



Watersysteemanalyses met D-Hydro

Deelrapport TKI-3: pilot Waterschap Hunze en Aa's



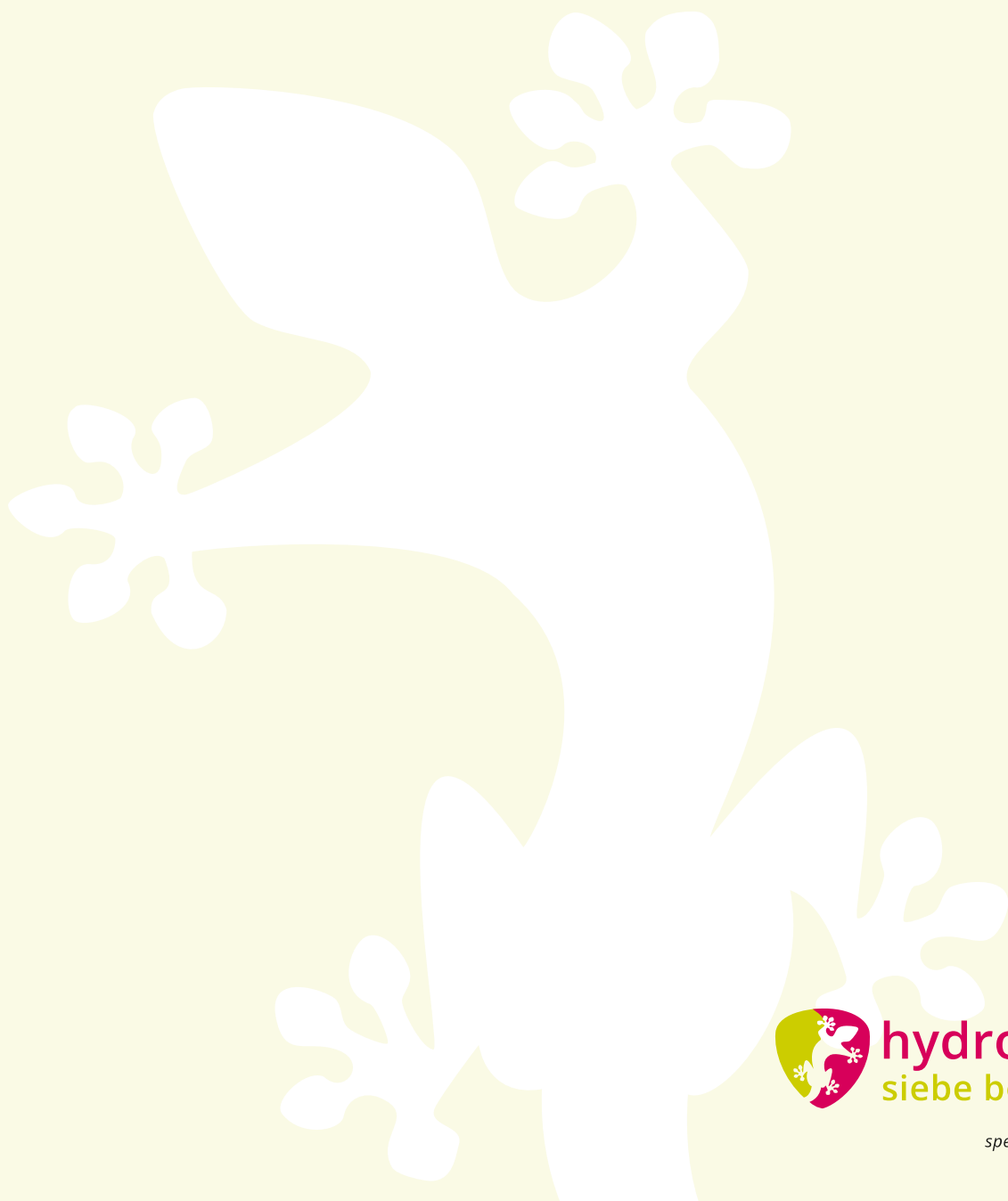
hydroconsult
siebe bosch

specialists in water management

Watersysteemanalyses met D-Hydro

Deelrapport TKI-3: pilot Waterschap Hunze en Aa's

Versie: 1.0
Status: definitief
Datum: 17 december 2021



hydroconsult
siebe bosch

specialists in water management

Inhoud

Inhoud	3
1. Inleiding en kaders	4
1.1. Inleiding	4
1.2. Projectkaders.....	5
1.3. Oplossingsrichting	6
1.4. Beknopte gebiedsbeschrijving.....	7
2. Werkzaamheden	9
2.1. Configureren en aanpassen modelbouwsript 1D.....	9
2.2. Inbedden en aanpassen modelbouwsript RTC.....	10
2.3. Optimaliseren van de 1D-modelschematisatie	11
2.4. Bouwen en inbedden RR-schematisatie.....	12
2.5. Bugs identificeren, terugkoppelen en oplossen.....	13
2.6. RR koppelen aan FM en RTC	15
2.7. Optimaliseren van de finale modelschematisatie.....	18
3. Producten en resultaten.....	19
3.1. Modelbouwsript	19
3.2. Modelschematisatie	19
3.3. Uitkomsten van de modeltests	20
Nulbui	20
Maatgevende afvoer	23
3.4. Niet-stationaire neerslaggebeurtenis	25
4. Conclusies en aanbevelingen	30
4.1. D-Hydro	30
4.2. D-HyDAMO	33
5. Bronnen.....	34

1. Inleiding en kaders

1.1. Inleiding

Het kennisinstituut Deltares is de architect van een nieuwe software-suite voor het simuleren van oppervlaktewater. Dit instrument, genaamd D-Hydro⁴, wordt in nauwe samenwerking met waterschappen en ingenieursbureaus doorontwikkeld. Veel van deze ontwikkelingen vinden plaats in de zogeheten TKI: Topconsortia voor Kennis en Innovatie¹.

In het TKI-project DEL-115 'Watersysteemanalyses met D-HYDRO'², hierna te noemen TKI-3, worden functionaliteiten en componenten gemaakt en ontsloten binnen de D-HYDRO Suite om integrale gebiedsstudies mogelijk te maken.

Adviesbureaus en waterschappen nemen het voortouw om de benodigde innovatieve modeltechnieken binnen de D-HYDRO Suite toepasbaar te maken voor het regionale waterbeheer. Hydroconsult neemt deel aan dit TKI-3 en voert ten behoeve daarvan een pilot uit voor het stroomgebied De Dellen van waterschap Hunze en Aa's.

De hier beschreven pilot draagt bij aan de volgende onderdelen van dit TKI:

- Toevoegen van nog ontbrekende 1D functionaliteiten binnen het hydrodynamische rekenhart van D-Flow FM voor toepassingen binnen het regionale waterbeheer.
- Het automatische genereren van modellen uit basisdata inclusief datavalidatie. Hierbij wordt aangesloten op de methoden en (hydrologische) datamodelstandaarden zoals DAMO/HYDAMO, en ontwikkelingen bij het Nationaal Hydrologische Instrumentarium (NHI).
- Ervaring opdoen met de nieuwe modeltechnieken aan de hand van een aantal pilots voor en met de drie deelnemende waterschappen.
- De softwareontwikkeling van D-Hydro door tijdens het ontwikkelproces kennis en ervaring in te brengen (o.a. in werksessies) m.b.t. werkwijzen, importeer- en validatiescripts en modelstudies.

De ontwikkelde en geoptimaliseerde rekenkernfuncties en scripts worden via de grafische user-interface (GUI) van D-HYDRO door Deltares voor de eindgebruiker toegankelijk gemaakt.

Het resultaat is de General Availability Release (GA) van de D-HYDRO Suite, waarin de in dit project ontwikkelde modelcomponenten en scripts in een voor de eindgebruiker voldoende toegankelijke GUI ontsloten zijn.

1.2. Projectkaders

Als kader werken wij met de scripts, programma's en modelschematisaties die werden ontwikkeld in eerdere TKI-projecten en in eerdere fasen van dit TKI-3:

- De diverse bètaversies en GA-release van D-Hydro zoal door Deltares in de loop van dit TKI vervaardigd en aangeleverd (versies 0.9.3, 0.9.5, 0.9.7, 0.9.9 en 1.0.0)
- Het Delft3dfmpy-script van Deltares wat het fundament vormt voor alle verdere modelbouwscripsts: <https://github.com/openearth/delft3dfmpy>
- Het D-HyDAMO-modelbouwscripsts zoals door HKV-lijn-in-water opgeleverd binnen TKI1.
- Het binnen TKI3 door D2Hydro doorontwikkelde D-HyDAMO-modelbouwscripsts plus diens nieuwe module Hydrotools.
- Het op Real Time Control toegesneden modelbouwscripsts zoals door RHDHV beschikbaar gesteld als resultaat uit TKI2.
- Werkende voorbeeld-modelschematisaties in D-Hydro met diverse configuraties van de RR, FM- en RTC-modules zoals verstrekt door Deltares.

Het kader vanuit Waterschap Hunze en Aa's:

- Opdracht: het geautomatiseerd vervaardigen van een integrale (RR + 1D + RTC) modelschematisatie in D-Hydro van het stroomgebied De Dellen.
- Inspanningsverplichting: de wens voor een zo generiek mogelijk modelbouwscripsts waarmee dergelijke modelschematisaties kunnen worden vervaardigd voor willekeurige stroomgebieden binnen het beheergebied.
- Brongegevens: alle relevante brongegevens het stroomgebied De Dellen, afkomstig uit het beheerregister van het waterschap. Deze waren niet in het HyDAMO-bestandsformaat.
- Uitkomsten: het gegenereerde model moet geschikt zijn voor hoogwaterstudies en reguliere watersysteemanalyses.

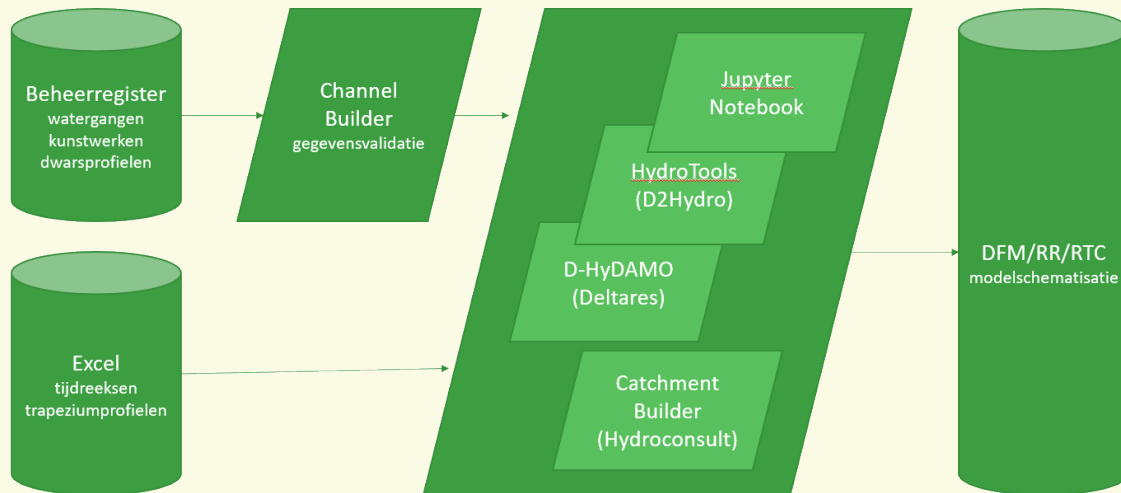
Het kader vanuit Hydroconsult zelf:

- Gebruikmaken van bestaande functionaliteiten van de software Channel Builder om contextuele gegevensvalidatie uit te voeren op de brongegevens en correcties te kunnen bewerkstelligen.
- Gebruikmaken van bestaande functionaliteiten van de software Catchment Builder om de complete neerslag-afvoerschematisatie te vervaardigen.
- Doorontwikkelen van Sobek Utilities om ook uitvoerbestanden van D-Hydro te kunnen verwerken.

Tenslotte omvat het kader vanuit Deltares het verwerven van kennis en ervaringen van Hydroconsult in de dagelijks toepassing van D-Hydro en het verwerken van deze terugkoppelingen in de software-architectuur. Daartoe functioneert Deltares ook als een doorlopend beschikbare helpdesk.

1.3. Oplossingsrichting

Onderstaand diagram toont de uiteindelijk geïmplementeerde werkwijze.



Uit het beheerregister halen we de voor het projectgebied relevante brongegevens. Deze worden door het waterschap geëxporteerd naar shapefiles. Zaken als trapeziumprofielen (voor watergangen waarvoor geen ingemeten profiel beschikbaar is) en ook tijdreeksen slaan we op in een Excel-document.

Het bestaande programma Channel Builder (Hydroconsult) wordt gebruikt om de brongegevens te valideren en waar nodig te corrigeren. De modelbouwscripsts lezen de brongegevens en het Excel-document uit en verwerken dit tot een werkende modelschematisatie in D-Hydro.

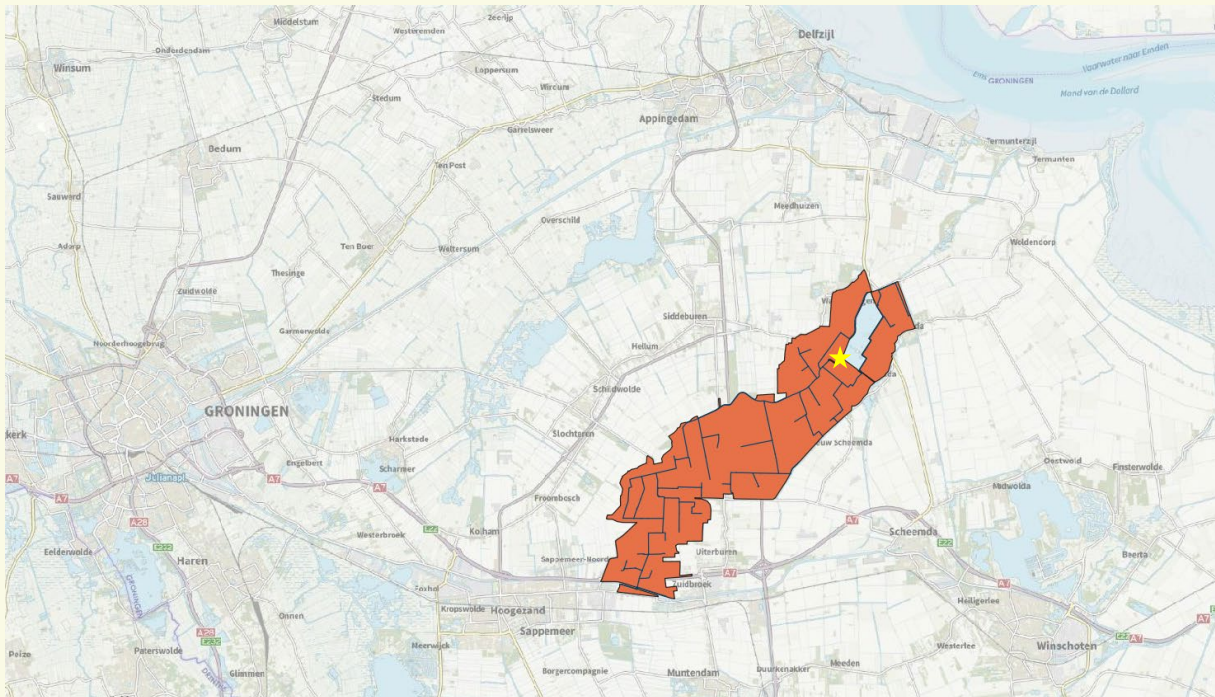
De bouw van de 1D FM- en -RTC componenten wordt uitgevoerd door een drietal modelbouwscripsts: In een *Jupyter Notebook* configureren we de bronbestanden, gegevensvelden en eventuele individuele uitzonderingen. Het Jupyter Notebook roept functies aan uit het python-script *HydroTools* (D2Hydro) en functies uit het *Delft3Dfmpy*-script (HKV en Deltares).

De bouw van de RR-component voeren we uit met het bestaande programma Catchment Builder (Hydroconsult). De RR-component wordt tenslotte handmatig samengevoegd met de FM-RTC-componenten.

1.4. Beknopte gebiedsbeschrijving

Het stroomgebied De Dellen ligt in de provincie Groningen, binnen het beheergebied van Waterschap Hunze en Aa's. Het gebied meet ca. 38.35 km² en ligt globaal rechtsonder in de driehoek Groningen – Delfzijl – Winschoten.

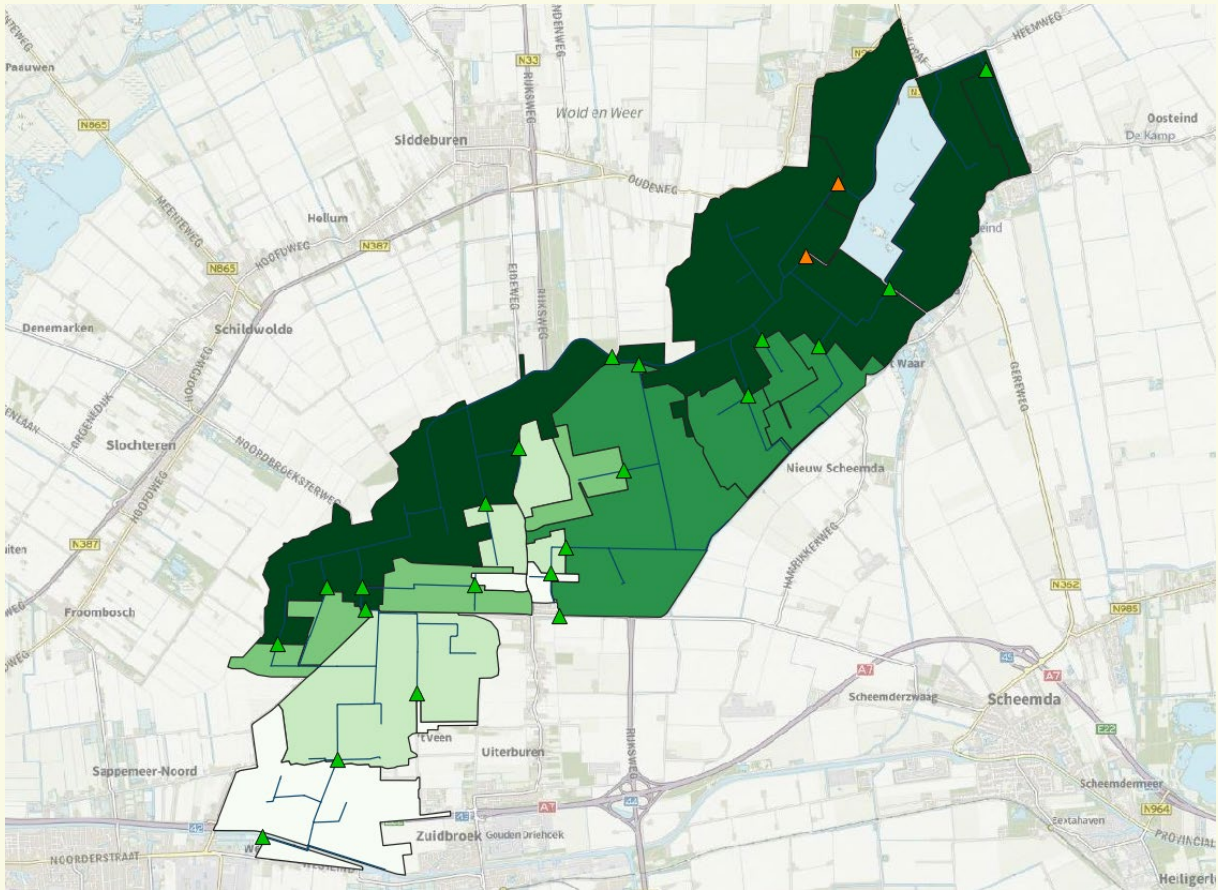
Het gebied wordt bemalen door gemaal De Dellen, een gemaal met twee vijzels en een totale capaciteit van 320 m³/min. Het gemaal loost het waterbezuur op het Hondhalstermeer, wat zich in de noordoostpunt van het gebied bevindt en wat via het Termunterzijldiep op de Dollard afwatert.



Figuur 1 Grootte en ligging van stroomgebied De Dellen, met de belangrijkste watergangen ingetekend. De ligging van het gemaal is met een gele ster ingetekend.

Aan de zuidkant wordt het gebied begrensd door het Winschoterdiep. Een klein gebied ten zuiden daarvan staat via een sifon in verbinding met het stroomgebied. De noordpunt bevat een kleine onderbemaling.

Opvallend zijn de grote verschillen in streefwaterstand. Bij het gemaal wordt een peil van -3.60/-3.30 (winterpeil/zomerpeil) gehandhaafd. Helemaal bovenstrooms aan de zuidzijde een peil van resp. -1.45/0.95. Om deze peilen te kunnen handhaven is het gebied voorzien van een aantal stuwen. Onderstaande figuur toont de peilgebieden en de ligging van de belangrijkste kunstwerken.



Figuur 2 Peilgebieden en alle gemalen (oranje) en stuwen (groen) ingetekend. Donkergekleurde peilgebieden hebben een lager streefpeil dan lichtgekleurde.

2. Werkzaamheden

We onderscheiden de volgende werkzaamheden:

- Configureren en aanpassen modelbouwsript 1D
- Inbedden en aanpassen modelbouwsript RTC
- Optimaliseren van de 1D-modelschematisatie
- Bouwen en inbedden RR-schematisatie
- Bugs identificeren, terugkoppelen en oplossen
- Optimaliseren van de finale modelschematisatie

2.1. Configureren en aanpassen modelbouwsript 1D

Zoals in het kader gesteld maken wij gebruik van het modelbouwsript D-Hydamo zoals (door)ontwikkeld in diverse eerdere TKI's en in de pilot van Noorderzijlvest van het onderhavige TKI. Dit script configureren we om het aan te laten sluiten op de brongegevens van het stroomgebied De Dellen, zoals aangeleverd door Waterschap Hunze en Aa's.

Het betreft de volgende zaken:

- Het overnemen van het modelbouwsript van D2Dhydo wat ten behoeve van de pilot Noorderzijlvest werd ontwikkeld: https://github.com/d2hydro/nzv_pilot
- Het aanmaken van een pagina op Github voor het modelbouwsript van De Dellen: https://github.com/SiebeBosch/hena_pilot en hier een kopie van het hierboven genoemde D-Hydamo-script plaatsen.
- Brongegevens geschikt maken:
 - Watergangen van multipart naar single part shapes converteren
 - Brongegevens bijsnijden langs de randen van het projectgebied
- Paden naar de brongegevens instellen:
 - Modelgebied
 - Peilgebieden
 - Waterlopen
 - Dwarsprofielpunten
 - Bruggen
 - Duikers
 - Sifons
 - Stuwen
 - Inlaten
 - Gemalen
- Data-mapping:
 - Coderingen voor de vorm van duikers vertalen naar hun HyDAMO-equivalent
 - Coderingen voor de ruwheid van watergangen vertalen naar hun HyDAMO-equivalent
 - Selectie categorie gegevenspunten YZ-dwarsprofielen
- Aanmaken van laterale instroompunten t.b.v. het aankoppelen van de RR-schematisatie
- Instellen maximum *snapping distance* voor kunstwerken naar hun watergang;

- Ieder kunstwerk associëren met de onderhavige streefwaterstanden. Dit gebeurt handmatig in het script;
- Een selectieveld introduceren voor watergangen die wel of niet moeten worden opgenomen in de modelschematisatie;
- De vorige generatie kunstwerksturing uit het script verwijderen ten behoeve van de hierna te bespreken RTC-module;
- Een globale initiële waterdiepte instellen;
- Het opstellen van een Excel-document met de randvoorwaarden voor de modelschematisatie;
- Het aanroepen van dit document vanuit het modelbouwsript;

2.2. Inbedden en aanpassen modelbouwsript RTC

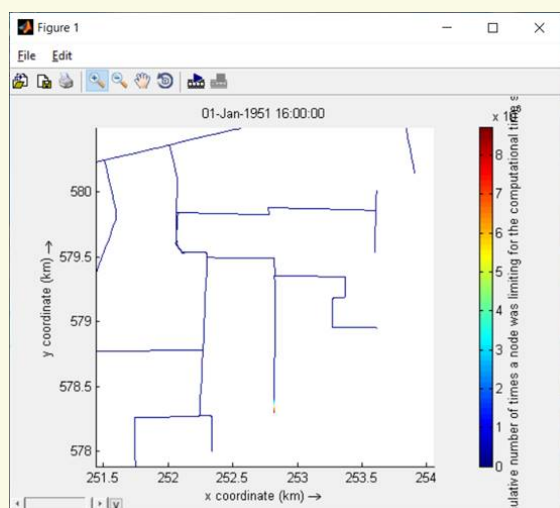
Door RHDHV werd in TKI2 een modelbouwsript ontwikkeld. Hierin is met name de RTC (Real Time Control) component uitgewerkt. Dit script actualiseren we om het te laten aansluiten bij de meest recente versie van Delft3dfmpy. Vervolgens configureren we het voor het pilotgebied De Dellen.

- Actualiseren van alle XML-validatieschema's om ze aan te sluiten op de meest recente *namespaces* die Deltares beheert.
- Het configureren van zgn. '*observation points*' ten behoeve van de aansturing van kunstwerken.
- Het corrigeren van de ligging van die *observation points* waar deze een negatieve afstand op de tak toegewezen krijgen.
- In het script vastleggen welke stuwen een interval-controller moeten krijgen.
- Zie aanbevelingen.
- Identificeren en vastleggen van gemalen die een intervalcontroller moeten krijgen. Dit noodzakelijk voor alle gemalen waarbij zomerstreefpeil verschilt van winterstreefpeil;
- Zie aanbevelingen.
- Een Excel-document aanmaken met per pomp en stuw een tijdreeks met daarin de zomer- en winterstreefpeilen.
- Dit document oproepen vanuit het script.
- Oude uitkomsten van het script verwijderen voordat de nieuwe worden geschreven.
- Mapping van waarden uit het beheerregister naar hun equivalent van het type sturing in overeenstemming met HyDAMO (vast, regelbaar, automatisch, regelbaar niet automatisch etc.)
- Een tijdelijke oplossing geïmplementeerd voor het ontbreken van de parameter 'hoogstedoorstroomhoogte' in het HyDAMO datamodel zoals geïmplementeerd in delft3dfmpy. De waarde nu standaard op 1 m boven laagstedoorstroomhoogte gezet. Zie aanbevelingen.
- Bug opgelost in het RTC-script. Als einddatum werd ten onrechte de startdatum aangeroepen.
- Bug opgelost in het RTC-script. Voor gemalen werd de verkeerde parameter naam weggeschreven naar de RTCDataConfig.xml: Setpoint (s) veranderd in Capacity (p). Idem in DIMR_Config.xml.
- Versienummer van D-Hydro bijgewerkt t.b.v. het genereren van de batchfile.

In de RTC-component moet in het bestand `rtcRuntimeConfig.xml` de start- en einddatum van de simulatie worden opgegeven. Dit is niet doelmatig omdat dezelfde start- en einddatum ook al in de Dellen.mdu-file (FM) moet worden opgegeven. Wisselen van simulatieperiode vergt nu dus een aanpassing in twee verschillende bestanden. Ons advies is om één start- en einddatum voor alle modules mogelijk te maken in het overkoepelende bestand `dimr_config.xml`.

2.3. Optimaliseren van de 1D-modelschematisatie

De eerste versie van het model rekende bijzonder traag. Op ons verzoek heeft Geert Prinsen namens Deltares het probleem onderzocht en geïdentificeerd dat er droogval ontstond op tak OAF-O-00899.



Figuur 3 Quickplot van de numeriek knellende locatie in het model (bron: Deltares).

- In de `.mdu`-file de output `Wrimap_flow_analysis` aanzetten:

```
Wrimap_flow_analysis = 1 # Write flow analysis parameters to the map file  
(1:yes, 0:no).
```

- In de `.xyz` file komen de coördinaten van de numeriek kritische lokaties, Het betreft locaties waar het rekenhart de rekestijdstap heeft moeten reduceren; iets wat doorgaans resulteert in een sterk oplopende rekestijd.
- Deze uitvoer ook te zien met de uitvoer van de `map.nc` uitvoerfile, variabele 'Number of times a node was limiting for the computational time step' (oftwel de `numlimdt`)

Het probleem werd opgelost door het dwarsprofiel op de betreffende tak te verdiepen en zo het rekensegment numeriek een groter volume te geven.

2.4. Bouwen en inbedden RR-schematisatie

Omdat de neerslag-afvoermodule van D-Hydro nauwelijks verschilt van die van SOBEK kiezen wij voor de volledig geautomatiseerde bouw met het bestaande programma Catchment Builder.

Om het gegenereerde model te kunnen koppelen aan het 1D-model in D-Hydro breiden we Catchment Builder uit met de volgende extra output:

- DIMR_Config.xml. Hierin is de koppeling tussen RR en FM vastgelegd.
- Boundaryconditions.bc. Dit bestand bevat alle locaties waar water tussen de RR en FM-modules wordt uitgewisseld.

2.5. Bugs identificeren, terugkoppelen en oplossen

Gedurende de bouw van het 1D-model komen diverse bugs naar boven, die we consequent terugkoppelen met Deltares en die inmiddels alle zijn opgelost.

Door de brongegevens eerst via Channel Builder te valideren, deze aan te vullen en te corrigeren wordt een verscheidenheid aan hiaten en onvolkomenheden in de brongegevens opgelost. De resterende bugs en hun oplossing benoemen we hieronder.

Tabel 1 Bugs, geïdentificeerd en opgelost in D-Hydro en het modelbouwsript in de loop van het project.

Fout	Oorzaak	Oplossing
ValueError: Section length must be larger than 0.0	Bronbestand bevat vijf takken met een lengte van 0 m.	De ongeldige takken verwijderen uit het bronbestand.
ValueError: No cross sections on channel(s); cannot start calculation.	Geen ingemeten profielen beschikbaar voor 50 modeltakken.	Introductie van leggerprofielen. NB. Dit is een tussenoplossing. Voor onze visie: zie de aanbevelingen.
Trapeziumprofielen van 0 tot 100 m NAP met bodemhoogte op NaN en dit zonder foutmelding.	Bij ontbreken van een trapeziumprofiel wordt een standaardprofiel gemaakt	Validatie van de brongegevens met Channel Builder waarbij de optie 'autocorrect critical errors' is aangevinkt.
'Lekkage' van water het model in	Inlaatkunstwerk ligt niet op de watergang.	Inlaatkunstwerk in de brongegevens goedgelegd.
Script kan randvoorwaarden in XLSX niet uitlezen	Script gebruikt de verouderde library xlrd	Na onderzoek vervangen door library openpyxl.
GIS importer D-Hydro ontbeert de mogelijkheid om een ID-veld te specificeren Oorzaak: architectuur D-Hydro.	Broncode D-Hydro	Als alternatief de bestanden via Delft3dfmpy importeren. NB. Zie de aanbevelingen voor een definitieve oplossing.
Model kan niet worden geïmporteerd	Verkeerde datumnotatie in DIMR_config.xml. In de string <creationDate>2021-06-18T13:18:57Z</creationDate> ontbraken T en Z.	In eerste aanleg zelf opgelost in de broncode in een eigen lokale 'fork/aftakking' van delft3dfmpy. Uiteindelijk door HKV definitief opgelost.
ValueError: Model 1D faalt op inialisatie. Foutmelding: SharpMap.Layers.VectorLayer.OnRender - Error during rendering: Overflow error.	Broncode D-Hydro	Door Deltares opgelost in een nieuwe release
Onvolledige terugkoppeling bij duikers met diameter 0	Alleen een melding wanneer gedraaid met run.bat (achter de schermen). En dan alleen een melding in de console en in de .dia file	Nog op te lossen door Deltares. Zie aanbevelingen.
Aanslagpeil gemaal op -999	Ligging gemaal niet binnen het projectgebied	Shapefile projectgebied iets aangepast

'importing model data failed' bij importeren randvoorwaarden	Boundaries.bc. Datumformaat niet goed geschreven door Delft3dfmpy. Het uur ontbrak: unit = minutes since 2000-01-01:00:00 moest zijn: unit = minutes since 2000-01-01 00:00:00	In eerste aanleg zelf opgelost in de broncode in een eigen <i>fork</i> van delft3dfmpy. Uiteindelijk door HKV definitief opgelost.
Brug blokkeert afvoer onder -2.10 m NAP	Brug neemt gemiddelde bodemhoogte van boven- en benedenstrooms dwarsprofiel. Benedenstrooms profiel was fout.	Profiel benedenstroomse zijde aangepast in bronbestand.
Error during parsing: <dimrConfig xmlns='http://schemas.deltares.nl/dimrConfig'> was not expected	Aanroep verouderde namespace xml-schema	: <dimrConfig xmlns="http://schemas.deltares.nl/dimr" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:schemaLocation="http://schemas.deltares.nl/dimr http://content.oss.deltares.nl/schemas/dimr-1.2.xsd">
Model kan niet worden geïmporteerd	Verkeerde datumnotatie in DIMR_config.xml. In de string <creationDate>2021-06-18T13:18:57Z</creationDate> ontbraken T en Z	Als eerste zelf opgelost in de broncode in een eigen ' <i>fork</i> ' van delft3dfmpy. Uiteindelijk door HKV definitief opgelost.
Error while trying to import a DIMR Configuration File (XML). Negative Chainage is not possible	Negatieve afstand op tak in observation-points.ini.	Voorlopig opgelost door per individueel punt de ligging op de tak vastgelegd in het script. Zie de aanbevelingen voor een definitieve oplossing.
Object reference not set to an instance of an object	De Coupler flowfm_to_rtc was leeg. Omdat in dit stadium alleen nog time controllers waren gedefinieerd.	Betere foutmeldingen vanuit D-Hydro
Execution of integrated model has failed	Verouderd versienummer structure.ini	Oplossing 1: in de structure.ini het versienummer op te hogen naar 3.00 Oplossing 2: In de XML was een flowfm_to_rtc coupler genoemd die verder werd is gedefinieerd.

2.6. RR koppelen aan FM en RTC

Zoals in de inleiding al gezegd vervaardigen we de RR-schematisatie met het bestaande programma Catchment Builder (Hydroconsult). De reden hiervoor is dat D-Hydro op het gebied van RR slechts een beperkte doorontwikkeling biedt ten opzichte van SOBEK. Implementatie van RR in D-Hydro vraagt wel een paar aanvullingen op de reguliere bestanden:

- D-Hydro verlangt een lijst met laterale instroompunten voor de FM-module die match met de uitstroompunten van het RR-model. Deze instroompunten worden vastgelegd in het bestand `dellen_new.ext` (ext staat voor external forcings). Een record ziet er als volgt uit:

```
[Lateral]
id=ucAKKERBOUW_TUINBOUWKLEIGPG-O-17800
name=branchId=OAF-O-00956
chainage=3
discharge=realtime
```

- `DIMR_Config.xml` moet onder `<control>` `<parallel>` worden uitgebreid met een `<startGroup>` die op zijn beurt twee couplers aanroept:

```
<startGroup>
<time>0 3600 1386000</time>
<coupler name="flow_to_rr" />
<start name="Rainfall Runoff" />
<coupler name="rr_to_flow" />
</startGroup>
```

- `DIMR_Config.xml` moet een component "Rainfall Runoff" krijgen:

```
<component name="Rainfall Runoff">
<library>rr_dll</library>
<workingDir>rr</workingDir>
<inputFile>Sobek_3b.fnm</inputFile>
</component>
```

- `DIMR_Config.xml` moet een coupler krijgen voor de stroming van water uit RR naar FM:

```
<coupler name="rr_to_flow">
<sourceComponent>Rainfall Runoff</sourceComponent>
<targetComponent>FlowFM</targetComponent>
<item>
sourceName>catchments/knoopID/water_discharge</sourceName>
<targetName>laterals/knoopID/water_discharge</targetName>
</item>
</coupler>
<logger>
<workingDir>.</workingDir>
```



```
<outputFile>rr_to_flow.nc</outputFile>
</logger>
```

- DIMR_Config.xml krijgt ook een coupler voor de retourstroom van water uit FM naar RR:

```
<coupler name="flow_to_rr">
  <sourceComponent>FlowFM</sourceComponent>
  <targetComponent>Rainfall Runoff</targetComponent>
  <item>
    <sourceName>laterals/knoopID/water_level</sourceName>
    <targetName>catchments/knoopID/water_level</targetName>
  </item>
</coupler>
<logger>
  <workingDir>.</workingDir>
  <outputFile>flow_to_rr.nc</outputFile>
</logger>
```

- De RR-component moet een extra bestand krijgen: BoundaryConditions.bc. Hierin wordt voor iedere RR-on-Flow-connection vastgelegd wat de vigerende waterhoogte als functie van de tijd (of constante) is.

```
[Boundary]
name          = ucGRASLANDZANDGPG-O-17660
function      = constant
quantity      = water_level
unit          = m
0
```

- De map met de RR-schematisatie moet alle bestanden bevatten die normaalgesproken in SOBEK in SOBEK\Fixed\3b zouden staan. En ook een DELFT_3D.INI bevatten en de benodigde meteo-bestanden (.bui, .evp, .qsc etc.). Idem voor SOBEK_3B.LNG, pluvius.dwa, 3b_rout.3b en 3bRunoff.tp.
- Sobek_3b.fnm is een speciaal geval. In dit bestand worden alle paden naar de RR-bestanden vastgelegd. Hier is het van belang dat hier een verwijzing staat naar het bestand met boundary conditions voor RR:

```
'BoundaryConditions.bc' *122. RR Boundary conditions file for SOBEK3
```

In de RR-component moet in het bestand DELFT_3B.INI de start- en einddatum van de simulatie worden opgegeven. Dit is niet doelmatig omdat dezelfde start- en einddatum ook al in de Dellen.mdu-file (FM) en in rtcToolsConfig.xml (RTC) moet worden opgegeven. Wisselen van simulatieperiode vergt nu dus een aanpassing in drie verschillende bestanden. Zoals ook vermeld in paragraaf 2.2 is ons advies om één start- en einddatum voor alle modules mogelijk te maken in het overkoepelende bestand dimr_config.xml.



specialists in water management

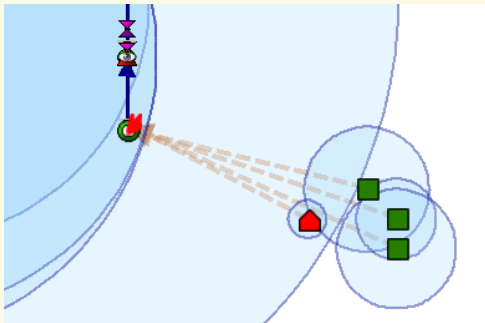
2.7. Optimaliseren van de finale modelschematisatie

Door de aanwijzingen van Geert Prinsen zoals beschreven in paragraaf 3.5 op te volgen, optimaliseren we het finale model.

Uit het bestand `dellen_numlimdt.xyz` blijkt dat de rekentijdstap op acht locaties werd geknepen:

251353.320099998	576355.418299999	2
252066.886200000	579841.778200001	89022
251744.413300000	577507.618500002	103010
257739.477000002	582755.529900000	16
260317.104200002	587013.440699998	8
258080.953900140	584320.392094728	1534
256718.967000000	580346.588300001	1
252821.809700001	578295.935800001	3686701

Eén locatie springt er duidelijk uit, met 3.5 miljoen tijdstapreducties. Dit betreft de meest bovenstrooms gelegen locatie van tak OAF-O-00899.



Figuur 4 numeriek knellende locatie in het model.

Het dwarsprofiel ligt hier op -0.25 m + NAP terwijl de stuw direct benedenstrooms een kruinhoogte van -0.45 m + NAP kent. Het is evident dat op deze tak droogval plaatsvindt. We lossen het probleem op door dwarsprofiel 20030207-1 te verdiepen tot -0.75 m + NAP.

De oplossing geeft een spectaculaire verbetering van de rekensnelheid. De simulatie met niet-stationaire neerslag (192 uur) rekt na het verdiepen van het dwarsprofiel binnen twee minuten door. Voorafgaand aan de optimalisatie was het meer dan een uur.

3. Producten en resultaten

De uitkomsten van deze pilot omvatten:

- Het modelbouwsript voor de geautomatiseerde bouw van de modelschematisatie De Dellen
- De modelschematisatie van het pilotgebied De Dellen
- De uitkomsten van modeltests
- De uitkomsten van een niet-stationaire neerslaggebeurtenis

3.1. Modelbouwsript

Het complete modelbouwsript incl. bronbestanden is gepubliceerd op Github:

https://github.com/SiebeBosch/hena_pilot

Deze pagina bevat ook een handleiding voor installatie en gebruik van het script. Het waterschap gaat dit script nog testen.

3.2. Modelschematisatie

Van de modelschematisatie hebben wij de volgende versies vervaardigd:

- FM (1D) + RTC, te vinden op https://www.dropbox.com/s/3jifxwucvsgp091/dellen_fm_rtc.zip?dl=0
- RR + FM + RTC, te vinden op https://www.dropbox.com/s/5rqcl5q0ar18zhv/dellen_rr_fm_rtc_T1.zip?dl=0

Deze modelschematisaties moeten worden gedraaid vanuit de DIMR. Dit is de *Command Line Interface* van D-Hydro, die kan worden aangestuurd vanuit een batch-file. Een voorbeeld-batchfile is te vinden direct binnen het project: *run.bat*. Let op: binnen deze batchfile wordt verwezen naar *run_dimr.bat* die bij de installatie van D-Hydro wordt meegeleverd. Het pad verschilt dus per versienummer van D-Hydro. Controleer daarom of het pad naar *run_dimr.bat* juist is.

```
1 @ echo off
2 set OMP_NUM_THREADS=2
3 call "c:\Program Files\Deltares\D-HYDRO Suite 1D2D (1.0.0.53506)\plugins\DeltaShell.Dimr\kernels\x64\dimr\scripts\run_dimr.bat"
4 pause
5
```

Figuur 5 Het bestand *run.bat* verwijst naar *run_dimr.bat*. Controleer of de padverwijzing juist is voor uw eigen installatie van D-Hydro.

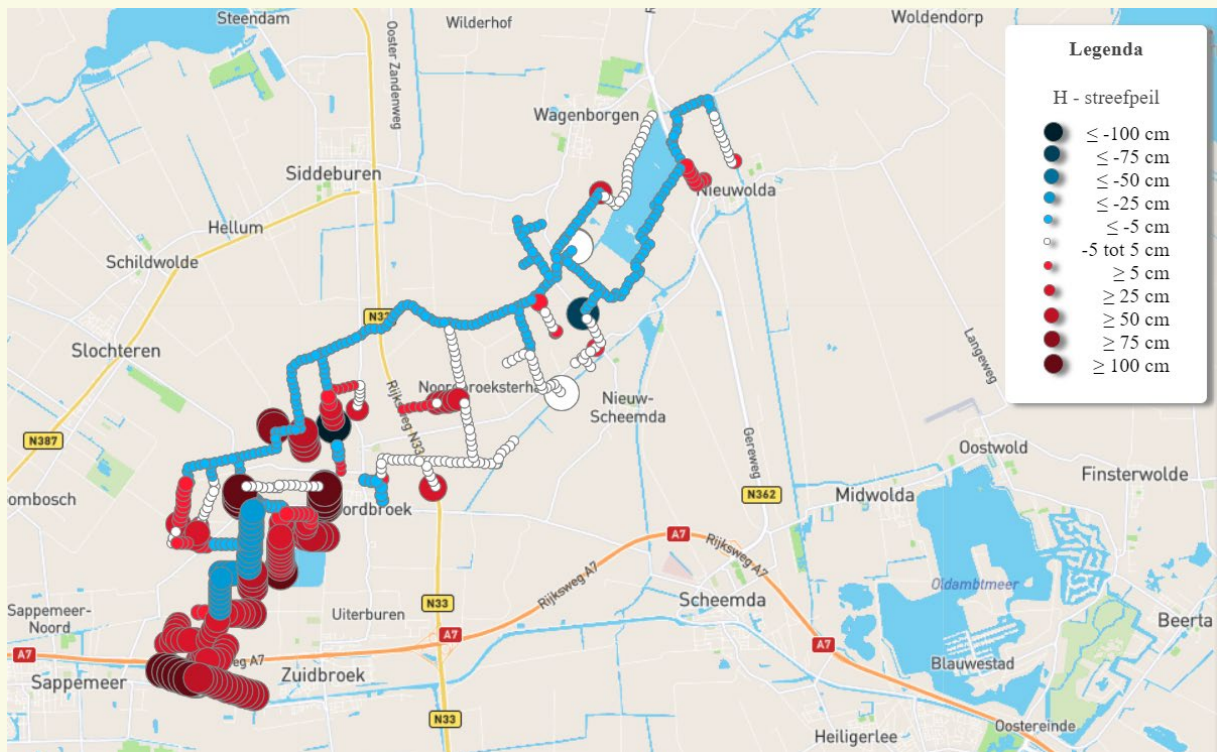
Vanuit de GUI kan de modelschematisatie vooralsnog niet worden doorgerekend. Wel is het mogelijk om de modelschematisatie inclusief rekenresultaten in de GUI in te laden nadat die is doorgerekend. Dit is als issue verwezen naar Deltares.

3.3. Uitkomsten van de modeltests

Nulbui

Om te testen of het peil-in-rust zoals door het model gesimuleerd overeenkomt met de streefwaterstanden voeren we een standaard-modeltest uit (Zie Good Modelling Practice³). Dit betreft een simulatie zonder neerslag met de modules FM (1D Flow) en RTC.

D-Hydro zelf bevat momenteel nog geen adequate tools om het simulatieresultaat goed te kunnen vergelijken met de onderhavige streefwaterstanden. Daarom voegen wij aan het programma SOBEK Utilities ondersteuning voor D-Hydro toe. Dit programma genereert een webviewer die voor ieder rekenpunt het verschil tussen gesimuleerde waterstand en streefpeil in kleur en grootte op de kaart toont.

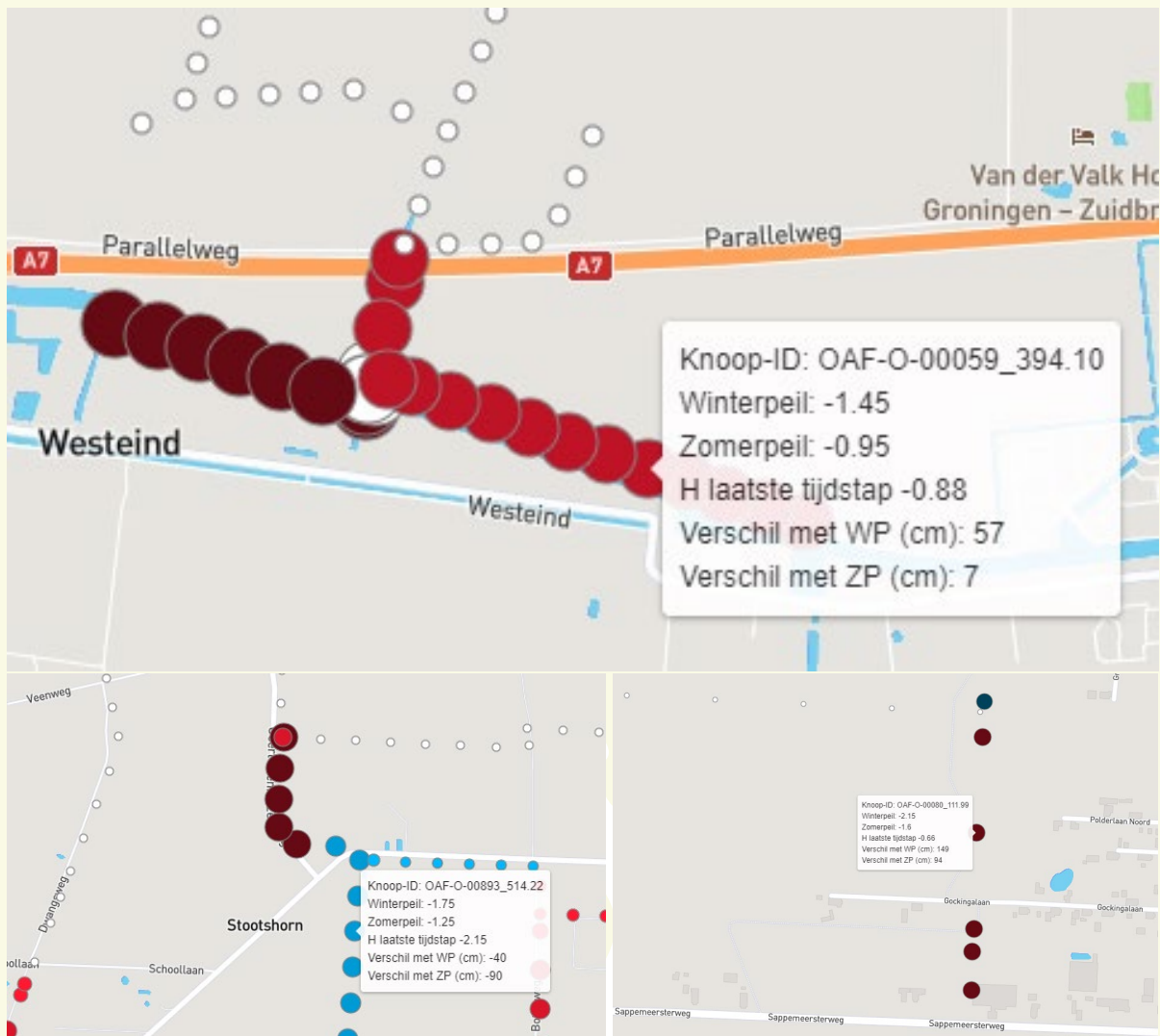


Figuur 6 De uitkomst van de nulbui met het FM-RTC-model.

Er is nog een aantal takken waar het peil-in-rust sterk afwijkt van de streefwaterstand, met name in het bovenstroomse gedeelte. Dit heeft de volgende oorzaken:

- De bodem van veel watergangen ligt hoger dan streefwaterstand, met name aan bovenstroomse zijde van het stroomgebied. Mogelijk is de streefwaterstand in deze takken niet relevant vanwege het bodemverhang in de watergangen. Dit wordt door het waterschap nog gecontroleerd.
- Kunstwerken die duidelijk boven streefpeil liggen. Dit wordt door het waterschap nog gecontroleerd.

Onderstaand lichten we een aantal van de geconstateerde afwijkingen toe.



Figuur 7 Afwijkingen t.o.v. streefpeil bij de nulbui, op drie gekozen locaties.

- Ten zuiden van de Parallelweg:

Hier heeft duiker KDU-O-00549 een BOB van -0.88, wat flink hoger is dan het winterstreefpeil van -1.45 m + NAP. De automatische gegevensvalidatie van Channel Builder heeft deze afwijking wel geconstateerd maar niet gecorrigeerd omdat niet met zekerheid gezegd kan worden dat de waarde fout is.

- Bij Stootshorn:

Hier een forse onderschrijding t.o.v. streefpeil. Er is op deze locatie sprake van een onderleider die niet peilscheidend is en de twee peilgebieden met resp. streefpeil -1.75 en -3.45 rechtstreeks verbindt. Duiker KDU-O-01421 heeft een BOB die fors lager ligt dan het bovenstroomse streefpeil en werkt dus niet peilscheidend. Dit wordt door het waterschap nog gecontroleerd.

- Bij de Gockingalaan:

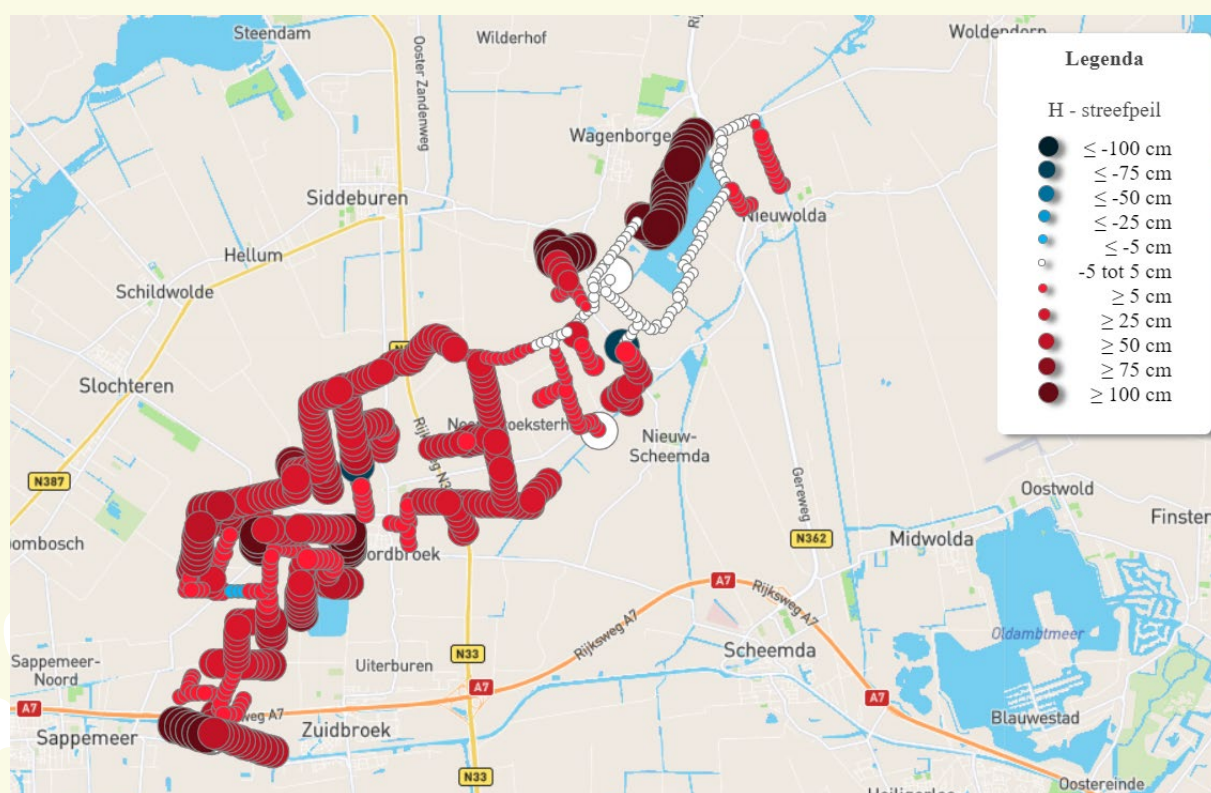
Hier is ligt de bodem van de watergang fors hoger dan streefpeil: op ca. -0.7 m + NAP.

Er zijn ook locaties waar het modelbouwsript trapeziumprofielen (legger) heeft toegepast terwijl het ruimtelijk interpoleren van yz-profielen (ingemeten) hier wenselijk was geweest. Dit heeft echter geen consequenties voor de uitkomsten van de nulbui.

Maatgevende afvoer

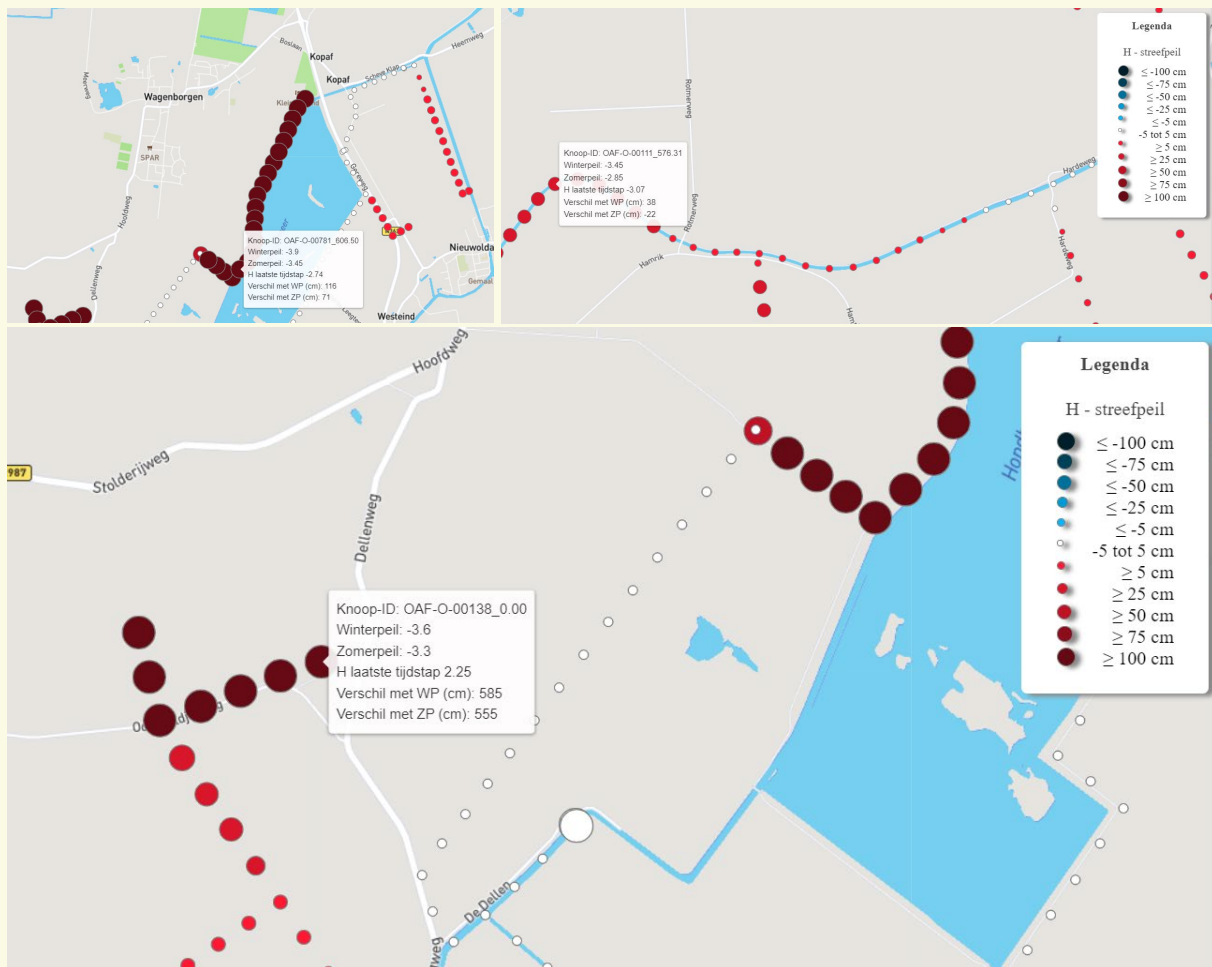
Om te testen of alle watergangen ook daadwerkelijk met het lozingspunt in verbinding staan en of er geen onrealistisch groot verval over kunstwerken of verhang over watergangen plaatsvindt voeren we ook een modeltest uit met maatgevende afvoer. Als volume voor maatgevend hanteren we een stationaire netto neerslag van 12 mm/d.

Ook deze modeluitkomsten bewerken we na met SOBEK Utilities.



Figuur 8 Verschil met streefwaterstand onder maatgevende afvoer.

Uit de verschillen in de directe omgeving van het gemaal is duidelijk af te lezen dat het gemaal het aangeboden volume van 12 mm/d aankan. Verder naar bovenstrooms zien we sprongsgewijs flinke toenames in het verschil tussen streefpeil en waterhoogte. We lichten enkele relevante locaties onderstaand toe.



Figuur 9 Afwijkingen t.o.v. streefpeil bij maatgevende afvoer (12 mm/d), op drie gekozen locaties.

- Wagenborgen

Ten oosten van Wagenborgen bevindt zich een watergang waarin het peil eeuwigdurend stijgt. Dit is een indicatie dat de onderbemaling daar het aangeboden stationaire volume van 12 mm/d niet kan verwerken. Een nadere analyse van de pompcapaciteit (13 m³/min) en oppervlak achterland (1822828 m²) bevestigt dit: de capaciteit van het gemaal bedraagt (10.27 mm/d). Dit wordt door het waterschap nog nagevraagd bij de verantwoordelijke persoon.

- Rotmerweg

Nabij de kruising met de Rotmerweg maakt het verschil tussen waterhoogte en streefpeil ineens een sprong van 9 cm naar 38 cm. Nadere analyse wijst uit dat zich hier stuw KST-O-17750 bevindt. Deze stuw heeft een kruinbreedte van 5 m. Desondanks ontstaat een overstortende straal van ca. 40 cm. Een snelle analyse wijst uit dat dit een realistische waarde is gegeven de 2.25 m³/s die over de stuw stroomt.

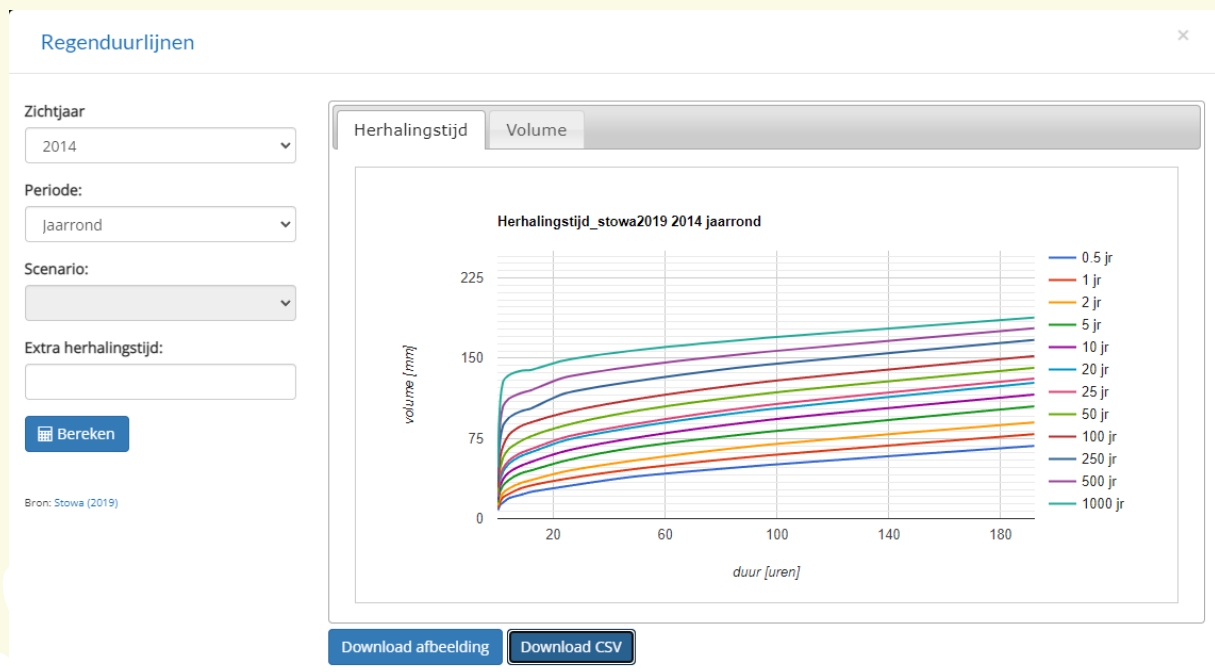
- Dellenweg

Direct ten westen van de Dellenweg ontstaan overschrijdingen ten opzichte van streefpeil met meer dan 2 meter. De oorzaak blijkt te liggen in het feit dat het gehele oppervlak van het onderhavige peilgebied bovenstrooms van duiker KDU-O-01182 op de watergang wordt gezet. Dit is onterecht en een rechtstreeks gevolg van een te grove schematisatie van het landelijk gebied. De RR-schematisatie had hier uit kleinere eenheden moeten worden opgebouwd.

3.4. Niet-stationaire neerslaggebeurtenis

De laatste test betreft een niet-stationaire neerslaggebeurtenis die aan de modelschematisatie wordt opgedrukt. We kiezen een gebeurtenis die het gebied wel flink belast, maar die toch zo regelmatig voorkomt dat het watersysteem hem goed moet kunnen verwerken: een gebeurtenis met herhalingstijd van ca. eens per jaar.

De gebeurtenis ontwerpen we op basis van de regenduurlijnen zoals te vinden op Meteobase ⁵.



Figuur 10 De regenduurlijnen-app op Meteobase.

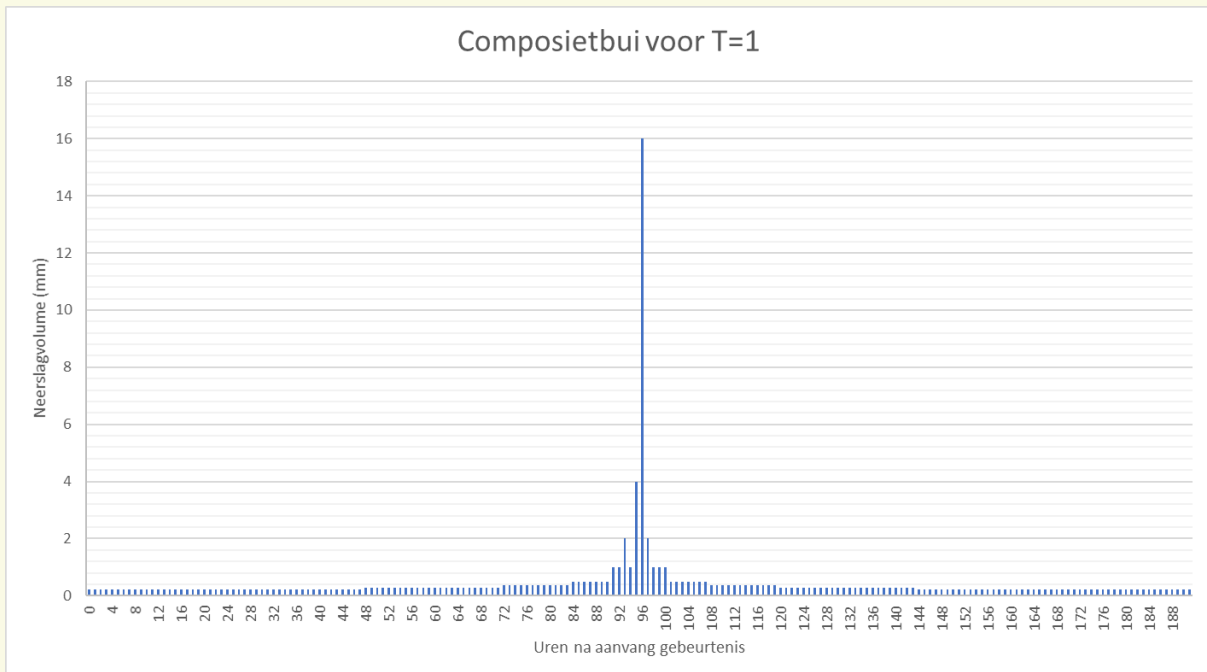
We vragen de neerslagvolumes op die horen bij een herhalingstijd van eens per jaar. De waarden zijn:

Tabel 2 Neerslagvolume behorende bij een herhalingstijd van eens per jaar, voor verschillende uren

Duur (uren)	Volume (mm)
1	16
2	20
4	23
8	28
12	31
24	37
48	46

96	59
192	79

Op basis van deze getallen stellen we een zgn. composietbui⁷ op: een neerslaggebeurtenis waarvan de terugkeertijd voor iedere inliggende duur 1 jaar betreft:



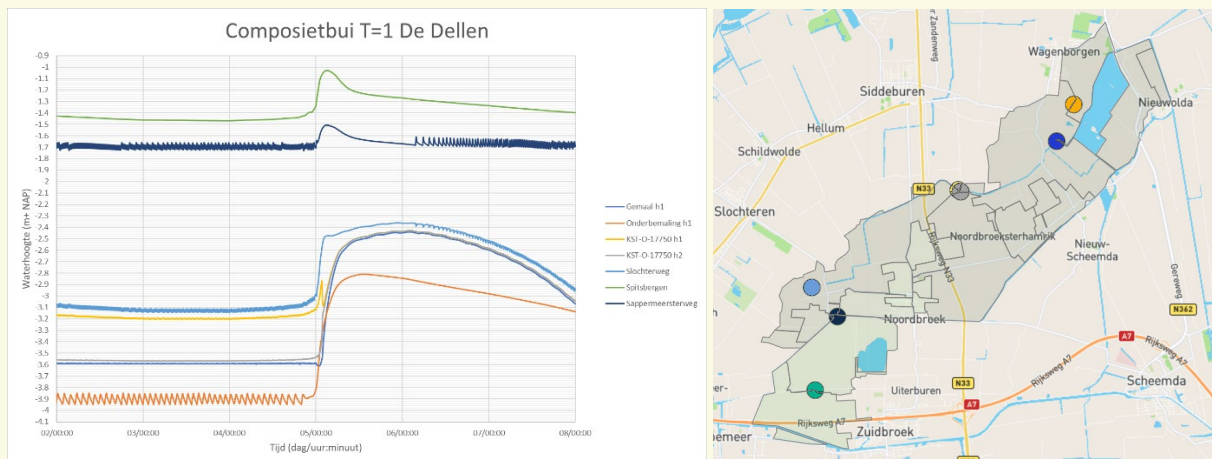
Figuur 11 composietbui met een herhalingsduur van 1 jaar voor alle inliggende uren, klimaat 2014.

We beoordelen de uitkomsten van deze neerslaggebeurtenis op basis van twee aspecten:

- Vindt er een geloofwaardige peilstijging plaats, gevolgd door een daling
- Komt het uitstroomvolume van de RR-module overeen met het instromend volume van FM

Het verloop van de waterhoogte beoordelen we op enkele relevante locaties in het watersysteem:

- Bovenstroomse zijde van het gemaal
- Bovenstroomse zijde van de onderbemaling
- Bovenstroomse zijde stuw KST-O-17750
- Benedenstroomse zijde stuw KST-O-17750
- Slochterweg
- Spitsbergen
- Sappermeersterweg



Figuur 12 Gesimuleerde waterhoogtes bij de niet-stationaire simulatie met neerslagvolume $T=1$. De onderscheiden kleuren in de grafiek komen overeen met die van de bijbehorende locaties op de kaart.

Uit de simulatie blijkt dat het gemaal het aangeboden volume water nog niet geheel heeft afgevoerd aan het einde van de gebeurtenis. Dit is logisch verklaarbaar gegeven het totale neerslagvolume van 79 mm. Uitgaande van een afvoercapaciteit van 13 mm/d zou het gemaal er ca. 6 dagen over mogen doen om het aangeboden volume af te voeren. Nu bedraagt de duur van de bui 8 dagen maar het overgrote deel van het volume valt pas in het midden van de gebeurtenis.

Het verloop van de waterhoogtes ziet er alleszins geloofwaardig uit. Bij een $T=1$ -neerslaggebeurtenis is een flinke peilstijging van meer dan een meter zeker te verwachten in dit gebied. Dat de bovenstrooms gelegen, vrij afstromende, gebieden een geringere stijging laten zien ligt ook voor de hand omdat de stuwen geen maximumcapaciteit kennen, in tegenstelling tot gemalen.

Dan het uitwisselvolume tussen RR en FM. Om te controleren of het uitstromend debiet van RR overeenkomt met het instromend debiet van FM, analyseren we de volgende resultaatbestanden:

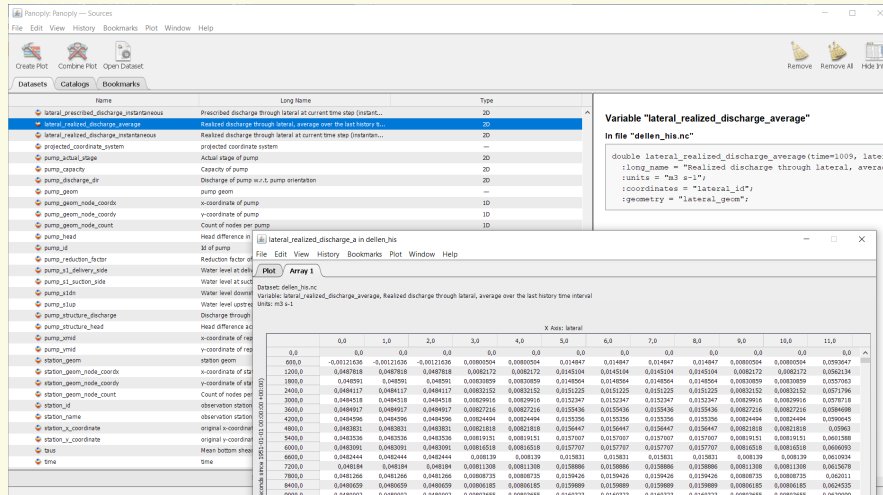
- `bndflodt.his`, met daarin de parameter *Flow* [m^3/s] bevat het uitstromend debiet vanuit RR naar zijn boundaries als verloop in de tijd
- `dellen_his.nc`, met daarin de parameter *Realized discharge through lateral, average over the last history time interval (lateral_realized_discharge_average)*. bevat het debiet wat via laterale instromingen het FM-model binnenkomt.
- `rr_to_flow.nc`, met daarin de parameter *Rainfall Runoff -> Flow1D* dit bestand bevat het volume water wat werd uitgewisseld tussen RR en FM.

Voor het uitlezen van `bndflodt.his` is het programma `ODSVIEW.exe` (van SOBEK) beschikbaar. Dit gebruiken we om het uitstroomdebiet voor alle 143 objecten en 1009 tijdstappen weg te schrijven naar Excel. Als we de debieten (m^3/s) optellen en vermenigvuldigen met 600 (tijdstapgrootte in seconden) verkrijgen we het totaal uitgestroomde volume uit RR. Dit betreft 2.48 miljoen m^3 .

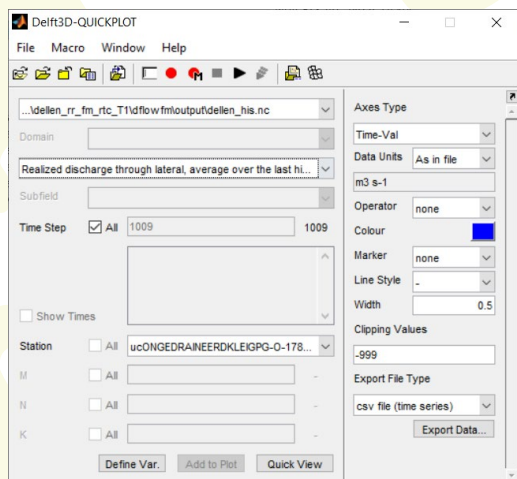
Als we dezelfde exercitie doen op de laterale instroom in FM, zouden we op hetzelfde getal moeten uitkomen. Het uitlezen van `dellen_his.nc` voor een nadere analyse is echter verre van eenvoudig. We bewandelen vier paden:

1. Gebruik maken van het programma Panoply⁶ van NASA

Het exporteren van data met Panoply blijkt bijzonder bewerkelijk. De enige manier waarop wij de data goed in Excel kregen was d.m.v. een copy/paste naar Notepad++, het vervangen van komma's door punten en daarna copy/paste naar Excel, gevolgd door *Tekst naar kolommen*. Daarbij komt dat iedere tijdreeks achteraf weer geassocieerd moet worden met het bijbehorende object-ID, wat foutgevoelig is.



Figuur 13 Panoply is niet gebruiksvriendelijk wanneer het gebruikt wordt om resultaten uit D-Hydro te exporteren.

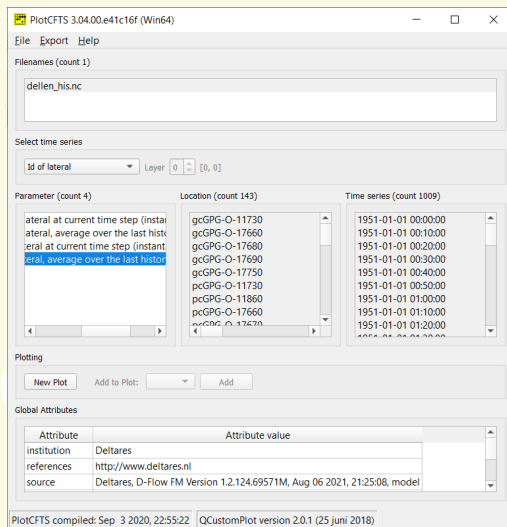


Figuur 14 Quickplot is een zwaar programma en biedt niet de mogelijkheid om voor meerdere locaties tegelijk resultaten te exporteren.

3. Een eigen routine schrijven en deze toevoegen aan SOBEK Utilities

De zelfgeschreven routine functioneert naar behoren. Het programma exporteert voor alle tijdstappen en locaties het laterale debiet naar een Excel-document. Wanneer we de

waarden optellen en met 600 (tijdstapgrootte) vermenigvuldigen, constateren we dat er 21.6 miljoen m³ het FM-model instroomt via lateralen. Omdat dit een factor 10 verschilt van de uitstroom uit RR, nemen we het zekere voor het onzekere en analyseren we *dellen_his.nc* met een vierde optie:



Figuur 15 PlotCFTS is lichtgewicht, intuïtief en kan de gewenste data exporteren.

De uitkomsten van PlotCFTS komen overeen met die van de zelfgeschreven routine. Hiermee ligt vast dat volgens *dellen_his.nc* bijna tien keer zoveel water het FM-netwerk instroomt via lateralen dan het RR-netwerk uitstroomt.

We hebben dit issue bij Deltares neergelegd ter analyse en het blijkt inderdaad een bug te zijn. Onder de betreffende parameter naam wordt niet de juiste reeks met gegevens weggeschreven naar het .nc-bestand. De bug ligt momenteel bij Deltares om opgelost te worden. Voor de simulatieresultaten heeft hij geen gevolgen. Het totale instromende debiet komt wel degelijk overeen met het uitstromende debiet uit RR. Dit is te verifiëren aan de hand van een andere parameter in *dellen_his.nc*: "*water_balance_laterals_in*". Wanneer we deze volumes optellen komen we wel op 2.48 miljoen m³.

In D-Hydro is het op dit moment moeilijk om een waterbalans op te stellen. Het programma ontbeert tools waarmee snel componenten van de waterbalans kunnen worden uitgelezen voor alle modelobjecten. De mogelijkheid om de waterbalans te kunnen controleren is voor een hydroloog cruciaal. Daarom adviseren wij om het programma PlotCFTS op te nemen als een standaardcomponent in D-Hydro.

4. Conclusies en aanbevelingen

We maken hier onderscheid tussen conclusies en aanbevelingen aangaande D-Hydro als softwarepakket en D-HyDAMO als modelbouwschrift. Per onderdeel presenteren we ze puntsgewijs.

4.1. D-Hydro

- Lijst met openstaande issues

D-Hydro werd door Deltares doorontwikkeld in de loop van dit TKI-3. Diverse bugs die bij uitvoering van de pilot werden gevonden zijn opgelost en de GUI is sterk verbeterd. Er staat echter nog een uitgebreide lijst van gebruikerswensen uit bij Deltares. Deze lijst is in de loop van dit TKI opgesteld door alle TKI-partners en Deltares heeft toegezegd dat de punten in de tweede GA-release van december 2021 zullen zijn opgelost.

- Droogvalbestendig

De D-Hydro modelschematisatie blijkt veel beter tegen droogvallende watergangen te kunnen dan zijn voorloper SOBEK. Wel resulteert droogval in sterk oplopende rekentijd. Deltares verschafte ons gedurende de pilot een handreiking om zulke issues effectief aan te pakken, wat resulteerde in een enorme verbetering van de rekensnelheid.

- Configureren simulatieperiode

In een gekoppeld model (RR + FM + RTC) moet op dit moment op drie verschillende locaties de start- en einddatum van de simulatie worden opgegeven. Dit is niet doelmatig en foutgevoelig en wij adviseren daarom om in het overkoepelende bestand `dimr_config.xml` een mogelijkheid aan te bieden om op één locatie voor modules deze periodes op te geven.

- Hydrologische analysetools

Zoals onder de conclusies al genoemd voorzien we een essentiële meerwaarde in het toevoegen van hydrologische analysetools in D-Hydro. Hierbij denken we aan:

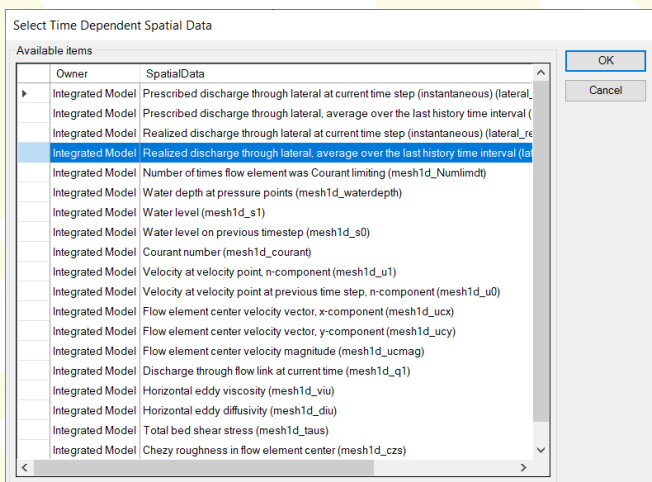
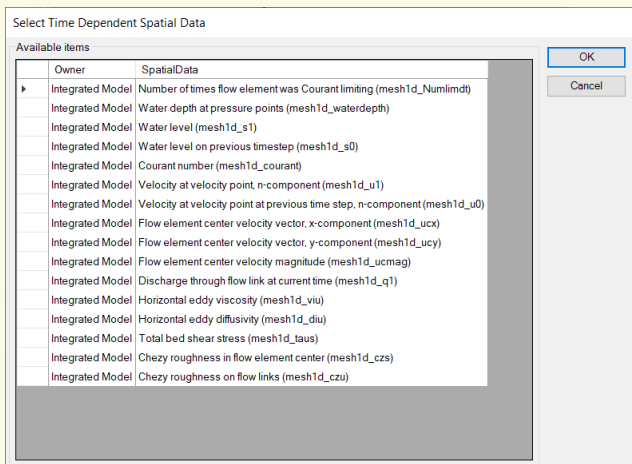
- een snelle viewer voor modelresultaten à la ODS_VIEW uit SOBEK
- het kunnen controleren van de uitgewisselde volumes tussen RR en FM
- middels een ruimtelijke selectie waterbalansen kunnen opstellen voor deelselecties van de modelschematisatie. Het is nu wel mogelijk in de GUI om een waterbalans op te vragen; echter niet voor een ruimtelijke selectie;
- het tonen van verschilkaarten van bijvoorbeeld waterhoogtes t.o.v. streefpeil
- het tonen van resultaten met labels op de kaart
- al het bovenstaande ook prima gefaciliteerd vanuit de GUI.

In algemene zin dus de tools die in de afgelopen decennia rond het SOBEK-instrumentarium zijn ontwikkeld. Met name een tool om eenvoudig simulatieresultaten voor meerdere

locaties en tijdstappen te kunnen exporteren ontbreekt nu. We zijn positief over het programma PlotCFTS van Jan Mooiman (Deltares) en adviseren daarom om dit programma standaard op te nemen in D-Hydro.

- RTC-configuratie kunstwerken

Een verbeterpunt aan de grafische gebruiksomgeving van D-Hydro is dat de modelleur niet rechtstreeks vanuit een kunstwerk bij de onderhavige RTC-sturingsregels kan. Hij/zij moet het ID van het betreffende object onthouden en deze in de lijst met *Control Groups* opzoeken om de bijbehorende sturingsregels te kunnen opzoeken en/of aanpassen. Aanbeveling is daarom om onder het snelmenu (rechtermuisknop) achter het kunstwerk ook een koppeling naar de onderhavige regeling toe te voegen.



Onze eindconclusie is evenwel dat een watersysteemanalyse en hoogwatertoetsing is in principe mogelijk is met de huidige versie van D-Hydro; in ieder geval voor hellend gebied met een vergelijkbare grootte als De Dellen.

4.2. D-HyDAMO

Het D-HyDAMO-modelbouwsript is binnen deze pilot met succes doorontwikkeld, zodanig dat een werkend model met hydraulische component en Real Time Control werd gerealiseerd in D-Hydro versie 1.0.0.53506. Voor de neerslag-afvoercomponent hebben we gebruik gemaakt van het bestaande programma Catchment Builder en in de pre- en postprocessing zijn ook Channel Builder en Sobek Utilities ingezet ter ondersteuning.

- Routenummering

Voor wat betreft het D-Hydamo modelbouwsript bevelen wij aan om dit door te ontwikkelen met een mogelijkheid om dwarsprofielen te interpoleren tussen takken. D-Hydro heeft deze mogelijkheid al, echter wordt die nog niet benut door het script. Idealiter wordt deze functionaliteit vormgegeven door aan iedere watergang in het beheerregister een zgn. 'routennummer' toe te kennen. Dit routennummer kan dan eenvoudig door D-Hydamo of andere tools worden doorgezet naar het D-Hydro model.

- Gegevensvalidatie en -correctie

Het proces van gegevensvalidatie en -correctie is dusdanig complex dat een voldoende doorontwikkelde implementatie daarvan in D-Hydamo op korte termijn niet te verwachten is. Bovendien zijn er twee alternatieven in de vorm van: 1) Channel Builder (Hydroconsult) en 2) de in ontwikkeling zijnde Validatietoolbox (Het Waterschapshuis). De aanbeveling is om vooralsnog gebruik te maken van de alternatieven die voorhanden zijn.

- ID's van objecten expliciet in het script

Een groot nadeel van het huidige script is dat er op talloze plaatsen ID's van objecten voorkomen. Het gaat dan bijvoorbeeld over het specificeren van kunstwerken die een interval-controller moeten krijgen, of om *observation points* waarvan de ligging moet worden gecorrigeerd zodat ze niet op een negatieve taklengte komen te liggen. ID's van objecten waarvoor uitzonderingen gelden zouden in een apart document moeten worden gespecificeerd. Zo kan het script generiek en herbruikbaar worden gemaakt.

- Data in een extern Excel-document

Het huidige script vereist een Excel-bestand met voor iedere stuw en gemaal de bijbehorende streefpeilen. Dit alles is niet bevorderlijk voor de herbruikbaarheid van het script voor andere gebieden. Het script zou zelf de streefpeilen voor kunstwerken moeten kunnen opvragen uit de brongegevens.

5. Bronnen

- ¹. Rijksdienst Voor Ondernemend Nederland (RVO), 2021, TKI Deltatechnologie, <https://tkideltatechnologie.nl/>
- ². Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), 2021, TKI del115-11204929 Watersysteemanalyses met D-Hydro, <https://tkideltatechnologie.nl/project/del115-11204929-watersysteemanalyses-met-d-hydro/>
- ³. STOWA (1999), Handboek Good Modelling Practice, vloeiend modelleren in het waterbeheer. <https://www.stowa.nl/publicaties/handboek-good-modelling-practice-vloeiend-modelleren-het-waterbeheer>
- ⁴. Deltares (2021), D-Hydro Suite, <https://www.deltares.nl/nl/software/d-hydro-suite/>
- ⁵. Het Waterschapshuis, 2021, Meteobase: het online archief voor historische neerslag en verdampingsgegevens van Nederland, <https://www.meteobase.nl>
- ⁶. NASA/GISS, 2021, Panoply, version 4.12.11, <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>
- ⁷. Willems, 2013, Waterloopmodellering: algemene methodologie voor numerieke modellering van waterlopen, ISBN: 9033492962, 9789033492969