 Aansturing

Het doel van het ontwikkelde dashboard voor dit project was om zowel velddata als modelresultaten op overzichtelijke wijze weer te geven zodat de gebruikers snel inzicht kunnen verkrijgen in de terugwinbare hoeveelheid water. Zowel de velddata als de modelresultaten worden verkregen van de FEWS Webservice (Paragraaf 4.4). De velddata kan direct van de FEWS Webservice naar de controller waarmee het dashboard wordt aangestuurd (voor schematische weergave van de werking van het dashboard zie Figuur 5-1). Dit geldt ook voor de putdebieten gebruikt tijdens de simulaties, zowel voor de historische runs als voor de scenario's. Modelresultaten moeten echter eerst bewerkt worden voordat ze in het dashboard geladen kunnen worden. Hiervoor is een aparte Python-tool ontwikkeld (het groene vlak bovenin Figuur 5-1). Omdat het simuleren van de grondwatermodellen (Hoofdstuk 3) en het runnen van het python script de nodige tijd kosten, kan de modeldata niet instantaan worden geleverd aan het dashboard, maar wordt het tijdelijk opgeslagen in de MySQL database.

Voor het creëren en updaten van het dashboard zijn de volgende programmeertalen en tools gebruikt:

- 1 Backend – server side: JavaEE, Spring framework, Hibernate ORM
- 2 Frontend – client side: Javascript, HTML, CSS, AJAX, jQuery
- 3 Model: Python
- 4 Database: MySQL



Figuur 5-1. Schematische weergave van de opbouw van de tool voor visualisatie op het dashboard.

5.2 Functionaliteiten

Figuur 5-2 is een schermafbeelding van het ontwikkelde dashboard voor het systeem in Hoorn en zijn Digital Twin. Om data in te laden in het dashboard, moet het volgende stappenplan worden doorlopen:

- 1 Selecteer de locatie: Hoorn of Dinteloord;
- 2 Selecteer één van de putfilters op de gekozen locatie;
- 3 Selecteer de start- en einddatum: deze worden automatisch ingevuld op basis van de beschikbare data voor de betreffende locatie;
- 4 Druk op 'create graph' om de bijbehorende data in te laden.

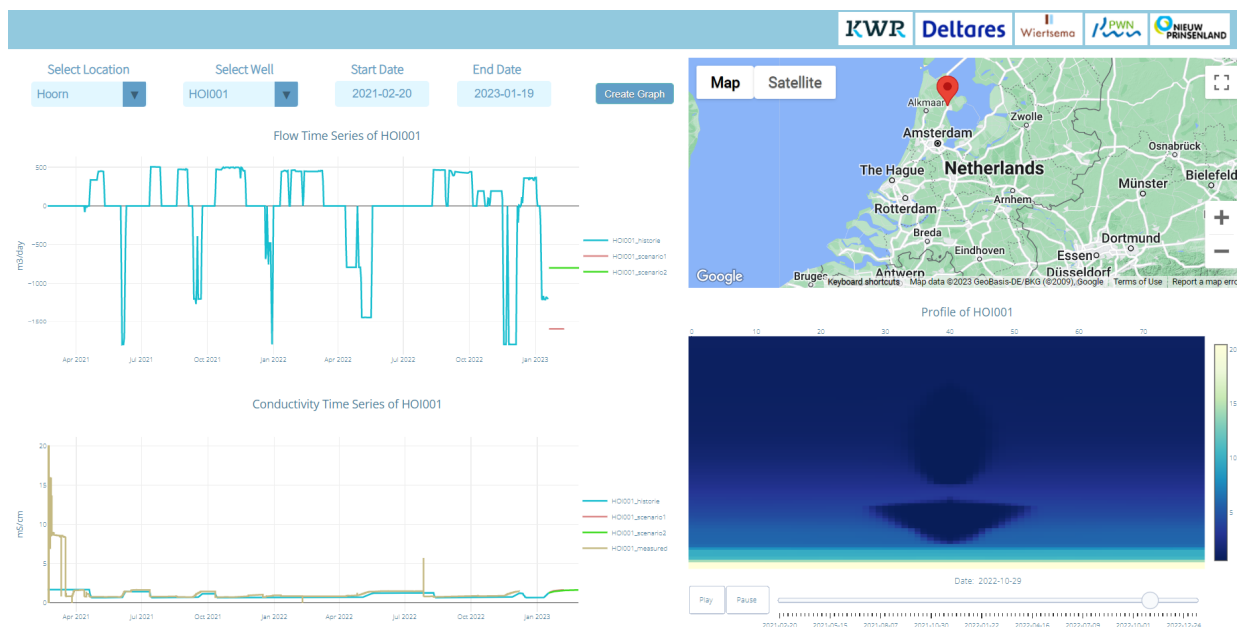
Op het dashboard wordt op basis van de hierboven beschreven selectie de data gevisualiseerd zoals in Figuur 5-2:

Linksboven: De debieten van het geselecteerde putfilter. Hierbij worden zowel de debieten voor de historische simulatie, op basis van historische pompdata, als de debieten voor beide scenario's weergegeven.

Rechtsboven: De locatie van het ingeladen putfilter op de kaart.

Rechtsonder: Een dwarsdoorsnede van de TDS-zoutconcentratie (het zoutgehalte) van de ondergrond over de tijd, op basis van de resultaten van de historische modelsimulatie. Onder de dwarsdoorsnede is een slider beschikbaar waarmee het resultaat voor een specifieke datum kan worden ingeladen. Ook bestaat de optie om de historische ontwikkeling als video af te spelen. Op dit punt was het enkel mogelijk enkel de concentraties te plotten op basis van een constante celgrootte i.p.v. de daadwerkelijke x/y-coördinaten en diepte. De verfijning van het modelgrid rondom de putfilters is dus niet meegenomen in deze plots, waardoor de vorm van de geprojecteerde zoetwaterbellen niet geheel waarheidsgetrouw is.

Linksonder: De elektrische geleidbaarheid (EC-waarde) in het geselecteerde putfilter gemeten zoals (1) gemeten in het veld, (2) bepaald uit de historische modelsimulaties en (3) bepaald voor beide modelscenario's. Voor het converteren van de modelresultaten van TDS naar EC is gebruik gemaakt van de vergelijking gegeven in Paragraaf 3.2.1.



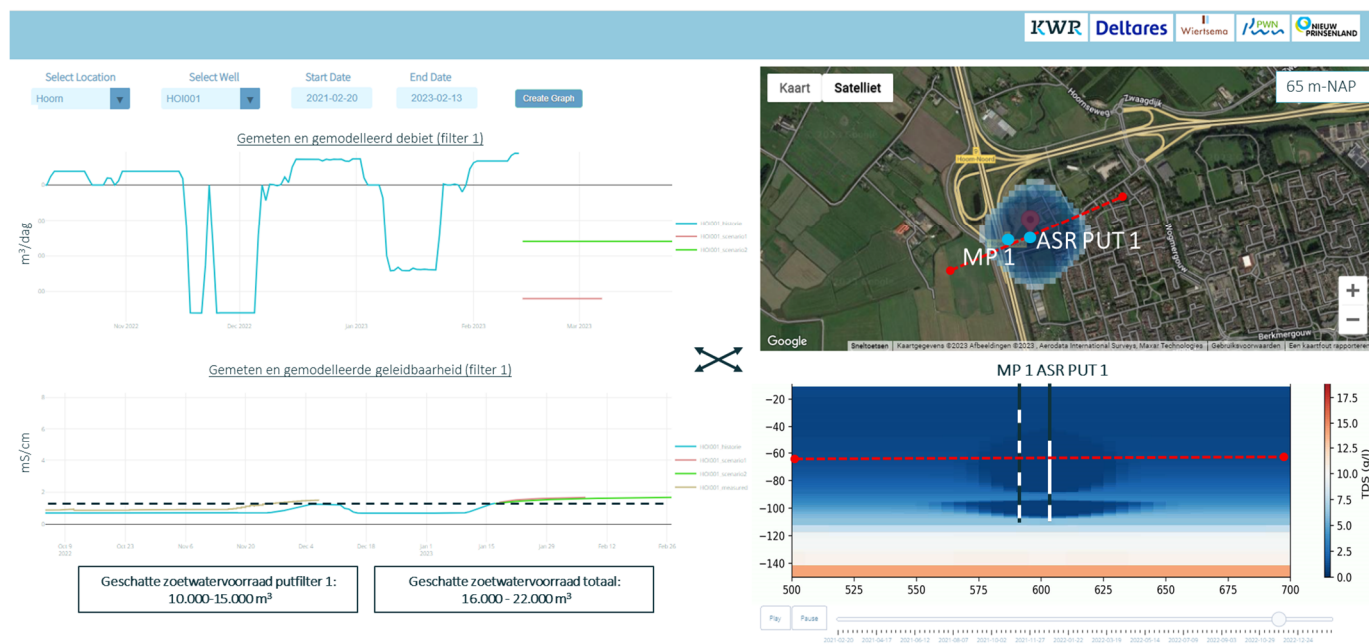
Figuur 5-2. Schermafbeelding van het ASR Digital Twin Dashboard. Weergegeven resultaten zijn voor het bovenste putfilter voor de ASR in Hoorn.

5.3 Potentiële aanvullingen voor toekomstige ASR dashboards

In de huidige staat geeft het ASR Digital Twin Dashboard een eerste beeld van het functioneren van de ASR-systemen en de nog beschikbare hoeveelheid opgeslagen zoetwater. Hiermee is het proof-of-concept voor de

koppeling tussen velddata en numerieke simulaties technisch gezien succesvol ontwikkeld. Wanneer de voorspellende waarde van de Digital Twin voldoende wordt geacht zou dit dashboard verder ontwikkeld kunnen worden om de functionaliteit te verbeteren. Hieronder is een lijst gegeven met enkele potentiële aanvullingen of optimalisaties voor dit dashboard die tijdens het project naar voren zijn gekomen. Een deel van deze lijst is ook meegenomen in de 'artist impression' van een geoptimaliseerd dashboard voor de ASR in Hoorn in Figuur 5-3.

- Het specificeren van de maximale toelaatbare concentratie van een parameter (bijvoorbeeld chloride) in de tijdlijn van de gemeten en gemodelleerde waarde (zie Figuur 5-3), zodat een eerste inschatting gemaakt kan worden of de waterkwaliteit in de filters nog voldoet aan de kwaliteitseisen en of de bovengrens al benaderd wordt.
- Het geven van een indicatie van de geschatte nog beschikbare zoetwatervoorraad, op basis van de maximale toelaatbare concentraties. Deze hoeveelheid staat gelijk aan de uit de scenario's komende nog potentieel te onttrekken hoeveelheid zoetwater voordat de toelaatbare waarde voor een bepaalde parameter wordt overschreden. Deze waarde kan dan zowel per putfilter worden gegeven als voor het hele systeem (zie Figuur 5-3). Eventueel kan de gebruikte grenswaarde handmatig worden aangepast binnen het dashboard.
- Het toevoegen van extra meetgegevens uit nabijgelegen peilbuizen, mede als extra verificatie van de betrouwbaarheid van de modellen op afstand van de ASR bronnen zelf.
- Het toevoegen van een horizontale dwarsdoorsnede van de zoetwaterbel aan de kaart met de putlocaties voor een selecteerbare diepte (Figuur 5-3), zodat meer inzicht verkregen wordt in de daadwerkelijke dimensies van de zoetwaterbel.
- Het toevoegen van peilbuislocaties en locatie van de getoonde doorsnede aan de kaart (Figuur 5-3).
- Het opnemen van de locaties en filterdiepten van de ASR- en monitoringsputten in de doorsnede (Figuur 5-3).
- Het verbeteren van de interactie tussen de verschillende delen van het dashboard. Voorbeelden hiervan zijn:
 - Het automatisch updaten van de getoonde tijdsperiode op beide tijdlijnen wanneer op een van de tijdlijnen wordt ingezoomd;
 - Het automatisch updaten van de doorsnede wanneer met de muis over een van beide tijdschalen wordt bewogen;
 - Het visualiseren van de diepte van de op de kaart geprojecteerde horizontale doorsnede in de verticale doorsnede (Figuur 5-3).
 - Het tonen van gegevens uit een andere putfilter of peilbuis in de tijdlijnen wanneer hier in een van beide doorsnedes op geklikt wordt.
- Het toevoegen van een extra achterliggende analyse en kwaliteitscheck van de parameters die getoond worden op het dashboard, zodat sterk afwijkende waarden zoals bij sommige filters in Dinteloord worden weggefilterd waardoor ook afwijkingen van het model t.o.v. van de werkelijkheid sneller opgespoord kunnen worden.



Figuur 5-3. 'Artist impression' van een geoptimaliseerd Digital Twin dashboard voor de ASR in Hoorn.

6 Lessons learned

In dit hoofdstuk worden een aantal van de belangrijkste lessen voortkomend uit de ontwikkeling en evaluatie van de beide Digital Twins uiteengezet. Deze lessen zijn in twee categorieën ingedeeld, ten eerste lessen t.a.v. de toegevoegde waarde van de Digital Twins en hoe deze zich verhoudt tot meer conventionele wijzen van monitoring en voorraadbeheer en ten tweede t.a.v. de technische opzet, ontwikkeling en beheer van de Digital Twins.

6.1 Toegevoegde waarde Digital Twins t.o.v. conventionele monitoring en voorraadbeheer

6.1.1 Huidige praktijk

In de huidige praktijk worden ASR-systemen aangestuurd op basis van waterkwaliteitsmetingen (meestal EC) bij de bronnen zelf. Wanneer de waterkwaliteit te slecht voor gebruik wordt worden putten (al dan niet automatisch) uitgeschakeld. Anticiperen op de hoeveelheid terugwinbaar water is op basis van dit type metingen alleen niet mogelijk, laat staan optimalisatie van het terug te winnen zoet water door bijvoorbeeld uit specifieke putten of putdelen meer of juist minder te onttrekken of te infiltreren. In sommige gevallen is er wel een monitoringsput op afstand van de ASR-putten zelf waarvan de metingen ook zouden kunnen worden ingezet om vroegtijdig een signaal te geven als de zoetwatervoorraad dreigt op te raken. Gegevens uit de monitoringsputten worden echter zelden real-time ontsloten of frequent uitgelezen en dus ook niet toegepast voor dit doeleinde (ofwel 'early-warning').

Naast de technische beperkingen komt de beperkte mate van data-gedreven beheer bij ASR-systemen ook deels doordat in de glastuinbouw, waar ASR in Nederland het meest wordt toegepast, de drijfveer hiervoor ontbreekt. De ASR is daar vaak een additionele bron van zoetwater, naast hemelwater, met daarachter nog een back-up van RO-bronnen (Reverse Osmosis of RO). Dit zijn grondwateronttrekkingen van brak grondwater gekoppeld aan een nazuivering met omgekeerde osmose voor ontzilting. Deze RO-bronnen worden ingeschakeld zodra uit de ASR geen water van voldoende kwaliteit meer kan worden teruggewonnen. Er wordt daarom niet zo zeer geanticipeerd op waterkwaliteitsontwikkeling en actief beheerd, maar vooral gereageerd. Op het moment dat metingen van de onttrokken waterkwaliteit uit de ASR bronnen aantonen dat het water van te lage kwaliteit (meestal te zout) is, worden de ASR-putten of putfilters automatisch of handmatig uitgeschakeld tot na het volgende infiltratieseizoen. Bij gebruikers waarbij er geen alternatieve bron, zoals RO, voor de ASR beschikbaar is, en er dus een veel sterkere afhankelijkheid van de ASR is, zal de noodzaak tot verbeterd voorraadbeheer groter zijn.

In enkele gevallen houden beheerders van ASR-systemen wel actief de boekhouding van de hoeveelheid geïnfiltreerd en onttrokken water bij om te kunnen inschatten of er voldoende water op voorraad is. Dit is bijvoorbeeld ook het geval bij de ASR in Dinteloord. De hoofdreden hiervoor is dat er bij dit systeem gezuiverd industrieel restwater geïnfiltreerd wordt waar per kuub water voor betaald moet worden. Bij dit type systemen moet dus ieder infiltratieseizoen een kosten-baten afweging gemaakt worden (terwijl bij ASR-systemen gevoed uit hemelwaterbassins gewoon maximaal geïnfiltreerd wordt zodra er voldoende water in het bassin zit). Het volume dat aan het einde van het infiltratieseizoen geïnfiltreerd moet zijn, is hier ingegeven door een combinatie van vooraf aan de hand van modelstudies geschatte terugwinrendementen en praktijkervaring. De modelstudies worden vaak echter alleen in de ontwerpfase van systemen uitgevoerd en daarna mogelijk nog bij uitbreidingen, zoals bij de aanleg van extra putten. De nauwkeurigheid van deze modellen na oplevering wordt daarom niet of nauwelijks getoetst aan meetgegevens die vrijkomen uit de operationele monitoring. Bovendien wijkt de daadwerkelijke bedrijfsvoering van de systemen vaak sterk af van wat er vooraf bedacht was en daarom in de modellen aangenomen was, potentieel met sterke invloed op het terugwinrendement.

Concluderend is er van actief operationeel beheer bij ASR-systemen doorgaans maar beperkt sprake. In periode van waterbeschikbaarheid wordt maximaal geïnfiltreerd, en in het onttrekkingseizoen geldt 'op is op' en wordt indien

noodzakelijk overgeschakeld op alternatieve bronnen. De drijfveer voor verbeterd beheer is vaak dus niet duidelijk aanwezig.

6.1.2 Toegevoegde waarde Digital Twins

De in dit project ontwikkelde Digital Twins zijn een eerste zet om meer data-gedreven beheer van ASR-systemen technisch mogelijk te maken, en om te verkennen in hoeverre dit een verbetering zou zijn t.o.v. de huidige bedrijfsvoering. Een verbetering zou in deze context met name betekenen dat er hogere opslagrendementen behaald kunnen worden of dat het opraken van de voorraad bruikbaar zoetwater (bijv. in periode van langdurige droogte) al langer van te voren kan worden vastgesteld.

In de Digital Twins zou op basis van de berekende ontwikkeling van waterkwaliteit geschat worden wat de bruikbare zoetwatorvoorraad is. Echter is gebleken dat voor een significant deel van de 18 putfilters van het systeem in Dinteloord en voor 1 van de 2 putfilters bij het systeem in Hoorn blijkt de gemodelleerde EC namelijk significant hoger of lager is dan de in het veld gemeten waarde, of komt de timing van de verzilting tijdens de onttrekking niet overeen. Daardoor kan de berekende zoetwatorvoorraad voor deze putten dus ook niet betrouwbaar worden geacht. Bij Hoorn is bovendien te zien dat de afwijking tot de veldmeting toeneemt met het aantal doorlopen cycli, ofwel het model begint steeds meer uit de pas te lopen. De doelstelling om via de Digital Twin(s) op enig moment te beschikken over een nauwkeurige voorspellingen van de nog beschikbare hoeveelheid zoetwater, zodat daar in de bedrijfsvoering rekening mee gehouden kan worden, blijkt dus alleen waar te kunnen worden gemaakt voor een subset van de putten.

Een ander beoogd doel van het opzetten van een ASR Digital Twin systeem is dat conventionele veldmonitoring niet of minder nodig zou zijn. Monitoringsputten op specifieke afstanden van de ASR-bronnen zelf kunnen gebruikt worden om redelijk betrouwbaar en vroegtijdig het signaal afgeven dat de bruikbare watorvoorraad opraakt. De toepassing van een goed gekalibreerd grondwater model in een Digital Twin maakt het mogelijk om dit inzicht op ieder moment en voor iedere put inzichtelijke te maken, terwijl reguliere veldmonitoring vaak zeer onregelmatig gebeurt (denk aan het uitlezen van dataloggers en/of het bemonsteren van grondwaterputten). Bovendien zou een Digital Twin kostenbesparend kunnen zijn, omdat veldmonitoring hierdoor minder nodig zou zijn. In dit opzicht is de ontwikkeling van de Digital Twin deels geslaagd, omdat de verbreiding van de zoetwaterbel(len) duidelijk en op dagelijkse basis in te zien is. Zoals in de vorige paragraaf besproken en ook blijkt uit de vergelijking van de modelresultaten en de ERT metingen is er op een aantal plekken echter een duidelijke mismatch tussen de gemodelleerde verbreiding van de bellen en de werkelijkheid.

Het systeem geeft dus wel een indicatie van de staat van de zoetwatorvoorraad op grote lijnen, en biedt in dat opzicht meer inzicht dan dat je op basis van één of enkele monitoringsputten zou hebben. Echter, op de locatie van een monitoringsputten zelf geven deze wel een veel betrouwbaarder inzicht. Het systeem is daarmee dus nog niet zover dat het de installatie van monitoringsputten overbodig maakt. Voordeel van het ontwikkelde systeem is wel dat het een gecentraliseerde opslag en visualisering van alle monitoringsgegevens biedt, nog los van de geautomatiseerde koppeling tussen de veldgegevens en de modellen. Het kan daarmee ook snel duidelijk worden wanneer individuele sensoren niet meer voldoende functioneren, als deze al te sterk afwijken t.o.v. de modelresultaten.

Gezien de complexiteit van het ontwikkelde systeem (wat gepaard gaat met hoge serverkosten) en de beperkte mate van betrouwbaarheid van de uitkomsten op het niveau van individuele putfilters is er mogelijk ook meerwaarde in alternatieve en mogelijk meer lichtgewicht methoden om de terugwinbare hoeveelheid zoetwater te bepalen. Hierbij kan gedacht worden aan analytische methoden om het terugwinrendement van ASR-systemen in te schatten op basis van metingen in de monitorings- en of bronputten. Bij het inschatten van het terugwinrendement op basis van analytische vergelijkingen is het echter moeilijk om de grilligheid van infiltratie- en onttrekkingscycli over de jaren goed mee te nemen, terwijl deze een grote invloed hebben op het terugwinrendement en dus de nog terugwinbare hoeveelheid zoetwater.

Tot slot is gebleken dat de modellen eigenlijk nog verdere kalibratie nodig hebben voordat ze betrouwbaar in een Digital Twin ingezet kunnen worden voor het maken van beheersbeslissing op putniveau. In theorie is ook mogelijk om grondwatermodellen continue te kalibreren, parallel aan de modellen die direct op gebruikt worden voor visualisatie op het dashboard. Hierbij wordt iedere keer dat data wordt aangeleverd opnieuw wordt gezocht naar de beste fit tussen de historische velddata en modelruns. Binnen de geohydrologie is software voor het fitten van velddata aan modellen vooral beschikbaar voor stijghoogte data, bijvoorbeeld PEST en PEST++ (Doherty et al., 2018), en niet voor het fitten van concentraties. Mogelijk kunnen machine learning technieken, zoals hierboven beschreven, ook bijdragen aan het fitten van de velddata aan de numerieke modellen. Aanvullende veldmetingen, zoals de ERT-metingen besproken in Paragraaf 3.3.6, zouden hier ook bij kunnen dragen aan een verbeterde kalibratie.

6.2 Opzet en ontwikkeling van de Digital Twins

Ondanks de hierboven omschreven beperkingen van het systeem en de vele mogelijkheden voor doorontwikkeling (zie paragraaf 5.3) kan het project voor wat betreft de koppeling tussen veldmonitoring en numerieke model beschouwd worden als succesvolle 'proof-of-concept'. De belangrijkste leerpunten die zijn opgedaan en afwegingen die gemaakt zijn bij het opzetten van deze systemen zijn hieronder puntsgewijs samengevat.

- De uitgebreide numerieke 3D-grondwatermodellen met daarin zoet-zoutdynamiek, zoals toegepast in dit onderzoek, hebben ook op krachtige computers aanzienlijke rekentijden die kunnen variëren van een paar uur tot enkele dagen of zelfs weken. Uiteindelijk is er een afweging gemaakt tussen de frequentie waarmee modelberekeningen uitgevoerd moesten worden (en de frequentie waarmee de Digital Twins dus geactualiseerd kon worden), en de vereiste rekestijd en nauwkeurigheid van de modellen.
- In die afweging zijn er een aantal knoppen waaraan gedraaid kan worden. Ten eerste kan de updatefrequentie van het Digital Twin-systeem worden verlaagd van een dagelijkse tot bijvoorbeeld een wekelijkse update, zodat de modellen langer de tijd hebben om te draaien, of juist verhoogd als de eindgebruiker inzicht op uurbasis nodig heeft. Ten tweede kunnen de modellen 'lichter' worden gemaakt door het aantal gridcellen te verlagen en/of de duur van de rekenstappen in de simulatie te vergoten. De keerzijde hiervan is echter dat een te grof grid en te grote tijdstappen de nauwkeurigheid van de modelberekeningen negatief beïnvloedt. Als laatste kan de rekenkracht van de server vergroot worden, maar het effect hiervan is uiteindelijk gelimiteerd en het gaat gepaard met hogere kosten.
- In overleg met de eindgebruikers in het project (Nieuw Prinsenland en PWN) is uiteindelijk besloten om te streven naar een dagelijkse update van de Digital Twin-systemen. Dat houdt dus in dat voor beide systemen binnen 24 uur alle modellen gedraaid moeten hebben (de updates van het historische model en de 2 scenario's, zie Figuur 4-2) en ook de noodzakelijke pre- en postprocessing uitgevoerd moet zijn. Deze dagelijkse update leek een goed compromis, gezien wijzigingen in de bedrijfsvoering en de doorwerking hiervan op de watervoorraad nog altijd relatief snel op het dashboard inzichtelijk kon worden gemaakt, zonder dat hiervoor al te grote concessies gemaakt moesten worden in termen van de nauwkeurigheid van de modelvoorspelling. Voor het model in Dinteloord is om deze reden wel gebruik gemaakt van een 'spiegelglas' (zie paragraaf 3.3.4), waarmee het benodigde modeldomein gehalveerd wordt maar wat wel een concessie betekent wat betreft de nauwkeurigheid van het model.
- In de gekozen opzet in de project waren kosten van de rekenserver waar het systeem op geïnstalleerd was al €700,- per maand. Voor grote beheerders van ASR-systemen (bijvoorbeeld coöperaties van tuinders en drinkwaterbedrijven, zoals in dit project) nog acceptabel kunnen zijn indien er duidelijk meerwaarde is. Voor kleinere beheerders van ASR-systemen, zoals bijvoorbeeld in de agrarische sector of losse tuinbouwbedrijven, zal dat echter niet het geval zijn.
- Het ASR-systeem in Hoorn betreft vooralsnog slechts de pilot-opstelling met 1 put (en 2 putfilters). Voor het uiteindelijke systeem is de verwachting dat het zal bestaan uit 10 putten, wat zal resulteren in een veel zwaarder numeriek model. Indien hiervoor ook een Digital Twin ontwikkeld zal worden, zal dus opnieuw de juiste balans gezocht moeten worden tussen rekenkracht (en gerelateerde kosten), rekestijd en accuraatheid

van de modellen. Het ASR-systeem van Dinteloord bestond echter al uit 8 putten met meerdere putfilters per put, wat laat zien dat dit technisch gezien wel mogelijk is.

- Het mogelijke nut van meer lichtgewicht methodes voor het voorspellen van ASR-prestaties, als alternatief voor de traditionele numerieke grondwatermodellen, is in dit project dan ook duidelijk naar voren gekomen. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan de slimme toepassing van relatief simpele analytische vergelijkingen, of aan meer complexe machine learning modellen die wel weer getraind zouden kunnen worden op basis van numerieke simulaties. Aanvankelijk was onderzoek hiernaar ook een expliciet doel binnen het project maar uiteindelijk bleek hier door de tijd besteed aan het opzetten van de Digital Twin zelf (het primaire doel) geen ruimte meer voor te zijn.
- Het volledige Digital Twin-systeem tezamen, bestaande uit de veldmetingen die worden ontsloten via een FTP-server, het data-modelintegratie systeem (FEWS), de numerieke modellen (MODFLOW 6), en het dashboard, is een vrij complex systeem. Na de eerste lancering van het systeem kwam het daarom ook regelmatig voor dat het systeem niet bereikbaar of de data niet beschikbaar was, doordat één van de elementen van dit systeem niet functioneerde. Gedurende de periode waarin het Digital Twin-systeem operationeel werd gehouden zijn veel kinderziekten verholpen waardoor de uiteindelijke versie al een stuk stabielere was en voor langere periodes goed bleef functioneren. Echter, voor toekomstige toepassing zal het verder gestroomlijnd en robuuster gemaakt moeten worden.
- Bij het begroten van een Digital Twin-systeem voor een ASR zal daarom voorlopig wel rekening gehouden moeten worden met aanzienlijke overhead kosten voor het beheren en in de lucht houden ervan na oplevering. De kosten hiervan moeten echter wel in perspectief worden geplaatst tegen de kosten die beheerders van ASR-systemen momenteel maken voor het periodiek laten actualiseren en updaten van modellen, zoals dat nu periodiek gebeurt om bijvoorbeeld de actuele watervoorraad of mogelijke uitbreidingen te laten onderzoeken, of omdat dit vereist is vanuit de vergunning.

7 Conclusies

Om inzicht te krijgen in deze potentie en wat daar voor nodig is, was het doel van dit project was om Digital Twins te ontwikkelen voor twee ASR-systemen, en te evalueren of en hoe er tot een 'proof-of-concept' gekomen kan worden. De twee hiervoor gebruikte casussen zijn een ASR-systeem voor de glastuinbouw in Dinteloord en een ASR-systeem voor de drinkwatervoorziening in Hoorn. Hiervoor zijn numerieke grondwatermodellen ontwikkeld die op basis van historische en actuele pompgegevens het echte systeem proberen na te bootsen.

Bij de ontwikkeling van de Digital Twins zijn numerieke grondwatermodellen (MODFLOW6) succesvol gekoppeld aan een data-model integratiesysteem (Delft-FEWS) en een online dashboard. Spin in het web is het data-model integratie systeem, dat automatisch velddata importeert, verwerkt, en toereikt aan de modellen. Vervolgens initieert het eerst het model waarmee de actuele verbreiding van het opgeslagen zoete water ingeschat en dan twee verschillende modelscenario's waarmee ook de toekomstige ontwikkeling kan worden ingeschat. Als laatste worden de modeluitkomsten en monitoringsgegevens aangereikt aan en gevisualiseerd op een online dashboard.

Gedurende een periode van ongeveer een jaar hebben de ontwikkelde Digital Twins digitaal 'meegedraaid' met de fysieke ASR systemen. Vervolgens functioneerden ze als casus om de toegevoegde ervan voor ASR-systemen te onderzoeken en om een slimme aanpak te ontwikkelen voor de technische opzet, ontwikkeling en beheer van dit soort systemen. Ten aanzien van de toegevoegde waarde van de systemen zijn bij dit onderzoek een aantal belangrijke beperkingen naar voren gekomen:

- Voor een significant deel van de 18 putfilters van het systeem in Dinteloord en voor 1 van de 2 putfilters bij het systeem in Hoorn blijkt de gemodelleerde EC significant hoger of lager te zijn dan de in het veld gemeten waarde, of komt de timing van de verzilting tijdens de onttrekking niet overeen.
- De afwijking tussen modelresultaten en de veldmetingen komen voor een belangrijk deel door de heterogeniteit van de ondergrond, die beperkt bekend is en daardoor in het model sterk versimpeld is ingebouwd. Verdere kalibratie van de modellen zou de afwijking kunnen verkleinen, maar voor dergelijk complexe modellen geldt dat het zeer uitdagend zal zijn om voor alle putfilters een goede fit te krijgen.
- Naast het correct inbouwen van heterogeniteit speelt ook mee dat er bij de opzet van het systeem rekening gehouden moest worden met de capaciteit van de rekenserver en de gewenste frequentie waarmee het dashboard geactualiseerd moest worden. Om de gewenste frequentie te behalen zijn een aantal concessies gemaakt in termen van de temporele en ruimtelijke resolutie van de grondwatermodellen, en daarmee de accuraatheid van de modelvoorspellingen.
- Door deze afwijking kan de doelstelling om via een Digital Twin op enig moment te beschikken over een nauwkeurige voorspellingen van de nog beschikbare hoeveelheid zoetwater, zodat daar in de bedrijfsvoering rekening mee gehouden kan worden, alleen worden waargemaakt voor een subset van de putten. Met de huidige staat van ontwikkeling lijken de digital twins niet daadwerkelijk een bijdrage te kunnen leveren aan verbeterd zoet waterbeheer.
- Ten opzichte van de huidige gangbare manier van monitoring bij ASR systemen, wat plaatsvindt op basis van metingen in de bronputten en evt. in één of enkele monitoringsputten, bieden de ontwikkelde Digital Twins het voordeel dat een inschatting van de verbreiding van de zoetwaterbel(len) duidelijk en op dagelijkse basis in te zien is. Onder meer uit de vergelijking tussen de modelresultaten en de bij Dinteloord uitgevoerde ERT metingen is er op een aantal plekken echter een duidelijke mismatch gevonden tussen de gemodelleerde verbreiding van de bellen en de werkelijkheid.

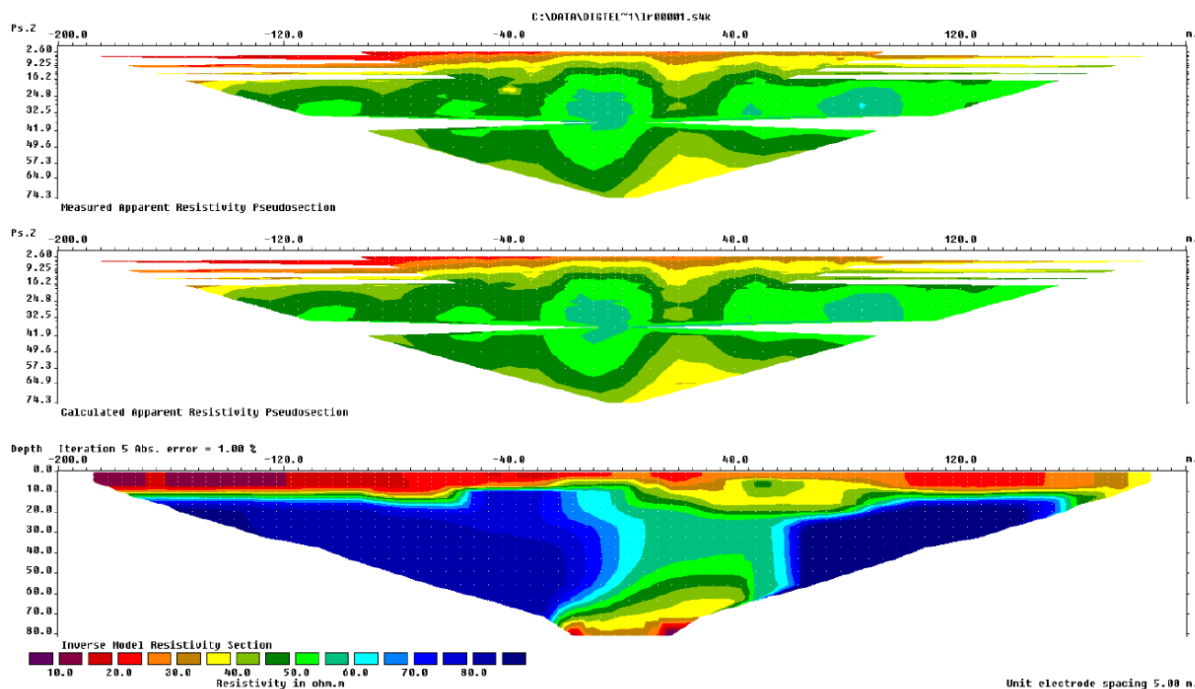
Een volledige Digital Twin voor een ASR bestaat uit een complex samenspel van verschillende typen software. Bij ontwikkeling van een dergelijk systeem moet rekening gehouden worden met het feit dat het volledig werkend krijgen van het systeem veel tijd vergt en regelmatig onderhoud vereist. In dit project is gebruik gemaakt van relatief lichtgewicht grondwatermodellen, waarbij geprobeerd is zo weinig mogelijk in te leveren op de kwaliteit van de resultaten. Bij de ontwikkeling van een Digital Twin ligt dus een grote uitdaging in het vinden van de juiste balans tussen de resolutie (aantal cellen en tijdstappen) van de grondwatermodellen, de updatefrequentie van de Digital Twin en de reken capaciteit van de server. Aandachtspunt van de huidige opzet van de Digital Twins zijn daardoor ook de relatief hoge serverkosten (in dit project €700,- per maand). Een duidelijke uitkomst van het project was daardoor ook dat is gebleken dat voor verbeterd operationeel beheer van ASR systemen ook gekeken zal moeten worden naar het ontwikkelen van alternatieve, numerieke minder intensieve, methoden voor het inschatten van het opslagrendement en de zoetwatervoorraad.

8 Referentielijst

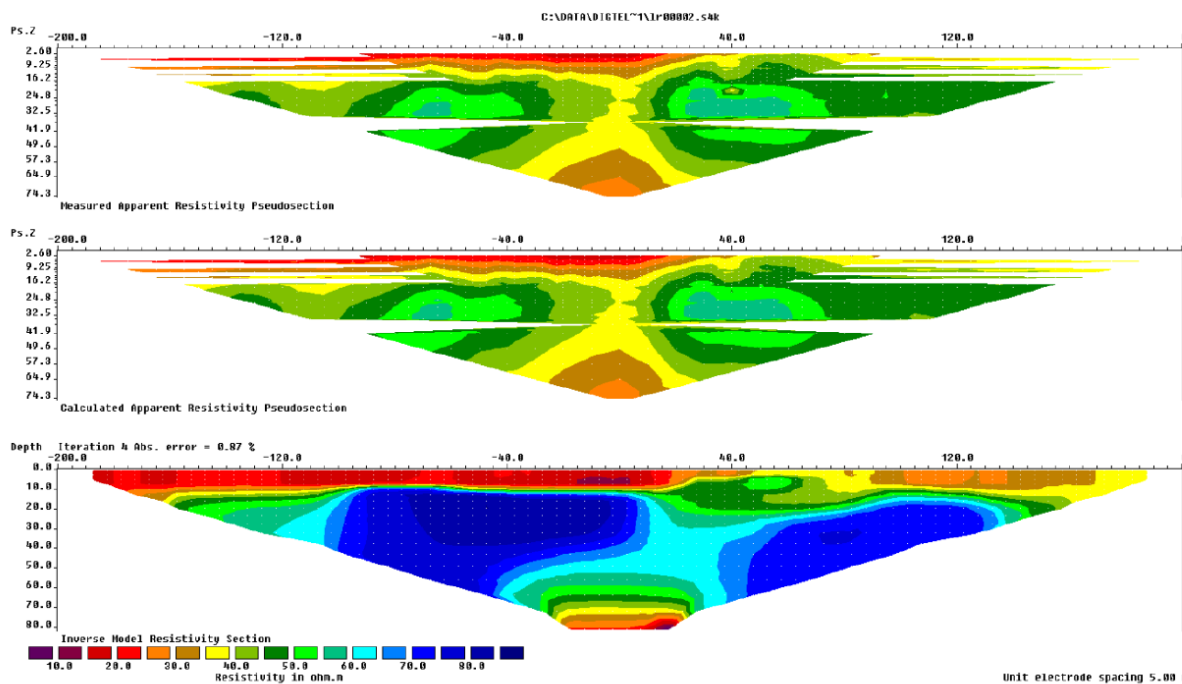
- Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J., & Fioren, M. N. (2018). *FloPy v3.2.9: U.S. Geological Survey Software Release, 19 February 2018*. <http://dx.doi.org/10.5066/F7BK19FH>
- Brokx, L., Dooren, T. Van, Schout, G., & Raat, K. (2022). *Memo: Huidige status ASR bronnen Dinteloord*.
- Conejos Fuertes, P., Martínez Alzamora, F., Hervás Carot, M., & Alonso Campos, J. C. (2020). Building and exploiting a Digital Twin for the management of drinking water distribution networks. *Urban Water Journal*, 17(8), 704–713. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1771382>
- Doherty, J., White, J., & Welter, D. (2018). *PEST & PEST++*. October.
- Henriksen, H. J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Troldborg, L., Seidenfaden, I. K., Kragh, S. J., Bøgh, E., & Stisen, S. (2023). A New Digital Twin for Climate Change Adaptation, Water Management, and Disaster Risk Reduction (HIP Digital Twin). *Water (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/w15010025>
- Langevin, C. D., Hughes, J. D., Banta, E. R., Niswonger, R. G., Panday, S., & Provost, A. M. (2017). Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. *Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chap. A55, 197 p.*, 197. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/tm6A55>
- Langevin, C. D., Panday, S., & Provost, A. M. (2019). Hydraulic-Head Formulation for Density-Dependent Flow and Transport. *Groundwater*, 58(3), 349–362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gwat.12967>
- Leon, J. A. R. De, Concepcion II, R. S., Billones, R. K. C., Baun, J. J. G., Custodio, J. M. F., Vicerra, R. R. P., Bandala, A. A., & Dadios, E. P. (2023). Digital Twin Concept Utilizing Electrical Resistivity Tomography for Monitoring Seawater Intrusion. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 27(1), 12–18. <https://doi.org/10.20965/jaciii.2023.p0012>
- Martínez Alzamora, F., Conejos, P., Castro-Gama, M., & Vertommen, I. (2021). Digital Twins - A new paradigm for water supply and distribution networks. *HydroLink*, 2, 48–54.
- Ros, S., & Boer, A. W. (2020). *SEAWAT modelling ASR Hoorn (PWN)*.
- Savić, D. (2022). Digital Water Developments and Lessons Learned from Automation in the Car and Aircraft Industries. *Engineering*, 9, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.05.013>
- Sookhak Lari, K., Davis, G. B., & Rayner, J. L. (2022). Towards a digital twin for characterising natural source zone depletion: A feasibility study based on the Bemidji site. *Water Research*, 208, 117853. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117853>
- Van der Made, K. J., & Groen, M. (2022). *Resultaten geofysische metingen - TKI digital twin te Dinteloord - Kennisoverdracht*.
- Van Dooren, T. C. G. W., & Ros, S. E. M. (2019). *Rapportage ASR Nieuw Prinsenland (Dinteloord). Evaluatie bedrijfsvoering en effecten 2020*.
- Zuurbier, K. G., & Ros, S. E. M. (2017). *Aquifer storage and recovery van gezuiverd effluent Nieuw Prinsenland (Dinteloord)*.
- Zuurbier, K. G., Ros, S. E. M., & Stuyfzand, P. J. (2018). *Verkenning inzet ASR voor opslag drinkwater PS Hoorn*.
- Zuurbier, K. G., & Van Dooren, T. C. G. W. (2019). *Handleiding ASR Dinteloord: Instructies voor de bedrijfsvoering van de ondergrondse waterberging*.
- Zuurbier, K. G., Van Dooren, T. C. G. W., & Ros, S. E. M. (2018). *Guide on using ASR-Coastal with treated wastewater for irrigation*.
- Zuurbier, K. G., Zaadnoordijk, W. J., & Stuyfzand, P. J. (2014). How multiple partially penetrating wells improve the freshwater recovery of coastal aquifer storage and recovery (ASR) systems: A field and modeling study. *Journal of Hydrology*, 509, 430–441. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.057>

I. Meetresultaten ERT-metingen

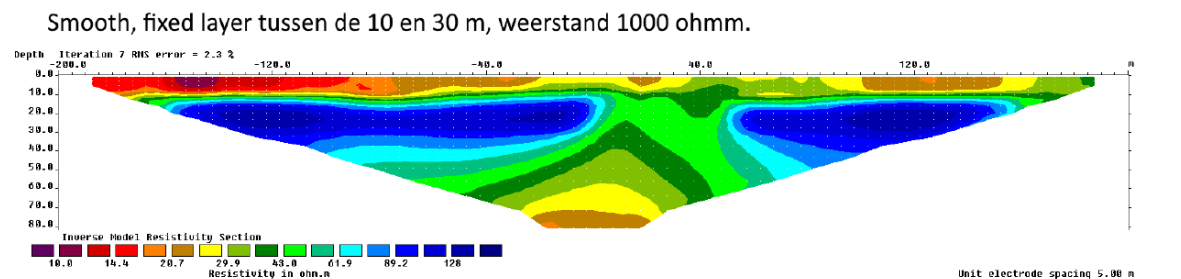
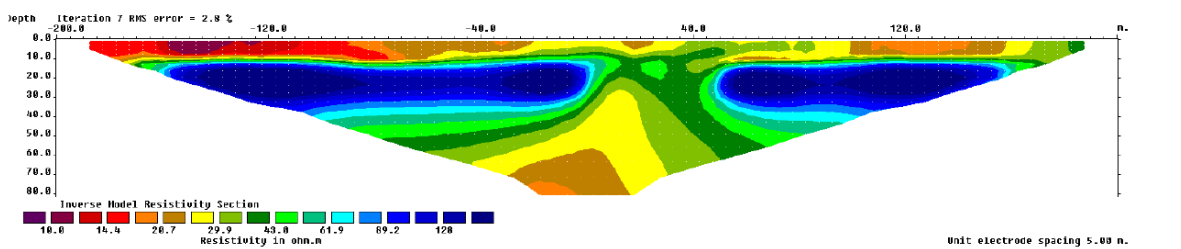
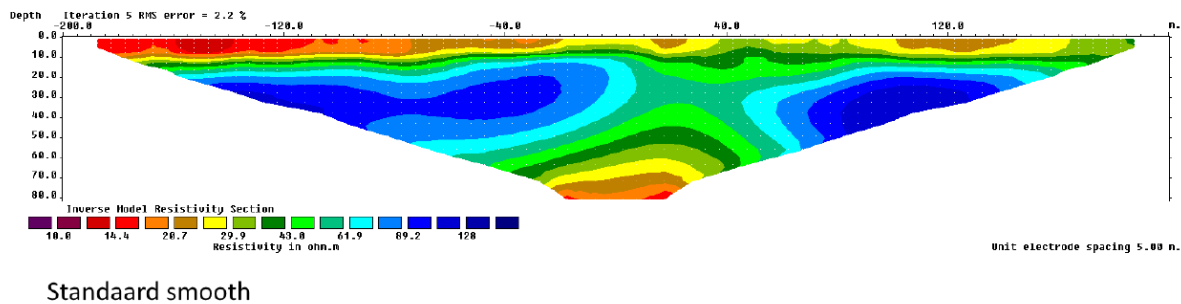
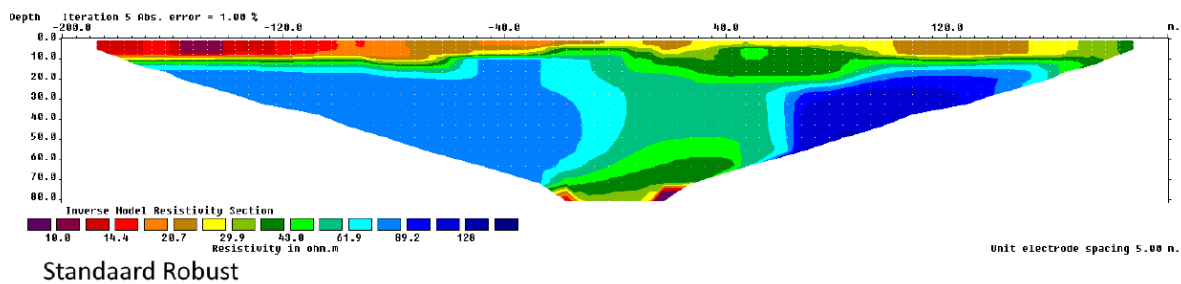
Figuren verkregen uit (Van der Made & Groen, 2022).



Figuur 3.3. Resultaten van meting 1: boven: gemeten schijnbare weerstand; midden: schijnbare weerstand behorend bij het inversie model; onder: inversie resultaat, verschil in fit meting en model: 1%.



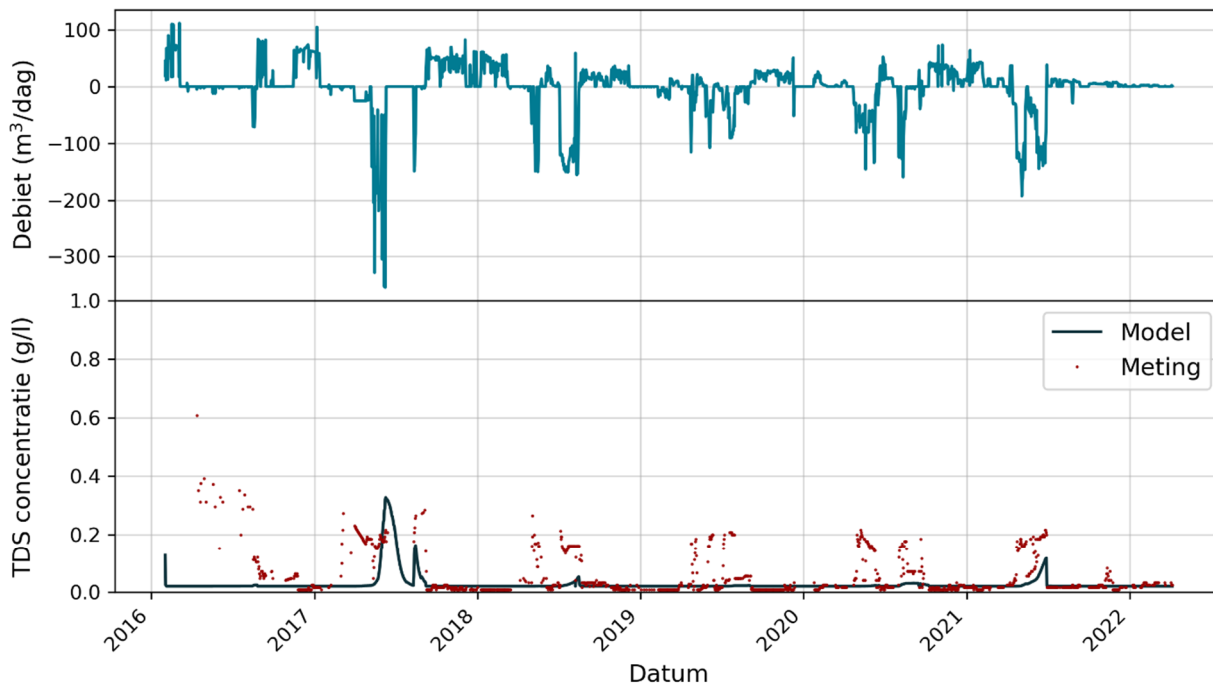
Figuur 3.4a. Resultaten van meting 2: boven: gemeten schijnbare weerstand; midden: schijnbare weerstand behorend bij het inversie model; onder: inversie resultaat, verschil in fit meting en model: 0,87%.



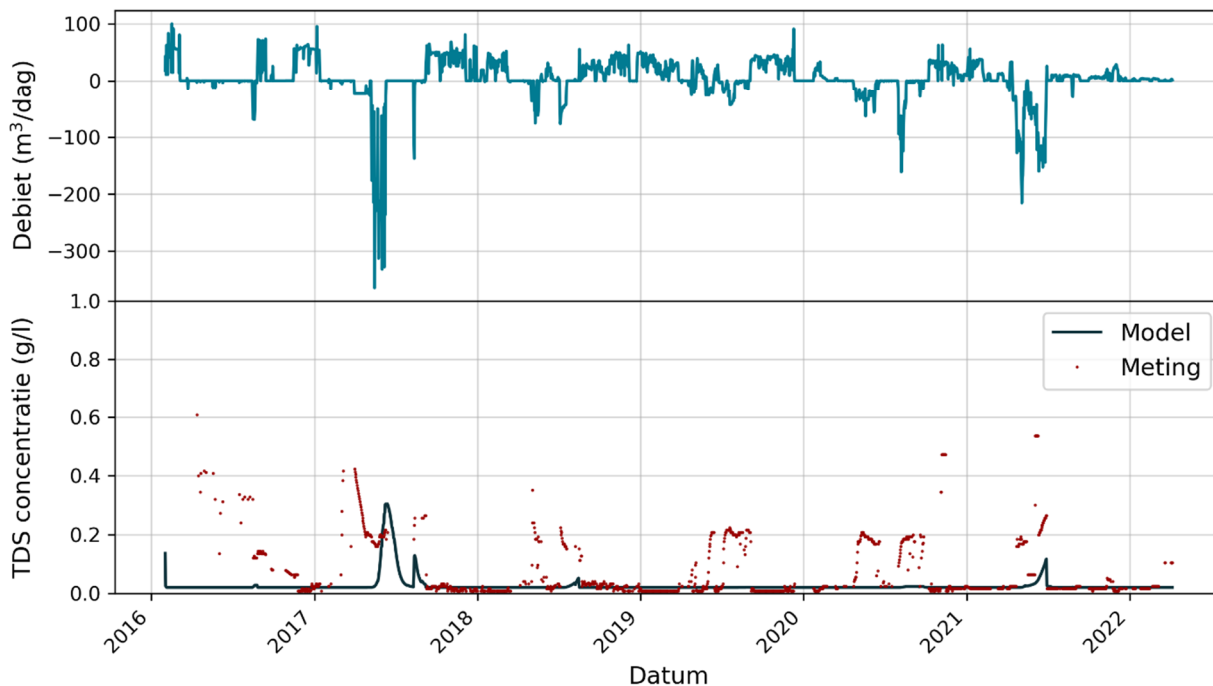
Figuur 3.4b, vergelijk van de verschillende inversies, let op dat de kleur schaal is aangepast om de inversies te kunnen vergelijken (logaritmisch)

II. TDS model vs. metingen Dinteloord

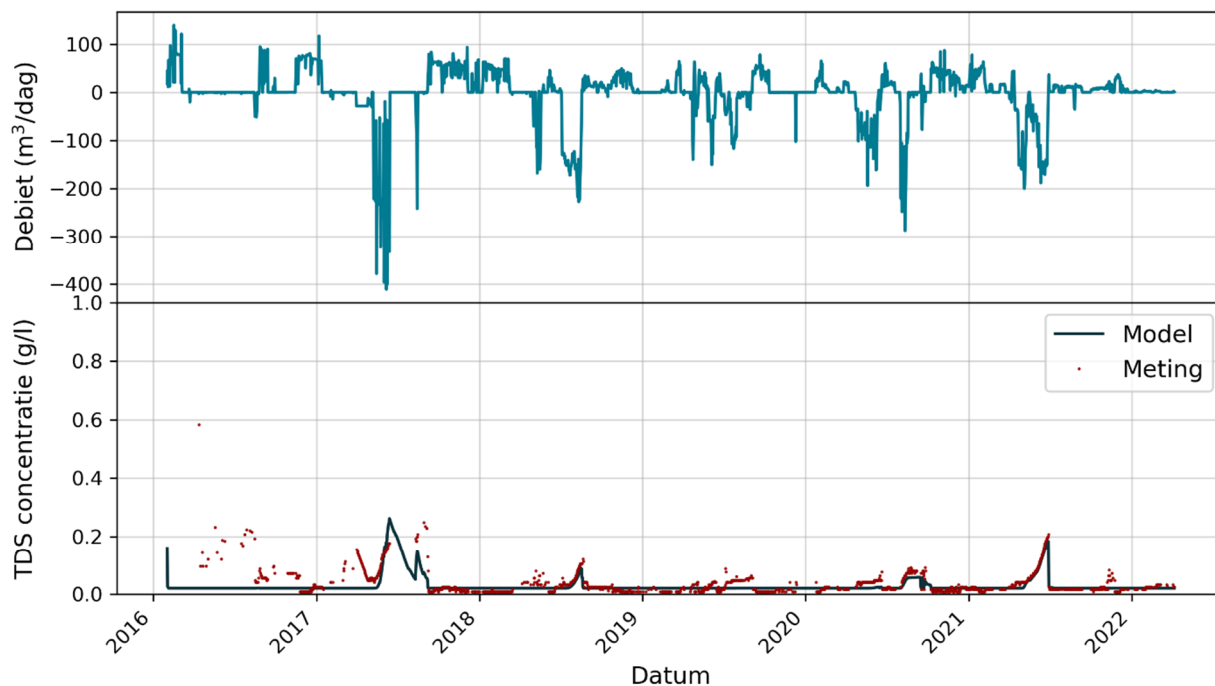
Put 1.1



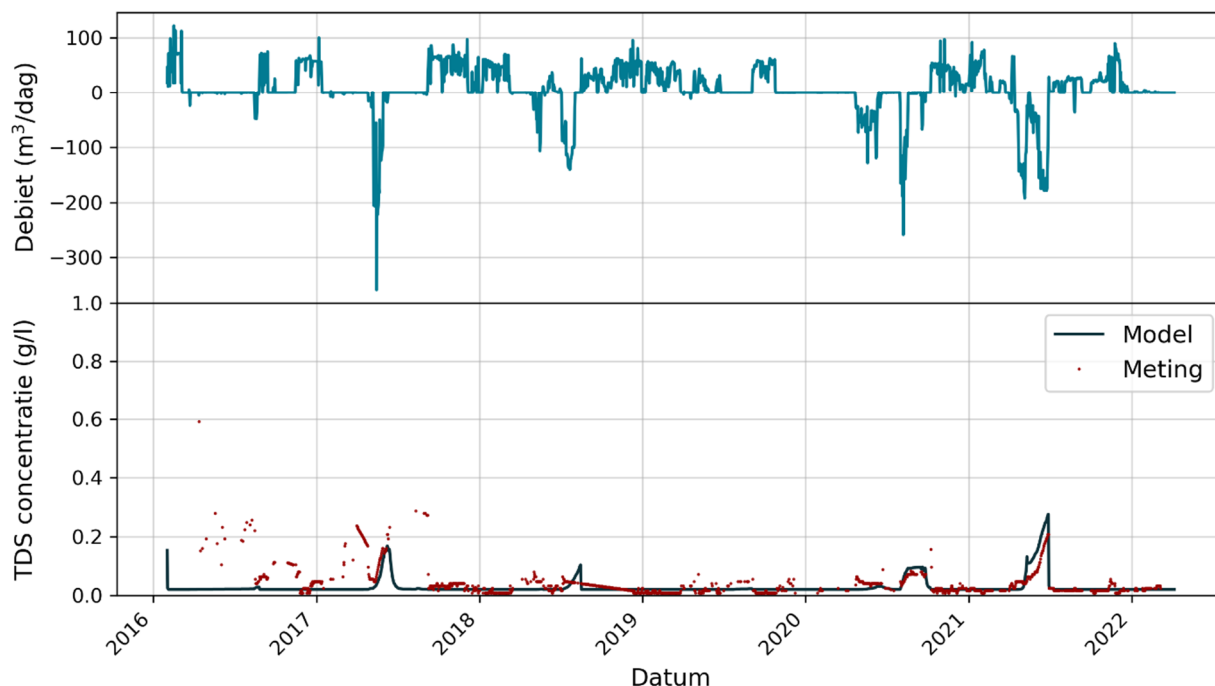
Put 1.2



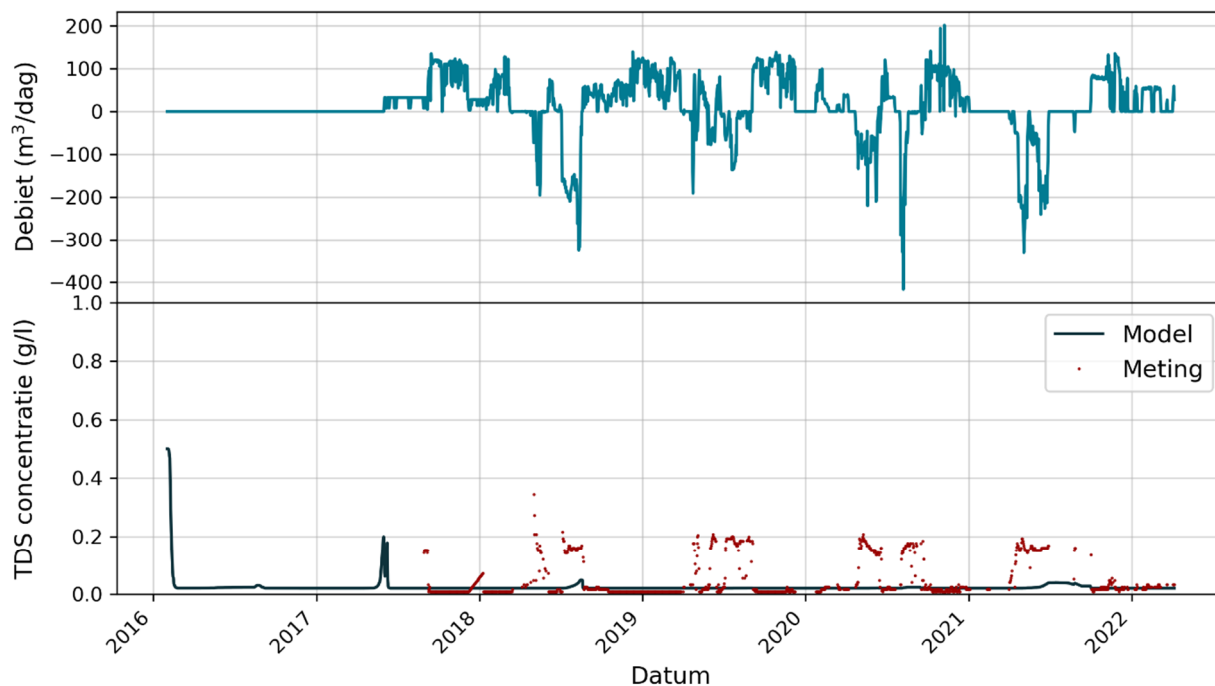
Put 1.3



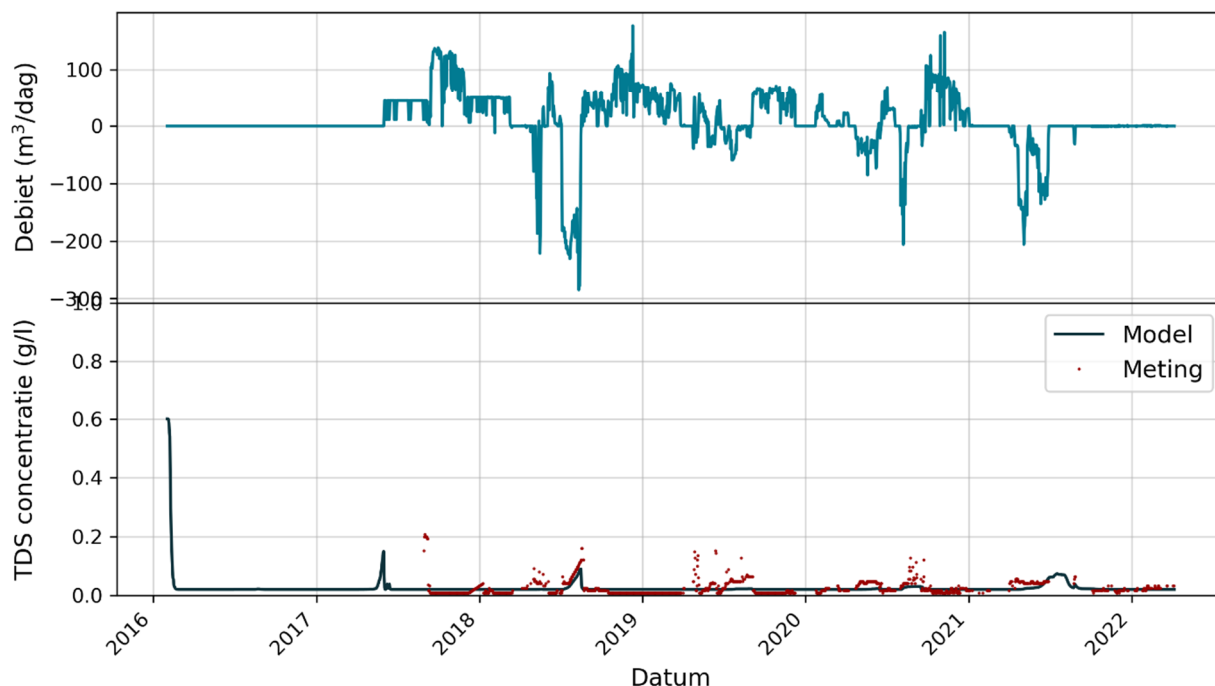
Put 1.4



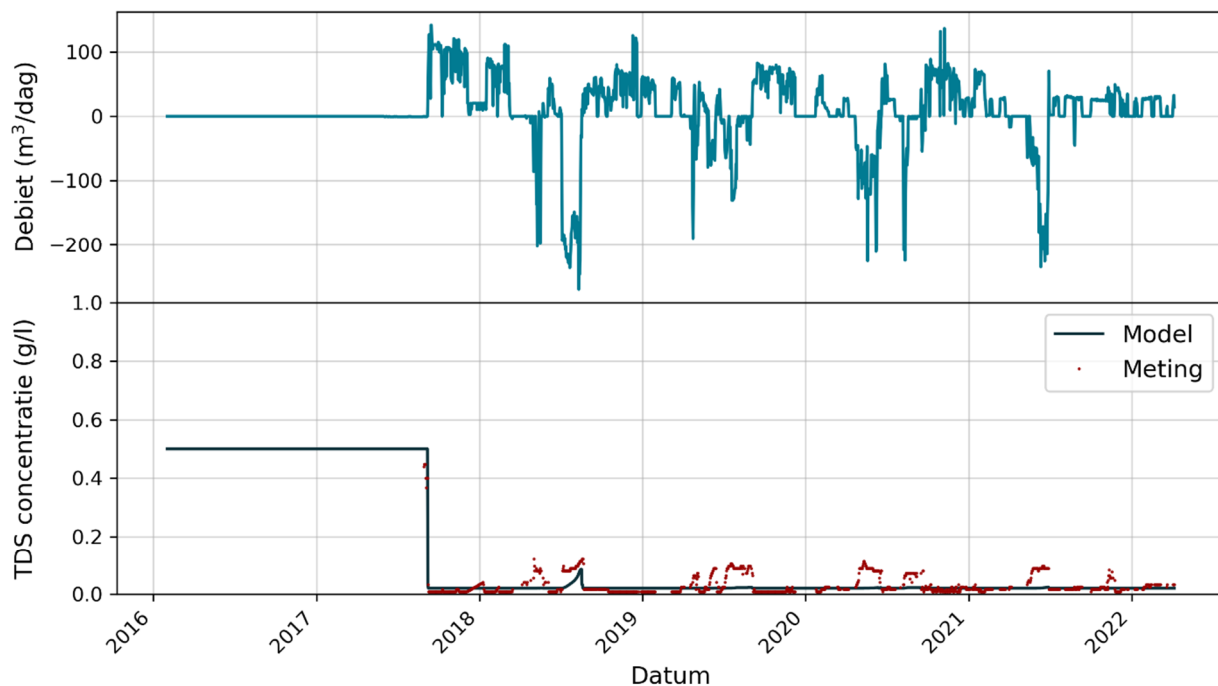
Put 2.1



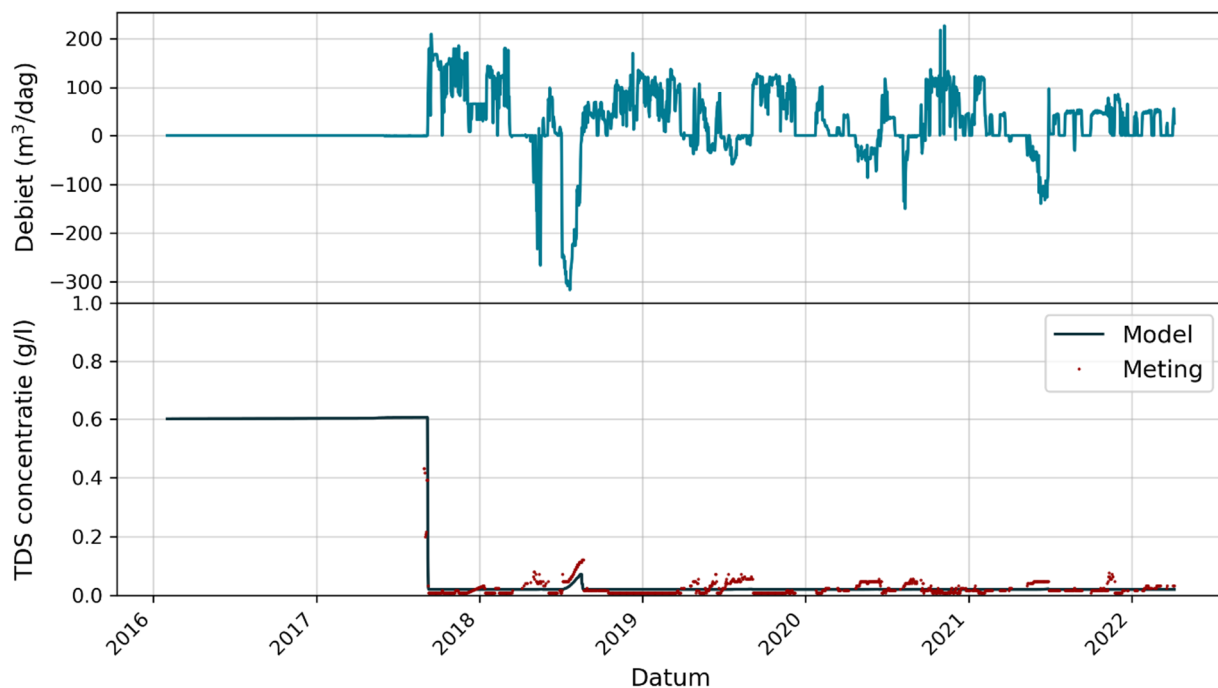
Put 2.2



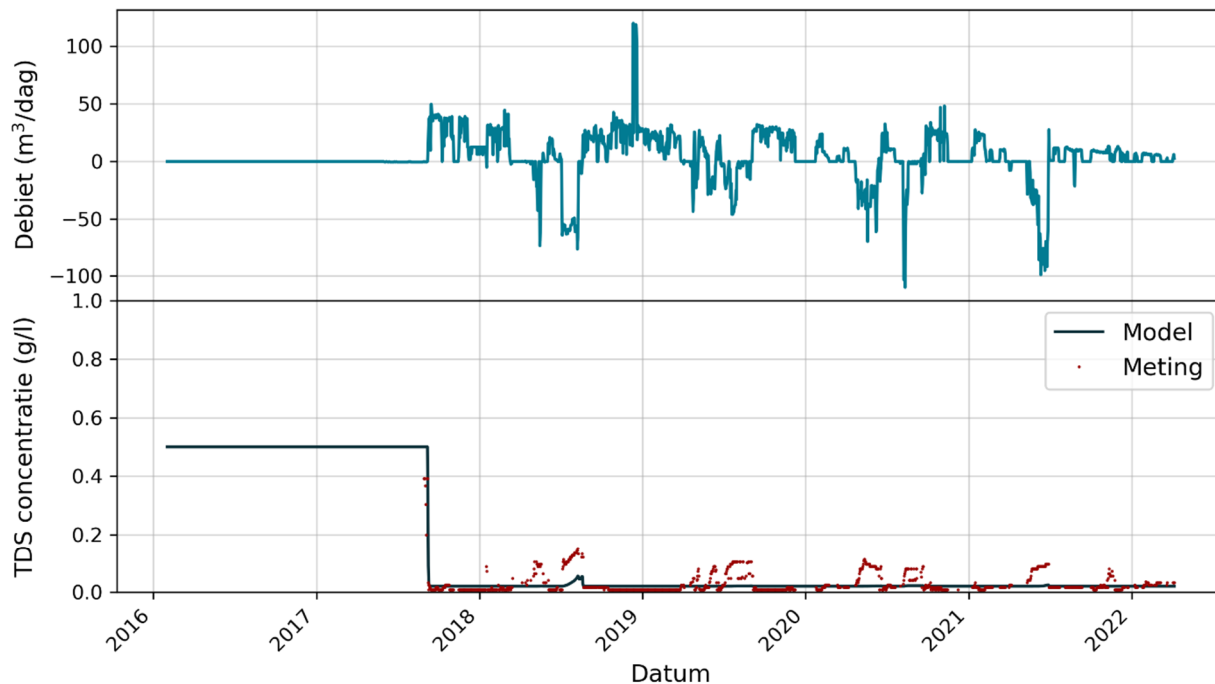
Put 3.1



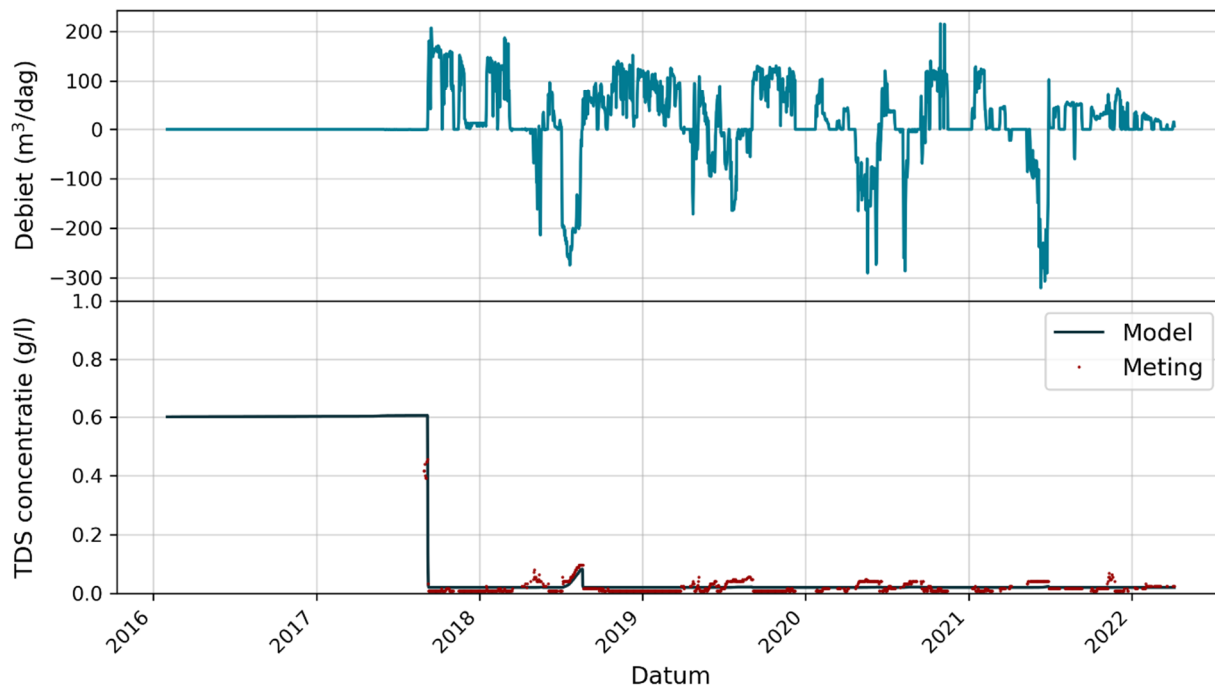
Put 3.2



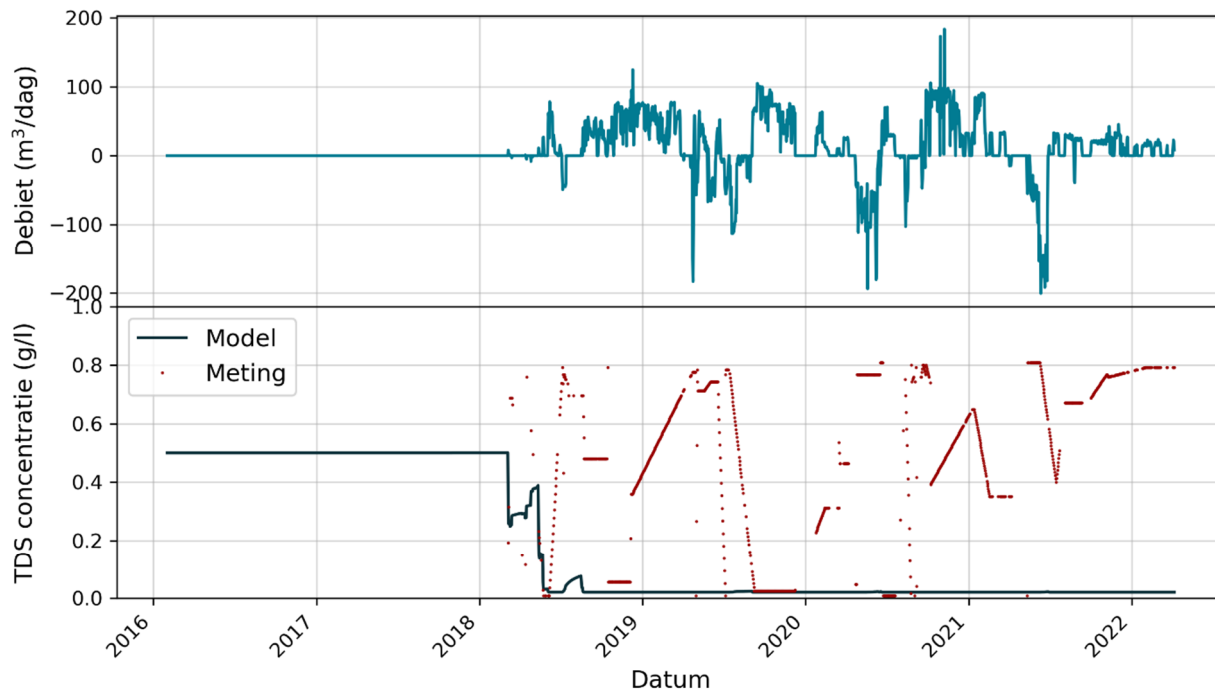
Put 4.1



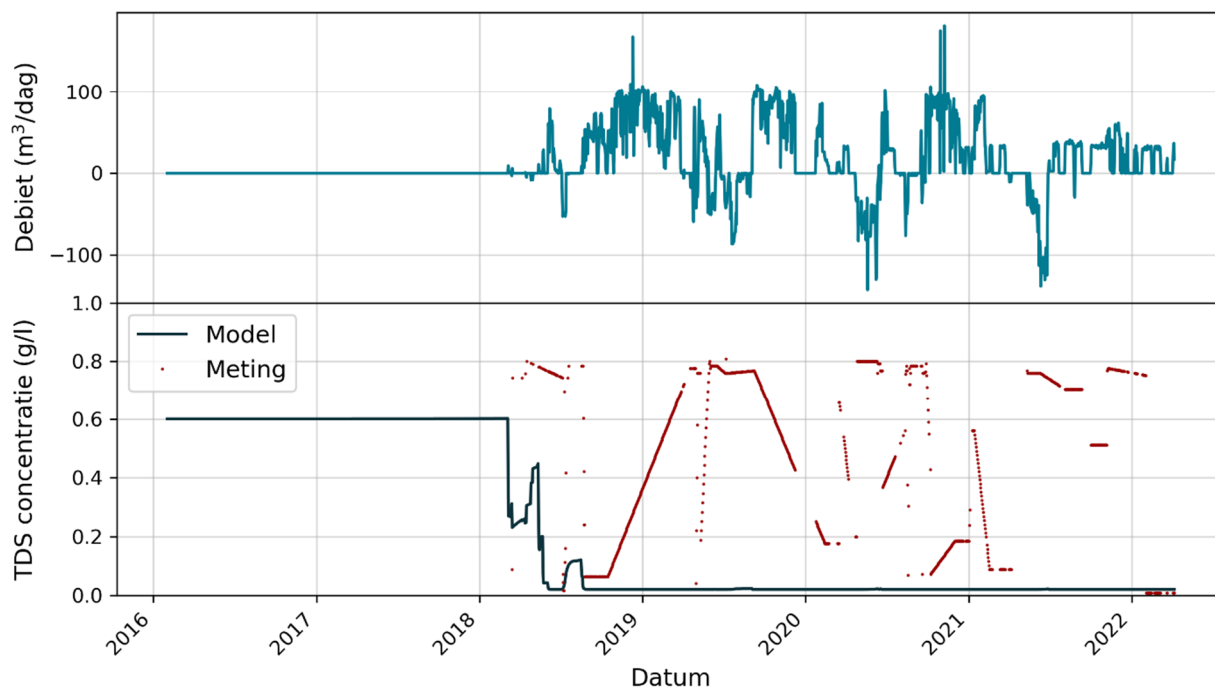
Put 4.2



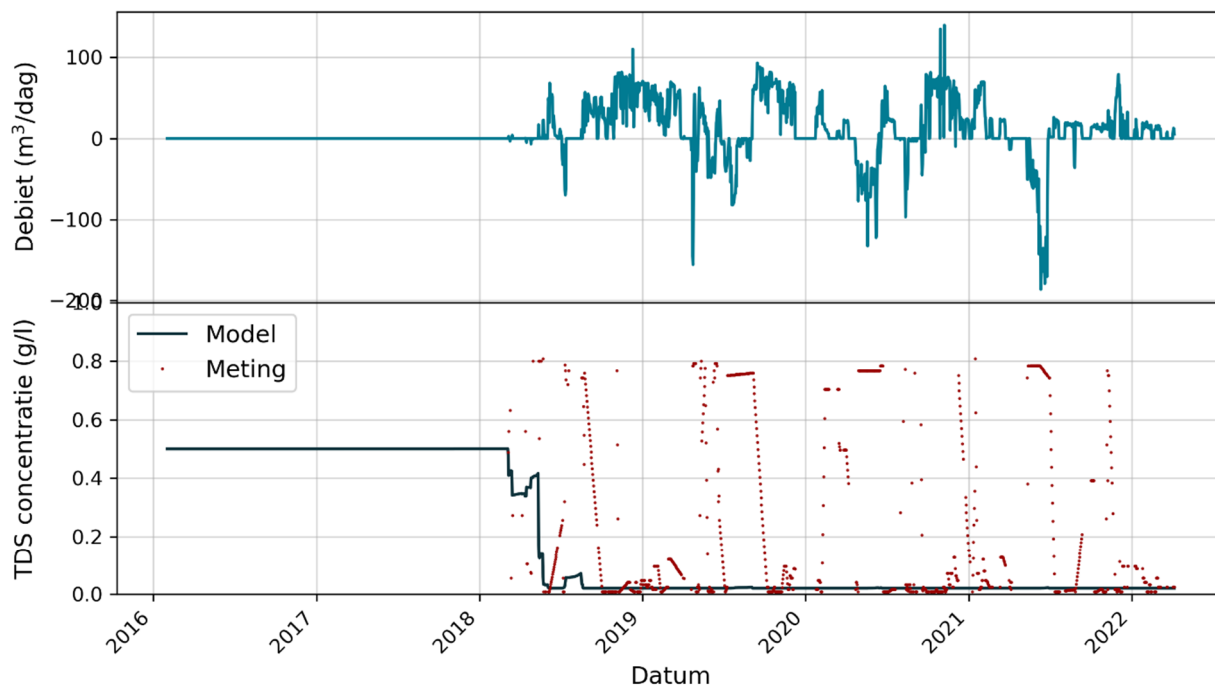
Put 5.1



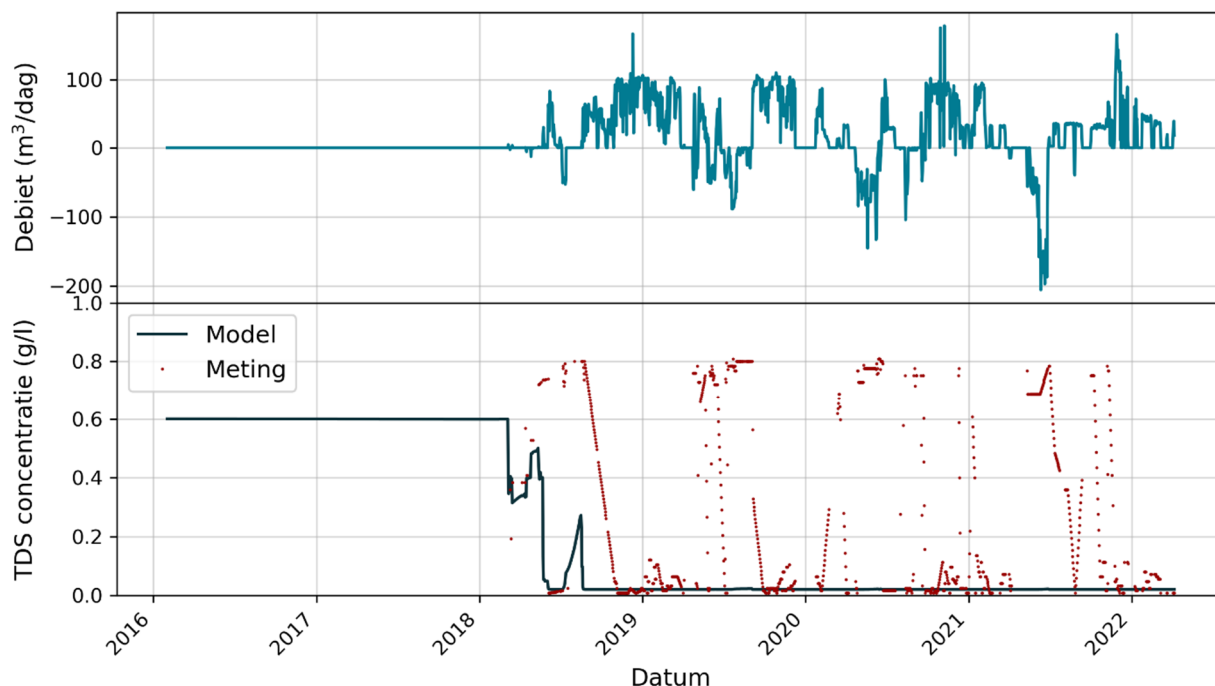
Put 5.2



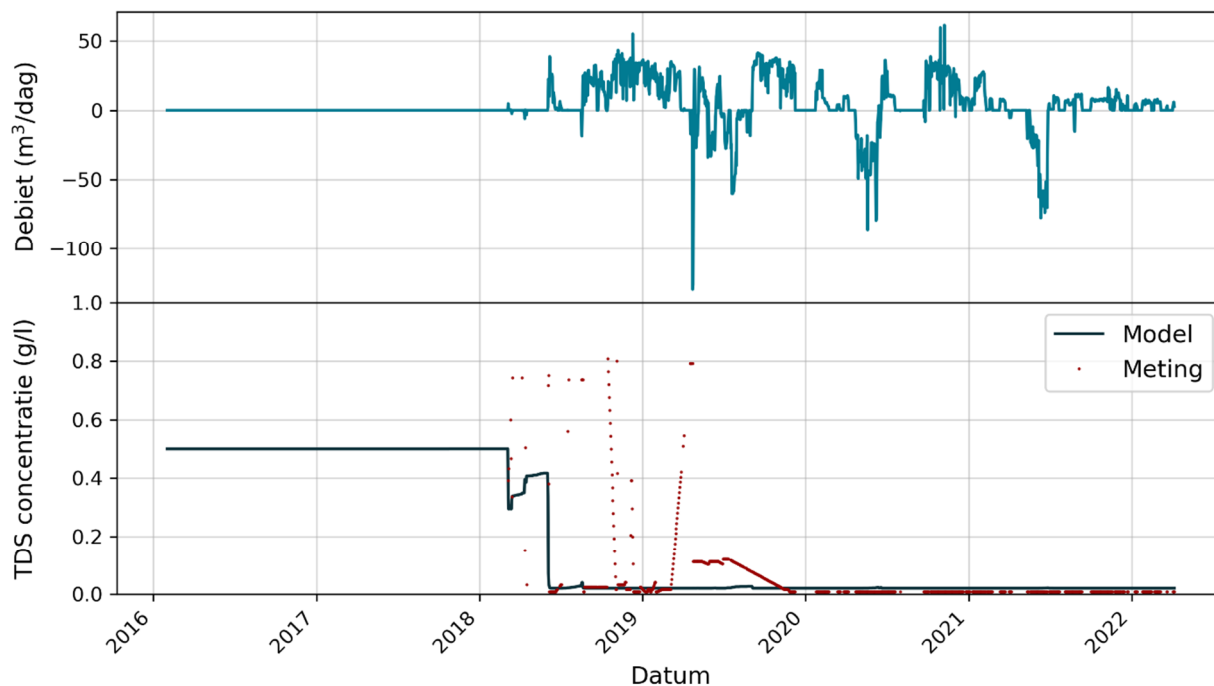
Put 6.1



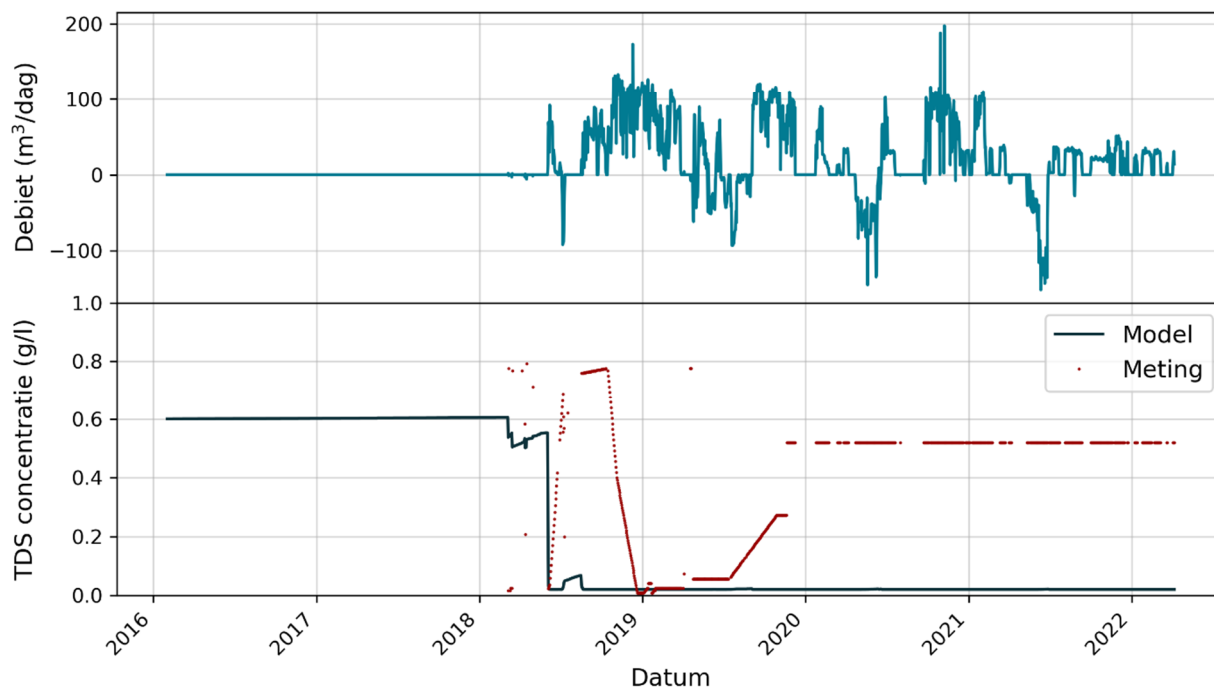
Put 6.2



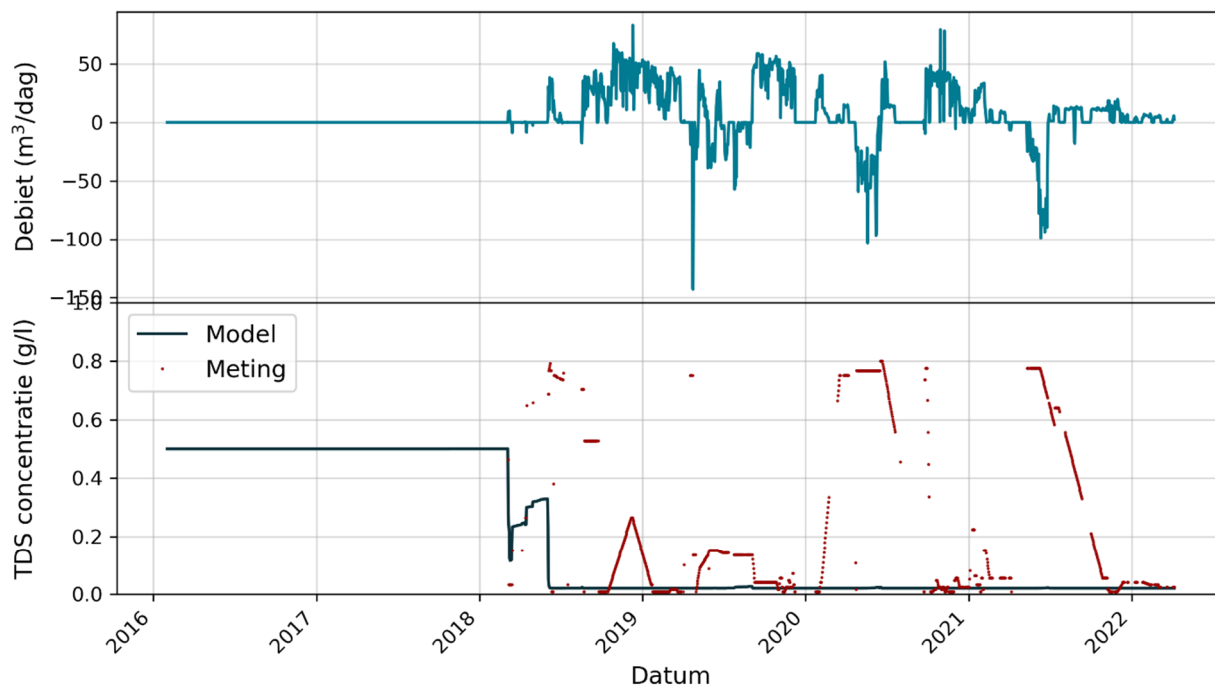
Put 7.1



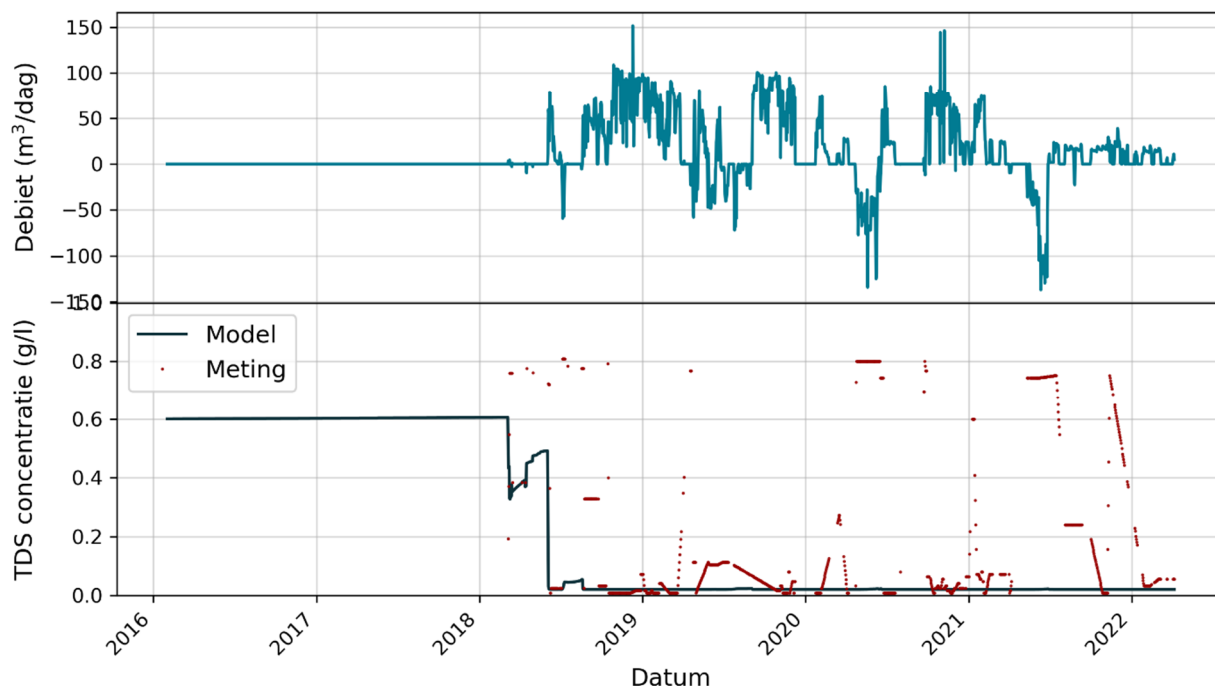
Put 7.2



Put 8.1



Put 8.2



III. Ontsluiting data via webservice

Het dashboard kan de data opvragen via de webservice. Hiervoor is een API beschikbaar waarmee op een gestandaardiseerde manier de data kan worden opgevraagd en deze staat beschreven op [FEWS Web Services - DELFT-FEWS Documentation - Deltares Public Wiki](#)¹. Voor het opvragen is de beschikbare data gegroepeerd met zogenaamde filters en bevat elke tijdreeks in de dataset unieke kenmerken (ids) om specifiek alleen die tijdreeksen op te vragen.

Filters

De volgende filters zijn aangemaakt uitgedrukt in een boomstructuur met per tak de filter id:

- Webservice
 - Import
 - ImportPWN (aanwezig voor Hoorn) / ImportDinteloord (aanwezig voor Dinteloord)
 - ASR_Model
 - ASR_Model_Profiles_dummy
 - ASR_Model_Historie
 - ASR_Model_Historie_scalar
 - ASR_Model_Historie_profiles
 - ASR_Model_Scenario_1
 - ASR_Model_Scenario_1_scalar
 - ASR_Model_Scenario_1_profiles
 - ASR_Model_Scenario_2
 - ASR_Model_Scenario_2_scalar
 - ASR_Model_Scenario_2_profiles

In deze structuur vormt de hoofdtak steeds de som van de onderliggende takken (dus de hoofdtak bevat alle data van onderliggende filters). Filter id "ASR_Model_Profiles_dummy" dient te worden gebruikt om de beschikbare locaties op te vragen voor de verticale profielen die samen het totale modelgrid vormen. Met deze locaties kunnen vervolgens filter id's eindigend op "_profiles" worden bevraagd om de tijdreeks data als verticale profielen daadwerkelijk op te vragen. Deze filters bevatten alleen de modelresultaten. De filters eindigend op "_scalar" en beginnend met "Import" bevat alleen 'normale' scalaire tijdreeks data. Degene beginnend met "Import" bevatten de gemeten data. Degene eindigend met "_scalar" bevatten zowel modelresultaten (indien hiervoor een puntlocatie in het model bekend is dat ook kan worden opgepikt door FEWS) en welke aanvoer/afvoerdebieten voor de ASR pompen per dag door het model worden gebruikt.

Parameters

Tabel 8-1 geeft de beschikbare parameters in de webservice weer inclusief onder welke filter deze aanwezig is en in welke systeem (Hoorn en/of Dinteloord) deze beschikbaar is. Er wordt ook gebruik gemaakt van zogenoemde qualifiers die een extra specificering van de parameter aangeven en is daarmee een uitsplitsing van het totaal zonder qualifier.

¹ <https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/FEWS+Web+Services>

Tabel 8-1. Overzicht beschikbare parameter id's met aangegeven onder welke filter id en voor welke systeem beschikbaar.

Parameter id	Aanwezig onder filter id	Hoorn	Dinteloord	Opmerking
Geleidbaarheid.meting	Import	x	x	Bevat qualifier Leiding voor Hoorn
EGV.meting	Import	x		
Chloride.meting	Import	x		
Temperatuur.meting	Import	x		Bevat qualifier Leiding
GW.meting	Import	x		Bevat qualfier Omstorting
Q.meting	Import	x	x	Bevat qualifiers Leiding, Onttrekking, Infiltratie
Zuurstof.meting	Import	x		
V.meting	Import		x	Bevat qualifiers Leiding, Onttrekking, Infiltratie
Q.sim.scenario	ASR_Model_Scenario_* _scalar	x	x	ASR pompdebiet per dag voor model. Bevat qualifiers Scenario_1 en Scenario_2 voor scenario runs
GW.sim.historie	ASR_Model_Historie _profiles	x	x	
TDS.sim.historie	ASR_Model_Historie _profiles	x	x	
Drinkwater_fractie.sim.historie	ASR_Model_Historie _profiles	x		
GW.sim.scenario	ASR_Model_Scenario_* _profiles	x	x	Bevat qualifiers Scenario_1 en Scenario_2 voor scenario runs
TDS.sim.scenario	ASR_Model_Scenario_* _profiles	x	x	Bevat qualifiers Scenario_1 en Scenario_2 voor scenario runs
Drinkwater_fractie.sim.scenario	ASR_Model_Scenario_* _profiles	x		beschikbaar. Bevat qualifiers Scenario_1 en Scenario_2 voor scenario runs

Locaties

Voor beide systemen (Hoorn en Dinteloord) zijn er diverse locaties beschikbaar waarop data kan worden opgevraagd. Voor het dashboard zullen echter de modelresultaten het meest relevant zijn. De volgende locaties zijn beschikbaar:

- Dinteloord
 - AW1 t/m AW8. Dit zijn de 8 ASR putten waarop externe data wordt geïmporteerd. Binnen elke put is een specificering naar putfilter gemaakt. Dit wordt met een extra .X achtervoegsel aangegeven waarbij X het nummer van het betreffende putfilter is.
 - Alle 8 ASR putten inclusief putfilters zijn ook toegevoegd als observatie-locaties in de MODFLOW modellen. Hierbij begint de locationId echter met Obs_ i.p.v. AW. Alleen de putdelen en niet de hoofdlocaties zijn opgenomen.

- Alle cellen van het modelgrid waarop de verticale profielen beschikbaar zijn (zie laatste alinea sub paragraaf Algemeen in paragraaf 4.3.2). De locationId voor elke cel is als volgt opgebouwd: [cel id]_[rijnummer in grid]_[kolomnummer in grid]_[cel breedte]_[cel hoogte].
- Het modelgrid van Dinteloord is de helft van het gehele model. De veldsituatie wordt namelijk als symmetrisch beschouwd (Paragraaf 3.3.4) over de as van de ASR-putten en het bespaart rekentijd om alleen 1 helft van de symmetrie te berekenen. In de post-adapter van het model wordt echter het berekende deel gespiegeld en aan het andere deel geplakt om tot het volledige modelgrid te komen. Aangezien het modelgrid ook gedraaid is, is locatie 1_1_1_80_80 in de zuidwesthoek gesitueerd (en dus niet gebruikelijk in de noordwest hoek).
- Hoorn
 - HOI001 en HOI002. Dit zijn de ASR putdelen waarop externe data wordt geïmporteerd. Er is ook een HOI003 locatie beschikbaar die het gedeelte tussen de putdelen representeert.
 - Obs_1 die de ASR put representeert en als observatie locatie in het MODFLOW model is toegevoegd.
 - Alle cellen van het modelgrid waarop de verticale profielen beschikbaar zijn (zie Paragraaf 4.3.2). De locationId voor elke cel is als volgt opgebouwd: [cel id]_[rijnummer in grid]_[kolomnummer in grid]_[cel breedte]_[cel hoogte]

Best practice om data op te vragen

De webservice bevat allerlei mogelijkheden om de data op te vragen. Het is best practice om te starten bij het opvragen van de locaties en daarna de daadwerkelijke tijdreeks data op te vragen. Hiervoor worden de volgende stappen uitgevoerd:

- 1 Vraag locaties met metadata in json format onder een bepaalde filter id op met de volgende URL request:
`https://[base url]/FewsWebServices/rest/fewspiservice/v1/locations?filterId=[filter_id]&showAttributes=true&documentFormat=PI_JSON`
- 2 Parse de resulterende json om de locaties te verkrijgen in een lijst
- 3 Vraag dan per locatie de tijdreeks data op voor een bepaalde parameter met de volgende URL request:
`https://[base url]/FewsWebServices/rest/fewspiservice/v1/timeseries?filterId=[filter_id]¶meterIds=[parameter_id]&startTime=[starttijd in format yyyy-MM-dd HH:mm:ss]&stopTime=[eindtijd in format yyyy-MM-dd HH:mm:ss]&documentFormat=PI_JSON`

Voor stap 3 zijn de volgende opties ook handig afhankelijk van het type data dat wordt opgevraagd:

- `showAttributes=true` (bij opvragen locations). Hierdoor geeft de webservice naast alle standaard metadata zoals locatie naam en x-coördinaten ook extra metadata terug die afhankelijk is van elke locatie.
- `omitMissing=true` (bij opvragen timeseries). Hierdoor geeft de webservice alleen daadwerkelijke waarden terug en laat de missende tijdstappen achterwege
- `forecastSearchCount=9999` (bij opvragen timeseries). Het aantal verwachtingen (in dit geval scenario's en historische runs) dat de webservice teruggeeft binnen de gekozen periode. Zet het getal hoog om alle verwachtingen terug te krijgen.