



Inzetbaarheid van bestaande hydrologische modellen voor waterkwantiteit

Deze Deltafact geeft een overzicht van de binnen Nederland beschikbare hydrologische modellen die gebruikt worden voor waterkwantiteitsvraagstukken. Deze Deltafact omschrijft welke vragen daarmee beantwoord kunnen worden, en welke gegevens je dan nodig hebt.

1. INLEIDING	1
2. GERELATEERD ONDERWERPEN EN DELTAFACTS	3
3. STRATEGIE	3
4. SCHEMATISCHE WEERGAVE	4
5. WERKING	5
6. KOSTEN EN BATEN	15
7. RANDVOORWAARDEN	17
8. GOVERNANCE	17
9. PRAKTIJKERVERINGEN EN LOPENDE INITIATIEVEN	18
10. KENNISLEEMTES	21
11. BRONNEN EN LINKS	22
12. COLOFON	26

1. Inleiding

Binnen Nederland zijn diverse hydrologische modellen gebouwd die gebruikt kunnen voor diverse waterbeheervraagstukken. Vaak is zo'n hydrologisch model (oorspronkelijk) voor een specifiek doeleinde gemaakt. In deze Deltafact wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste beschikbare hydrologische modellen, welke

vragen ermee beantwoord kunnen worden en welke data daar dan voor nodig zijn. Deze Deltafact beperkt zich tot kwantitatieve hydrologische modellen; hydrologische *waterkwaliteitsmodellen* (o.a. PCLake, KRW-Verkenner), neerslag-afvoermodellen en hydraulische modellen (b.v. op 3Di, D-Hydro FM / Delft3D of Tygron gebaseerde hydraulische modellen en NBW-modellen) vallen buiten de scope van deze Deltafact. Voor zoetzout grondwatermodellen wordt aanbevolen een aparte Deltafact op te stellen.

Een hydrologisch model is een wiskundige voorstelling of simulatietool die wordt gebruikt om de beweging en verdeling van water binnen verschillende componenten van de hydrologische cyclus van de aarde te repliceren en te voorspellen. Deze cyclus omvat processen zoals neerslag, verdamping, infiltratie, afvoer, onttrekkingen, grondwaterstroming en stroomafwaartse stroming. Hydrologische modellen integreren informatie over de fysieke kenmerken van het landschap, waaronder topografie, bodemeigenschappen, landgebruik, onttrekkingen en meteogegevens, om het gedrag van water na te bootsen.

Deze modellen helpen onderzoekers, hydrologen en waterbeheerders te begrijpen en te voorspellen hoe water zich door het landschap beweegt, hoe het wordt opgeslagen in verschillende reservoirs zoals bodem, grondwater en oppervlaktewaterlichamen, en hoe het bijdraagt aan stroomafwaartse stroming en andere watergerelateerde fenomenen. Hydrologische modellen kunnen eenvoudige conceptuele modellen of complexe numerieke simulaties zijn, en ze spelen een cruciale rol bij het bestuderen van waterbeschikbaarheid, het beheren van waterbronnen, het voorspellen van overstromingen, milieueffectbeoordelingen en andere toepassingen met betrekking tot hydrologie.

Leeswijzer

In de volgende paragraaf worden enkele gerelateerde onderwerpen en Deltafacts weergegeven. Paragraaf '3. Strategie' beschrijft beknopt welke rollen hydrologische modellen voor de diverse overheden in Nederland hebben. In paragraaf '5. Werking' wordt voor de belangrijkste hydrologische modellen de eigenschappen, toepasbaarheid en benodigde data beschreven, o.a. aan de hand van een categorisering zoals beschreven in paragraaf 4. Schematische weergave.

2. Gerelateerd onderwerpen en deltafacts

Enkele gerelateerde onderwerpen zijn:

[Berekening](#), Besluitvorming bij watertekorten, [Bodemdaling](#), Dagelijks Waterbeheer, [Deltascenario's](#), Droogte, [Dynamisch peilbeheer](#), Hoogwater, Informatie bij Calamiteiten, Klimaatverandering, Overstromingen, Peilbeheer, [Regelbare drainage](#), [Regenwaterlenzen](#), [Remote Sensing](#), [Verdamping](#), Verzilting, [Water vasthouden en bergen](#), Waterbeheer, Wateroverlast, Waterverdeling, Zeespiegelstijging, [Zoetwatervoorziening](#), [Zoutindringing](#).

3. Strategie

Hydrologische modellen spelen een centrale rol in het duurzame beheer van zoetwatervoorraden, de landelijke en regionale zoetwaterverdeling, het voorspellen van (effecten van) wateroverlast en droogte, bodemdaling, verzilting, maar in de ruimtelijke ordening ook bij het begrijpen van de effecten van geplande stedelijke en landelijke ontwikkelingen op de waterhuishouding en het voorkomen van problemen zoals watertekorten of wateroverlast.

Modellen voor operationeel waterbeheer

Concreet worden hydrologische modellen voor waterkwantiteit ingezet bij landelijke waterverdelingsvraagstukken, b.v. door de Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling LCW, waarbij bij dreigende watertekorten het 'Landelijk Draaiboek Waterverdeling en Droogte' wordt gevolgd bij het prioriteren van schaars water. Externe invloeden op het waterbeheer veranderen, hetgeen geadresseerd wordt binnen diverse opgaven en programma's, zie Figuur 1. Regionale overheden (waterschappen, waterleidingmaatschappijen) zetten hydrologische modellen ook in voor het dagelijkse operationele waterbeheer.

Modellen voor strategisch waterbeheer

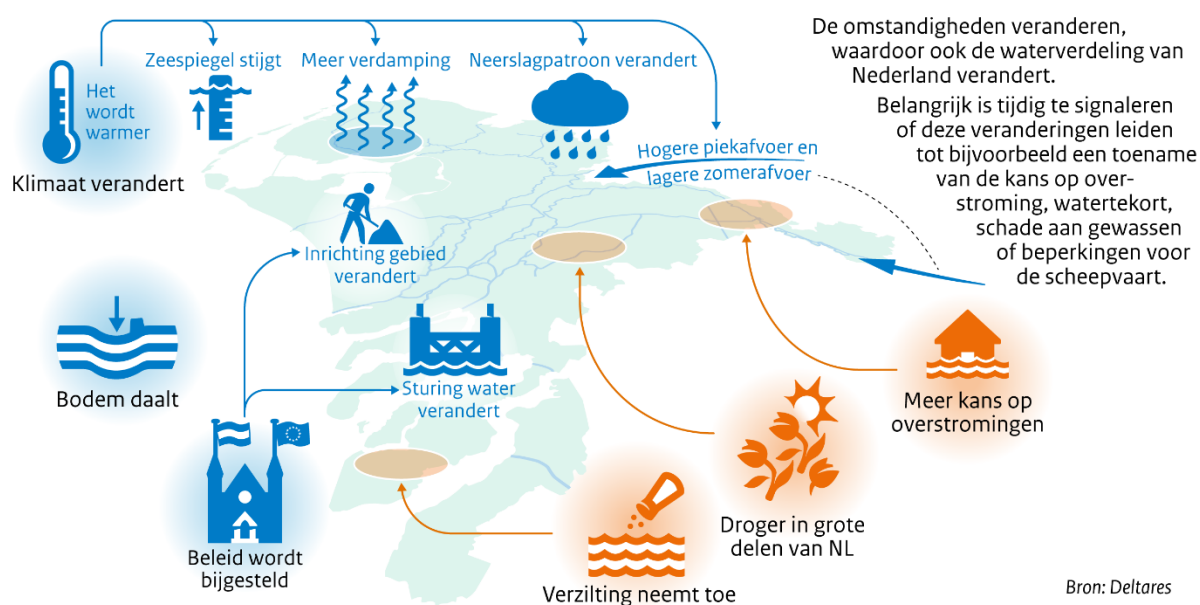
Voor lange termijn beleidsstudies wordt vanuit het Deltaprogramma o.a. het [Nationaal Water Model Zoetwater](#) (NWM Zoetwater) ingezet, gericht op een robuuste zoetwatervoorziening via het hoofdwatersysteem middels de strategie Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem (KZH). Ook regionale overheden zetten hun hydrologische modellen in voor beleidsstudies in het kader van klimaatverandering, het realiseren van KRW-doelstellingen, het Nationaal Programma Landelijk Gebied (NPLG), Water en Bodem Sturend

(waterschappen, provincies), Landelijke Stresstest Beleidstafel Wateroverlast en Hoogwater.

Op gemeentelijk niveau worden lokale hydrologische modellen voor waterkwantiteit o.a. ingezet als de hydrologische impact van geplande werkzaamheden (b.v. uitbreidingsplannen van nieuwbouwwijken) b.v. in het kader van een uit te voeren MER moet worden bepaald.

Startpunt voor andere modellen

Hydrologische modellen voor waterkwantiteit zijn het startpunt voor diverse andere modellen. Zo levert het LHM de basis voor het landelijke zoetzout-model [LHM-zoetzout](#), en levert het LHM ook de invoer voor het [Landelijk Waterkwaliteitsmodel](#) (LWKM, met ANIMO, MT3Dms en de KRW verkennen).



Figuur 1 Externe invloeden op het waterbeheer veranderen, hetgeen geadresseerd wordt binnen diverse opgaven en programma's.

4. Schematische weergave

Beschikbare hydrologische modellen kunnen op diverse manieren worden gecategoriseerd. Daarbij heeft elke indeling voor- en nadelen. Binnen deze Deltafact wordt de volgende categorisatie gehanteerd; deze sluit zoveel mogelijk aan bij de recente [KLIMAP](#)-inventarisatie:

1. Type:
 - Simulatiesoftware
 - Model (=simulatiesoftware + inputdata voor specifiek geografisch gebied)
 - Effectmodule
2. Domein:
 - Gewas
 - Water in de onverzadigde zone
 - Water in de verzadigde zone (grondwater)
 - Oppervlaktewater
3. Ruimtelijke resolutie
4. Ruimtelijke toepassingschaal (landelijke, regionaal, lokaal)
5. Temporele simulatieschaal
6. Uitkomsten:
 - Oppervlaktewaterpeilen
 - Grondwaterstanden
 - Waterbalansen
 - Waterverdeling
 - Gewasopbrengst / gewasschade
 - Economische effecten
 - Ecologische effecten (inclusief chemische waterkwaliteit)
7. Toegankelijkheid

In het volgende hoofdstuk '5. Werking' worden per categorie de belangrijkste hydrologische modellen/tools besproken. Daarbij wordt getracht aan te geven welke vragen ermee beantwoord kunnen worden en welke data daar voor nodig is.

5. Werking

In dit hoofdstuk worden per categorie de belangrijkste hydrologische modellen/tools besproken. Daarbij wordt getracht aan te geven welke vragen ermee beantwoord kunnen worden en welke data daar voor nodig is.

Definitie van *model* binnen deze Deltafact: de combinatie van *simulatiesoftware* + de bijbehorende inputdata voor een specifiek geografisch gebied. Voorbeeld: MORIA is een iMOD-model voor de simulatie van de verzadigde en onverzadigde grondwaterstroming in het gebied van het Waterschap Rivierenland. Daarbij zijn de iMOD-modelparameters (model input data) specifiek voor dit geografische gebied

samengesteld. De iMOD-*software* is niet gebiedsspecifiek, er zijn ook iMOD-modellen voor andere regionale gebieden en voor heel Nederland.

Per model/simulatiesoftware/module wordt hieronder het volgende beschreven:

- Wat komt er uit het model / de tool, incl. de ruimte- en tijdsresolutie.
- Voor welke vragen is het model / de rekenmodule bedoeld, en wat is daarvan de reikwijdte; waarvoor is het nog wel, en waarvoor is het niet meer te gebruiken.
- Voor welke modules is de uitvoer van deze modellen weer input?
- Als je wilt inzoomen, wat heb je dan nodig.
- Welke (extra) data heb je dan nodig
- Een hyperlink naar meer info, waaronder DF's waarin de modellen ook nader omschreven worden.

De volgende modellen worden hieronder beschreven:

- Landelijk Hydrologisch Model (LHM)
- Regionale grondwatermodellen (AMIGO, AZURE, Brabant Model, GRAM, HYDROMEDAH, IBRAHYM, MIPWA, MORIA, Zeeland)
- NBW-modellen (ondanks dat de beschrijving van *hydraulische* modellen voor deze Deltafact out-of-scope zijn).

Landelijk Hydrologisch Model (afgekort: LHM)

Het Landelijk Hydrologisch Model is het geïntegreerd landsdekkende grond- en oppervlaktewater *model* van Nederland. Het model wordt ontwikkeld door Deltares en WENR in opdracht van Rijkswaterstaat WVL en toegepast in verschillende overwegend landelijke studies (bron: <https://nhi.nu/modellen/lhm>).

Domeinen:

Het LHM is gebaseerd op de volgende simulatiesoftwarepakketten: MODFLOW voor de verzadigde zone (grondwater), MetaSWAP voor de onverzadigde zone, gekoppeld aan WOFOST voor gewasgroei, MOZART voor het regionale oppervlaktewater, en DM (Distributiemodel) voor de landelijke oppervlaktewaterverdeling.

Ruimtelijke resolutie en toepassingsschaal

In het LHM is Nederland geschematiseerd in cellen van 250 x 250 meter en in de verticaal 8 modellagen voor de ondergrond en bodemcompartimenten in MetaSWAP. Voor het oppervlaktewater worden circa 8500 afwateringseenheden onderscheiden

in MOZART die in connectie staan met circa 250 grotere regionale eenheden (districten) die gekoppeld zijn aan het landelijke waterverdelingsnetwerk in DM. De toepassingschaal is primair landelijk, waarbij de interactie tussen grond- en oppervlaktewater en de landelijke oppervlaktewaterdistributie belangrijk is bij waterverdelingsvraagstukken.

Tijdsresolutie

Voor het verzadigde en onverzadigde grondwater wordt met tijdstap lengtes van 1 dag gerekend, en MOZART en DM rekenen op decadebasis.

Uitkomsten

Het instrumentarium is gericht op de simulatie van gemiddelde en droge situaties, en wordt met name ingezet voor analyses t.b.v. de landelijke zoetwatervoorziening en als randvoorwaarde voor waterkwaliteitsberekeningen, regionale grondwaterstromingspatronen van Nederland voor het huidige klimaat en voor klimaatscenario's. Met het LHM-instrumentarium worden onder meer vochtgehalten in de bodem, grondwaterstanden, stijghoogten in diepere watervoerende pakketten, kwel- en wegzijgingsfluxen en de uitwisseling tussen het grond- en oppervlaktewater berekend. Daarnaast wordt de verdeling van oppervlaktewater berekend over het landelijke waterverdelingsnetwerk en over de verschillende regionale oppervlaktewateren in Nederland, zodat op regionaal en landelijk niveau de beschikbaarheid van oppervlaktewater in beeld kan worden gebracht.

De modeluitvoer kan worden gebruikt als invoer voor andere modellen, bijvoorbeeld de berekende vochtgehalten in de bodem kunnen worden gebruikt voor de effecten op de landbouw en terrestrische natuur en als randvoorwaarden worden opgelegd aan waterkwaliteitsmodellen. Naast de waterbalans wordt ook de chloride balans bijgehouden in het grond- en oppervlaktewater.

Inzoommogelijkheden en data-vereisten

LHM is primair voor landelijke toepassingen, en niet bedoeld voor gedetailleerde regionale of lokale analyses. Voor de landelijke schematisatie zijn diverse regionale en lokale databronnen opgeschaald naar de landelijke schaal. Op dit moment is het niet zondermeer mogelijk om voor een deelgebied van het gekoppelde instrumentarium een uitsnede te maken, vooral in verband met de landelijke MOZART- en DM-modelschematisatie. In NHI-verband ([Nederlands Hydrologisch](#)

[Instrumentarium](#)) wordt o.a. daarom gewerkt aan de ontwikkeling van een toolbox om het mogelijk te maken om vanuit eenzelfde verzameling lokale en regionale brongegevens voor verschillende ruimtelijke schalen modelschematisaties op te bouwen; in de [NHI-dataportaal](#) worden alle regionale (en lokale) databronnen op een landelijk eenduidige verzameld en toegankelijk gemaakt; op termijn zal dit het opzetten van modelschematisaties voor verschillende schalen mogelijk maken die onderling consistent zijn. In [TKI-verband](#) wordt gewerkt aan nieuwe RIBASIM-software ter vervanging van MOZART en DM. Ter verbetering van de bijbehorende oppervlaktewaterschematisatie wordt op dit moment in LHM- en LWKM-verband extra data verzameld (o.a. t.a.v. RWZI's, ligging, buitenlandse aanvoer debieten, doorspoeldebieten, onttrekkingen vanuit oppervlaktewater etc.), welke via [HyDAMO](#) centraal ontsloten zullen worden. Met de komst van simulatiesoftware MODFLOW6 is het technisch mogelijk geworden om voor het grondwaterdomein verschillende ruimtelijke resoluties in één model te combineren, bijvoorbeeld bij een simulatie met het LHM waarin voor het grondwaterdomein voor het gebied van bijvoorbeeld de provincie Utrecht het LHM-deel vervangen is door een regionaal grondwatermodel dat een eigen ruimtelijke resolutie van 25 bij 25 meter cellen heeft. De hiervoor noodzakelijke softwarematige koppeling tussen MODFLOW6 en MetaSWAP is reeds beschikbaar, zodat er vervolgens in de nabije toekomst gewerkt zou kunnen gaan worden aan tooling die het opbouwen van multi-resolutiemodellen mogelijk gaat maken.

Toegankelijkheid

Het LHM is als instrumentarium voor iedere hydroloog in Nederland beschikbaar en wordt jaarlijks verbeterd. De data, software en rapportage worden zoveel mogelijk beschikbaar gesteld via www.nhi.nu. In het [dataportaal NHI](#) is diverse invoer en uitvoer van LHM beschikbaar.

Regionale grondwatermodellen

Voor bijna¹ alle regionale gebieden in Nederland zijn regionale grondwatermodellen beschikbaar:

- 'AMIGO' voor het gebied van Waterschap Rijn en IJssel,
- 'AZURE' voor het IJsselmeergebied,
- 'Brabant Model' voor het gebied van de Provincie Brabant,
- 'GRAM' voor het gebied van waterschap Aa en Maas,

¹ Behalve voor het gebied van de Provincie Noord-Holland.

- 'HYDROMEDAH' voor het gebied van Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
- 'IBRAHYM' voor het gebied van de Provincie Limburg,
- 'iDOMINGO' voor het gebied van waterschap de Dommel,
- 'MIPWA' voor het gebied van Wetterskip Fryslan, Waterschap Noorderzijlvest, Waterschap Hunze en Aa's, Waterschap Drents Overijsselse Delta en Waterschap Vechtstromen,
- 'MORIA' voor het gebied van Waterschap Rivierenland
- 'Zeeland' voor het gebied van de provincie Zeeland.

In de meeste gevallen zijn de modellen opgezet en in beheer door regionale (iMOD-)consortia waarin (meestal alle) inliggende waterschappen, provincies en drinkwaterleidingmaatschappijen in deelnemen; voor info t.a.v. de exacte samenstelling van de consortia, zie www.nhi.nu/modellen_en voor meer info m.b.t. iDOMINGO email naar wkc@dommel.nl.

Domeinen

De regionale grondwatermodellen omvatten het verzadigde en onverzadigde grondwaterdomein.

Ruimtelijke resolutie en toepassingsschaal

Bovenstaande regionale grondwatermodellen zijn gebaseerd op een MODFLOW-MetaSWAP-rekenkern (zie iMOD-software hieronder), en hebben allemaal een ruimtelijke resolutie van 25x25 meter cellen, en het aantal modellagen verschilt per regio. In Nederland worden iMOD-modellen gebruikt voor verschillende regionale doeleinden, zoals het toetsen van de normen voor regionale wateroverlast, het ontwerpen van maatregelen voor waterberging en peilbeheer, het analyseren van de effecten van klimaatverandering, landgebruik en waterbeheer op droogte, en als vertrekpunt voor het simuleren van de waterkwaliteit en de ecologie in het grondwater (bron: <https://nhi.nu/modellen/>), zie ook de paragraaf effectmodules.

Tijdsresolutie

Alle iMOD-modellen rekenen met tijdstaplengtes van 1 dag, hetgeen de dynamiek van het grondwater voor de regionale analyses in voldoende mate van detail simuleert. In scenarioberekeningen wordt vaak gekeken naar veranderingen in GxG's, de gemiddelde laagste, hoogste of voorjaarsgrondwaterstanden. Daarnaast zijn er iMOD-modelvarianten die met 10-daagse tijdstappen rekenen.

Softwarematig is het mogelijk om met kortere tijdstappen te rekenen, maar daarvoor dient de temporele invoer (o.a. de neerslag en verdamping) gedetailleerder – b.v. op uur- of kwartierbasis – te worden gespecificeerd. Een reden om met kortere tijdstappen te willen rekenen kan zijn om b.v. kortstondige plasvorming op het maaiveld ter plaatse als gevolg van stortbuien te simuleren. Het MODFLOW-MetaSWAP concept voorziet in het simuleren van ponding (stagnant water op maaiveld); indien het nodig is om hydraulische afstroming over het maaiveld als gevolg van plasvorming op het maaiveld te simuleren is een koppeling met een hydraulisch model nodig. M.a.w., MODFLOW-MetaSWAP-modellen kunnen wel ingezet worden voor droogtevraagstukken of voor wateroverlastvraagstukken, maar voor het simuleren van de afwisseling tussen wateroverlast en droogte en vice versa waarbij stroming over maaiveld een belangrijke rol speelt is een koppeling met een hydraulisch model aan te bevelen.

Uitkomsten

De regionale modellen berekenen grondwaterstanden, stijghoogten in diepere watervoerende pakketten, kwel- en wegzijgingsfluxen en de uitwisseling tussen het grond- en oppervlaktewater. Daarmee is de lijst van uitvoervariabelen identiek aan de lijst van uitvoervariabelen van het LHM exclusief de uitvoer van MOZART en DM.

Inzoommogelijkheden en data-vereisten

Indien de modelleur de regionale modellen als startpunt wil gebruiken om lokaal in te zoomen en daarmee met kleinere gridcellen wil gaan rekenen, is dat alleen zinvol indien de te verfijnen modelinvoer ook op gedetailleerdere brondata gebaseerd kan worden, aangevuld met lokale metingen, anders gezegd, alleen wanneer onderliggende brondata een hogere resolutie heeft dan het grid van de regionale modellen (cellen van 25 bij 25 meter). Dit is het geval voor landgebruik (LGN heeft nu een resolutie van 5x5 meter) en het maaiveld (het AHN heeft een resolutie van 0,5x0,5 meter), daarmee zal een fijnere discretisatie van kleinere watergangen waarvoor de diepteligging geschat wordt aan de hand van de maaiveldhoogte gebaseerd zijn op een gedetailleerdere maaiveldkaart. Daarnaast hebben de waterschappen veel detailgegevens (o.a. diepteligging, dwarsdoorsnedes, peilen, stuwen) over hun grotere waterlopen; het op basis daarvan verfijnen van een regionaal iMOD-model zal daarom o.a. de opbolling van de grondwaterspiegel tussen de waterlopen in meer detail kunnen simuleren. Een fijnere discretisatie van andere modelinvoer zoals de kD- en c-waarden van de ondergrond gebruik makend van

[REGIS-data](#) zal geen extra detail opleveren omdat de onderliggende data een grovere resolutie heeft. Wel kan bij het lokaal verfijnen extra lokale data, b.v. op basis van sondeergegevens, een aanleiding zijn de ondergrondschematisatie lokaal te verfijnen, niet alleen in x,y-richting, maar wellicht ook in de diepte. Dat kan uiteraard ook op basis van [GeoTOP-data](#).

Zoals hierboven opgemerkt geeft de recente komst van MODFLOW6 de mogelijkheid het modelnetwerk lokaal te verfijnen of modellen met verschillende resoluties te nesten. De tooling om dit soort modellen te bouwen is nog volop in ontwikkeling en wordt via het NHI zoveel mogelijk gecoördineerd en voor iedereen beschikbaar gesteld.

Toegankelijkheid

Elk regionaal consortium heeft het beheer en onderhoud en de toegankelijkheid van de modellen op een eigen manier georganiseerd. Op dit moment hebben de AMIGO-, IBRAHYM-, MIPWA- en MORIO-consortia een deel van de regionale modeluitvoer via de NHI-dataportaal rechtstreeks downloadbaar gemaakt. Voor toegang tot de volledige modelinvoer en -uitvoer en de voorwaarden waaronder beschikbaarstelling en hergebruik van dat regionale model kan plaatsvinden verzoeken de consortia eerst [contact op te nemen](#) met desbetreffende beheerder.

NBW-modellen

De beschrijving van *hydraulische* modellen zijn m.b.t. deze Delftafact officieel out-of-scope, toch volgt hieronder een korte samenvatting over de zogenaamde NBW-modellen.

Provincies, waterschappen en ook gemeenten werken actief aan het beperken en voorkomen van verschillende vormen van wateroverlast. In het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW 2003 en 2008) zijn afspraken gemaakt over het op orde brengen en het op orde houden van het watersysteem. Voor wateroverlast door inundatie vanuit oppervlaktewater zijn NBW-werknormen afgesproken, die op basis van een verplichting in de Waterwet zijn vastgelegd in provinciale verordeningen. De provinciale normering zorgt bij de professionals voor continue aandacht voor de kwaliteit van data, informatie en het modelinstrumentarium.

Alle waterschappen voeren regelmatig NBW-toetsingen uit voor hun volledige beheersgebied. Voor deze NBW-toetsingen worden zogenaamde NBW-modellen

ingezet, deze zijn gebaseerd op de SOBEK- en soms op de 3Di-simulatiesoftwarepakketten.

Het STOWA-rapport '[Provinciale normering wateroverlast](#)' bevat een overzichtstabel (tabel 3) waarin per waterschap de gekozen maatgevende situatie (stochastenmethode, tijdreeksmethode, etc.) wordt weergegeven, echter, informatie over onderliggende hydraulische modellen is niet centraal beschikbaar.

Simulatiesoftware

De voor de *Nederlandse* kwantitatieve hydrologische modellen meest gebruikte simulatiesoftwarepakketten² zijn [MODFLOW \(iMOD5 en iMOD Suite\)](#), [MetaSWAP](#), [WOFOST](#), [TRANSOL](#) en [MOZART/DM](#), [RTC Tools 2](#), SWAP, WALRUS en WFLOW. De nieuwe NHI-site bevat complete [beschrijvingen van de meeste van deze simulatiesoftwarepakketten](#), deze Deltafact bevat daarom alleen beschrijvingen van softwarepakketten die nog niet op NHI-site staan, namelijk van SWAP, WALRUS en WFLOW.

De informatie op de NHI-site per simulatiesoftwarepakket omvat:

- Schematisatie en concepten
- Gebruik
- Vaak aangepaste modelinvoer
- Belangrijkste modeluitvoer
- Tooling
- Aandachtspunten

Daarnaast geeft de NHI-site inmiddels ook zeer waardevolle informatie over de meest voorkomende koppelingen:

- Koppeling MODFLOW-MetaSWAP
- Koppeling MODFLOW-MetaSWAP-WOFOST
- Koppeling MODFLOW-MetaSWAP-D-HYDRO
- Koppeling Mozart-DM- MODFLOW-MetaSWAP-(TRANSOL-WOFOST)

Daarbij wordt steeds onderscheid gemaakt tussen de theorie van desbetreffende koppeling en hoe het in de praktijk uitwerkt.

Simulatiesoftwarepakketten (nog) niet op de NHI-site beschreven

² SOBEK, D-HYDRO en 3Di zijn *hydraulische* softwarepakketten en daarmee m.b.t. deze Deltafact out-of-scope.

SWAP staat voor Soil-Water-Atmosphere Plant. Het [SWAP-model](#) beschrijft de waterbalans van de onverzadigde zone van de bodem en deels het bovenste deel van het grondwater. De volgende aspecten van de waterbalans worden o.a. berekend: verdamping, infiltratie, percolatie en grondwateraanvulling. De uitkomst van het model wordt uitgedrukt per post van de waterbalans in volumes of millimeter waterschijf. MetaSWAP is een metamodel dat is gebaseerd op SWAP. Het voordeel van de meta-aanpak van MetaSWAP is dat het model 10-20 keer sneller rekent dan SWAP en daardoor geschikter is voor regionale toepassing.

WALRUS staat voor WAgeningen Lowland RUnoff Simulator. Het is een neerslag-afvoermodel gericht op stroomgebieden met relatief hoge grondwaterstanden. [WALRUS](#) legt focus op het koppelen van de grondwaterbalans met de waterbalans van de onverzadigde zone en afvoer van water van land naar oppervlaktewaterlichamen en modellering van kwel.

WFLOW

Met [Wflow](#) kunnen de hydrologische processen van een stroomgebied gesimuleerd worden, waarbij gebruik wordt gemaakt van gerasterde topografie-, bodem-, landgebruik- en klimaatgegevens en open toegankelijke aardobservatiegegevens; laatstgenoemde maakt Wflow ook zeer geschikt wanneer er lokaal weinig gegevens onmiddellijk beschikbaar zijn. Wflow is ook specifiek ontworpen om het modelleren van complexe systemen en problemen te ondersteunen door het te kunnen koppelen aan andere software zoals [Delft-FEWS](#), [D-Flow FM/Delft3D FM Suite](#), [D-Emissions](#) (DELWAQ), [MODFLOW6/iMOD Suite](#) en [RIBASIM](#) (modelleren van (oppervlakte)waterverdeling). Wflow is open source, gratis te downloaden en te gebruiken; indien Wflow onderdeel uitmaakt van een kritische workflow biedt Deltares desgewenst een service package aan.

Rijkswaterstaat beheert het zogenaamde GRADE-model, onderdeel hiervan zijn WFLOW-modellen van de Rijn en Maas (Beersma, 2022, en Hegnauer et al, 2023).

Effectmodules

Effectmodules zijn strikt genomen geen hydrologische modellen, echter, omdat de uitvoer van kwantitatieve hydrologische modellen dikwijls gebruikt wordt als input voor effectmodules worden enkele belangrijke effectmodules hieronder beschreven.

Van SWAP-WOFOST naar effect modules

Om de uitkomsten van SWAP-WOFOST te vertalen naar economische effecten en om vergelijkingen te kunnen maken tussen verschillende soorten schade (nat, droog, zout) is de [Water Wijzer Landbouw](#) (WWL) ontwikkeld. WWL bepaalt het effect op de landbouwkundige opbrengsten afhankelijk van de grondwaterstanden, het gewas, het bodemtype en het klimaat (lees ook [DF Klimaat en landbouw](#)). De WWL bevat drie tools, namelijk [WWL-tabel](#), [WWL-regionaal](#) en [WWL-Maatwerk](#).

Ook andere hydrologische modellen, zoals besproken in deze Deltafact, worden gekoppeld aan effectmodules, hieronder enkele voorbeelden:

AGRICOM is een acronym voor AGRICultural COst Model. [AGRICOM](#) is een agro-economisch model dat op basis van de resultaten van een hydrologisch model kosten en baten voor de landbouwsector in Nederland berekent. Dit betreft de effecten van te droge, te natte of te zoute omstandigheden op de Nederlandse landbouw.

Regioscan Zoetwatermaatregelen

Met de tweede en doorontwikkelde versie van de Regioscan Zoetwatermaatregelen kan het effect van lokale maatregelen als bijdrage aan de zoetwateropgave nog beter in beeld worden gebracht en is nu landsdekkend toepasbaar. De kansrijkheid van maatregelen kan zo snel worden ingeschat en gebruikt worden om met zoetwatergebruikers het gesprek aan te gaan. De Regioscan is zeer bruikbaar gebleken om een eerste verkenning te doen naar de kansrijkheid van maatregelen, als communicatietool om het gesprek met gebruikers op gang te brengen en om een inschatting te maken van het effect – in termen van kosten en baten- van lokale maatregelen op de watervraag. Het is evenwel belangrijk om in gedachte te houden dat de Regioscan Zoetwatermaatregelen niet bedoeld is voor bedrijfsadvisering aan specifieke boerenbedrijven. (bron: STOWA hoofdrapport [STOWA 2020-32A](#)).

Waterwijzer Natuur

De [Waterwijzer Natuur \(WWN\)](#) is een instrument waarmee kan worden bepaald wat de effecten zijn van waterbeheer, klimaatverandering en stikstofdepositie op terrestrische vegetatie. De [WWN-tool](#) is gemaakt voor verschillende ruimtelijke schalen, van lokaal (een natuurgebied) tot nationaal (heel Nederland). WWN gebruikt twee hydrologische modellen: PROBE en Waterlood.

Waterschadeschatter

De [Waterschadeschatter](#) is ontwikkeld ten behoeve van een beleidsmatige afweging van maatregelen voor het voorkomen van schade door inundatie in stedelijk gebied, landbouwpercelen en infrastructuur. Het is een GIS-based model waar op basis van landgebruikskaarten en hoogtekarten (AHN) schade en risico's op inundaties worden berekend met schadefuncties.

Tot slot: diverse effectmodules van waterkwaliteit tot landbouw, natuur en economie zijn ontsloten via het [Nederlands Hydrologisch Instrumentarium](#).

6. Kosten en baten

Kosten

Elke eigenaar van een hydrologisch model zal na de initiële bouw van het model de fase van beheer en onderhoud ingaan. Dit is nodig om het model te voorzien van recente invoerdata en/of ervoor te zorgen dat het model ook goed werkt op nieuwe hardware of na een update van het besturingssysteem. Daarnaast kan de eigenaar besluiten het bestaande model uit te breiden met nieuwe modelconcepten, of bestaande modelconcepten te verbeteren.

Voor de initiële bouw wordt vaak eenmalig een bedrag uitgegeven, maar ook de fasen van beheer en onderhoud en doorontwikkeling gaan gepaard met structurele kosten. Hoeveel er in Nederland jaarlijks totaal wordt uitgegeven aan de bouw, B&O en doorontwikkeling van de hydrologische modellen kon in het kader van deze Deltafact niet in beeld gebracht worden. Op onderdelen kan wellicht wel een schatting gemaakt worden:

- Onder penvoerderschap van de STOWA wordt op dit moment zo'n 2 miljoen per jaar aan de (door)ontwikkeling van het NHI besteed; binnen NHI-kader worden deze ontwikkelingen gezamenlijk gefinancierd vanuit het Rijk, Rijkswaterstaat, de VEWIN, de provincies en de STOWA.
- Elk individueel waterschap (wel of niet samen met de bijbehorende provincie en drinkwaterleidingmaatschappij) besteedt naar schatting³ 50 – 150 kEuro per jaar aan Beheer en Onderhoud en doorontwikkeling van haar hydrologische modellen (exclusief hun individuele financiële bijdrage aan het NHI); voor de 21 waterschappen gezamenlijk gaat het dan om 21 x ~50-150

³ Schatting van de Deltares-auteur van deze Deltafact op basis van een beperkte telefonische steekproef.

kEuro = ~ 1 tot 3 miljoen euro per jaar; dit is exclusief de toepassing van de modellen in projecten.

Opgeteld (regionale partijen + NHI) is dat ~3 tot 5 miljoen euro per jaar. Daarbij is er op dit moment vooral focus op het up-to-date krijgen en houden van modelonafhankelijke inputdata-databases op basis waarvan – liefst d.m.v. een ‘druk op de knop’ – geactualiseerde modelschematisaties gegeneerd kunnen worden. Overheden en drinkwaterbedrijven in Nederland geven jaarlijks ruim 7 miljard uit aan waterbeheer (bron: www.onswater.nl). Dit omvat de bescherming van Nederland tegen overstromingen en het zorgen voor de beschikbaarheid van voldoende en schoon water. Het aandeel voor het doorontwikkelen en beheer en onderhoud van kwantitatieve hydrologische modellen als onderdeel van de totale kosten voor het waterbeheer in Nederland is daarmee zeer bescheiden.

Baten

De baten van de hydrologische modellen zijn lastig in euro's te kwantificeren, immers, er wordt met modellen niet letterlijk geld verdiend. Wel worden deze modellen vaak ingezet om schade (i.v.m. droogte, wateroverlast, bevaarbaarheid, etc.) en faalkosten te vermijden en om efficiëntere (beleids)oplossingen te vinden in het kader van actuele beleidsopgaven. Of gewoon om een goed ontwerp te maken en dat te toetsen voor verschillende situaties. De [Klimaatschadeschatter](#) heeft getracht een schatting te maken van de potentiële schade als gevolg van klimaatverandering t/m 2050; voor voornamelijk particulieren zou die in totaal uit kunnen komen op minimaal 77 miljard euro. De inzet van o.a. hydrologische modellen maakt het mogelijk om het effect respectievelijk de effectiviteit van verschillende klimaat- en oplossingsscenario's proberen in te schatten, en daarmee bij te dragen aan genoemde potentiële schade zoveel mogelijk af te wenden; hoe groot deze bijdrage kan zijn is onbekend.

Zoals in de inleiding beschreven worden hydrologische modellen voor waterkwantiteit ingezet in alle water-gerelateerde opgaven, zoals het voorkomen van wateroverlast, droogte, verzilting, bodemdaling, etc., maar ook in acute situaties zoals in de droge zomers van 2018 en 2022, en hydraulische modellen bij het hoogwater in 2021 in Limburg. Voor het dagelijkse waterbeheer zijn de hierboven beschreven hydrologische modellen in combinatie met hydraulische modellen in elk geval onmisbaar geworden.

Naast het voorkomen of mitigeren van schade levert de samenwerking in NHI-verband in elk geval efficiency op, zowel qua toepassing van de meest recente kennis, data en instrumenten, maar ook van tijd en geld, en qua snel beschikbare en eenduidige modelresultaten. Ook de regionale iMOD-consortia – waarin op een vergelijkbare manier wordt samengewerkt – zullen profijt hebben van het NHI.

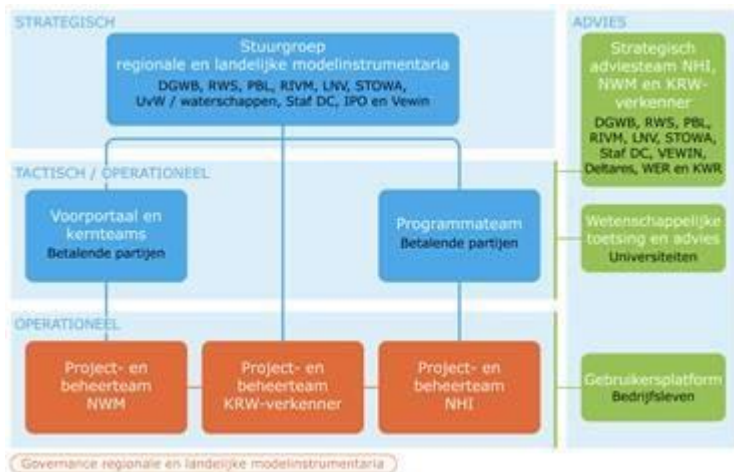
7. Randvoorwaarden

De belangrijkste randvoorwaarde voor de hydrologische modellen is continuïteit met betrekking tot beheer en onderhoud, gericht op het up-to-date houden van het modelinstrument. Dit betreft zowel de hard- en software – in sommige gevallen is doorontwikkeling of vervanging van softwareonderdelen nodig – maar ook de data die nodig is voor de modelschematisaties.

Ten aanzien van hydrologische modellen wordt gezamenlijk door het Rijk en de regionale partijen geïnvesteerd in het Nederlands Hydrologische Instrumentarium (zie ook hieronder onder paragraaf 8. Governance), en vervuld de [NHI-dataportaal](#) een steeds centralere rol, voor zowel basisdata (bodem, grenzen, grondwatermeetpunten, onttrekkingsgegevens, ontwatering, oppervlaktewater, peilen, topografie), alsook voor schematisaties (o.a. parameters van de ondergrond, landelijk en regionaal), en modeluitvoer van zowel het [LHM](#) alsook enkele regionale modellen ([AMIGO](#), [IBRAHYM](#), [MIPWA](#) en [MORIA](#)). De samenwerking binnen NHI-kader maar ook binnen regionale (iMOD-)consortia zorgt voor draagvlak en continuïteit. Via de BRO ([Basis Registratie Ondergrond](#)) en [Dinoloket](#) komen ook steeds meer reeksen van grondwaterstanden beschikbaar.

8. Governance

Het eigendom van de hydrologische modellen is divers: terwijl hydrodynamische modellen meestal gemaakt zijn in opdracht van één partij (b.v. een waterschap), is een regionaal (geo)hydrologisch (iMOD-)model vaak het gezamenlijk eigendom van een groep van regionale partijen bestaande uit de desbetreffende provincie en het waterschap en de drinkwaterleidingmaatschappij van die regio, georganiseerd in de vorm van (iMOD-)consortia ([AMIGO](#), [AZURE](#), [IBRAHYM](#), [HYDROMEDAH](#), [MIPWA](#), [MORIA](#)). Zoals in hoofdstuk '5. Werking' al opgemerkt is de toegankelijkheid per eigenaar via gebruikersovereenkomsten georganiseerd.



Figuur 2 NHI-governance.

Een belangrijke ontwikkeling is het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI). Het NHI bevat basisdata en softwaretools om invoerfiles te maken. Hiermee worden de rekenmodellen gevoed, die op hun beurt de kern vormen van de nationale en regionale hydrologische modeltoepassingen. Het NHI is

een samenwerking tussen het Rijk, provincies, drinkwaterbedrijven, waterschappen, kennisinstututen en bedrijfsleven, zie Figuur 2. De financiering wordt vooral geleverd door Rijk, PBL, STOWA, waterschappen, provincies en VEWIN; aan de technisch inhoudelijke ontwikkeling dragen Deltares, KWR, Wageningen Environmental Research en adviesbureaus bij. Het NHI wordt aangestuurd door een strategieteam bestaande uit vertegenwoordigers van de financierende organisaties. De stuurgroep Regionale en Landelijke Modelinstrumentaria stuurt het Nationaal Water Model en de KRW-verkenner aan. Op die manier wordt de afstemming en verbinding tussen regionale en nationale modelinstrumentaria geborgd. Het beheer en onderhoud van het NHI-instrumentarium is inmiddels belegd bij het Informatiehuis Water. Grote pluspunten van de NHI-aanpak is het brede draagvlak dat voor de gemeenschappelijke rekeninstrumenten kan ontstaan en dat de kosten gezamenlijk door alle deelnemers gedragen worden, en daarmee per deelnemer veel lager zijn. Het bijbehorende minpunt is dat een dergelijke samenwerkingsvorm vaak veel meer tijd en afstemming vergt t.o.v. 'individueel' gefinancierde ontwikkelingen en daarmee hoge eisen stelt aan uithoudingsvermogen en trouw van alle deelnemende partijen; de continuïteit van de financiering van de realisatie van het gemeenschappelijke doel is daarmee de achilleshiel van dergelijke samenwerkingsvormen.

9. Praktijkervaringen en lopende initiatieven

Hardware

Rijkswaterstaat startte in 2021 een verkenning naar de mogelijkheden voor het opzetten van een zogenaamde [Watercloud](#), een online platform voor de watersector

in Nederland; deze verkenning loopt nog. De mogelijkheden om in de cloud te rekenen nemen ondertussen stap-voor-stap toe. Deltares bijvoorbeeld heeft voor haar projecten inmiddels een zogenaamde self-service multicloud ingericht, waarbinnen voor allerlei verschillende doeleinden externe cloud services (Amazon Web Services (AWS) en Microsoft AZURE) ingezet kunnen worden. Hiermee zal steeds meer praktijkervaring opgedaan worden, zodat steeds duidelijker wordt welke hardomgeving het beste bij specifieke projectdoelstellingen en -randvoorwaarden past.

De meeste regionale consortia hebben een eigen 'dedicated' server ingericht die op projectbasis toegankelijk is voor hun project-gerelateerde modelberekeningen. Daarnaast heeft één van de consortia voor een bepaalde periode rekenkracht extern ingekocht bij SSC-Campus (in 2015 opgericht door RIVM en KNMI om overheidsinstellingen te ondersteunen bij de realisatie van hun ICT-ambitie). Recentelijk heeft SSC-Campus bekend gemaakt op termijn (in 2025) deze dienstverlening te stoppen. Ongeacht op welke hardware er gerekend wordt lopen modellers met enige regelmaat op tegen de fysieke grenzen van de diskruimte, o.a. veroorzaakt door de grote uitvoervolumes die de huidige hydrologische modellen produceren.

Ontwikkeling van nieuwe modelconcepten

De hierboven beschreven hydrologische modellen worden volop in de praktijk gebruikt. Vaak lopen er initiatieven om de invoerdata up-to-date te maken en centraal beschikbaar te maken (zie b.v. <https://data.nhi.nu/>) of om de modelschematisaties [op onderdelen conceptueel uit te breiden](#); m.b.t. de laatstgenoemde categorie worden hieronder enkele lopende trajecten beschreven.

Het [TKI-project 'Oppervlaktewater NHI'](#) heeft als doel de ontwikkeling van een concept voor een vereenvoudigde, gelumpte benadering voor het Nederlandse oppervlaktewatersysteem (RIBASIM), waarmee realistischere berekeningen van grondwaterstanden, gebiedsafvoeren en waterverdeling volgens verdringingsreeksen wordt verkregen, zowel op landelijk alsook op regionaal schaalniveau; ten behoeve van regionaal waterbeheer kan daarmee in combinatie met de bestaande grondwatermodellen de interactie tussen grond- en oppervlaktewater op een gelumpte wijze worden meegenomen en ontstaat daarmee een nieuwe modelmatige verbinding tussen grond- en oppervlaktewater.

In het [Lumbricus programma](#) is o.a. ten behoeve van het regionale waterbeheer in 2022 een softwarematige koppeling tussen MODFLOW2005 (grondwater), MetaSWAP (onverzadigde zone) en D-Flow FM (hydrodynamica van het oppervlaktewater) gerealiseerd. Het prototype maakt het voor waterschappen mogelijk om bijvoorbeeld de effectiviteit van wateraanvoerplannen vooraf te analyseren, waarbij met de modellen de veronderstelde beschikbaarheid van gepland aangevoerd oppervlaktewater nagegaan kan worden. Aanvullend aan een lopend [TKI-project](#) werkt Deltares aan de migratie van dit prototype naar MODFLOW6.

Binnen het [TKI-project Grow with the Flow](#) is een techniek ontwikkeld die het mogelijk maakt een grondwatermodel en een bodem-water-gewas-atmosfeer-model te runnen dat gevoed wordt met lokale kennis vanuit telers en ondersteund wordt met slimme herkenningstechnieken (AI) en data-assimilatietechnieken, en bruikbaar is op zowel lokale als regionale schaal.

Het doel van het in 2023 gestarte [TKI-project AI-kennis voor grondwaterverkenningen](#) is een nieuwe techniek te ontwikkelen en te testen om van bestaande numerieke 3D-MODFLOW-grondwatermodellen een Artificiële Intelligentie-versie (AI-versie) op basis van neurale netwerken te kunnen maken, die geschikt is voor gebruik door waterbeheerders en stakeholders voor het uitvoeren van diverse snelle verkenningen al dan niet als onderdeel van een operationeel instrumentarium. De essentie is dat er bij de opbouw van een AI-versie van een bestaand numeriek model in wezen 'van fijn naar grof' gewerkt wordt.

SWAP-WOFOST

In 2024 bestaat SWAP-WOFOST (en voorgangers) 50 jaar. In 2023 is gestart met modulair opzetten van de code. Dit houdt onder ander in dat de rekenkern een softwarematige revisie ondergaat en dat de aansturing wordt vernieuwd. Hierdoor kan SWAP-WOFOST niet alleen als standalone programma gebruikt gaan worden, maar kan het ook worden ingezet als multi-SWAP en binnen een raamwerk van hydrologische modules.

Opvolging van MODFLOW6-MetaSWAP-WOFOST

In NHI-kader wordt nu gewerkt aan de koppeling van MODFLOW6 en SWAP-WOFOST; dit betreft een online-koppeling op tijdstapbasis, analoog aan de koppeling

tussen MODFLOW6 en MetaSWAP. Testruns met MODFLOW6-SWAP-WOFOST moeten gaan uitwijzen in hoeverre dit de opvolger kan worden van de bestaande MODFLOW6-MetaSWAP-WOFOST koppeling.

10. Kennisleemtes

De droge zomers van de afgelopen jaren, het hoogwater in de zomer van 2021 en (andere) aanstaande klimaatveranderingen roepen nieuwe vragen op voor het waterbeheer. Vanuit het perspectief van de ontwikkeling, het beheer en onderhoud en toepassing van hydrologische modellen levert dat de volgende extra vragen op:

- Wat zijn de nadelige gevolgen van droogtmaatregelen voor de risico's op wateroverlast? Zijn de beschikbare modellen inzetbaar voor het kwantificeren daarvan? Bijvoorbeeld: voor het simuleren van droogte/wateroverlast met een gekoppeld MODFLOW-MetaSWAP-D-Flow FM-model is de stap naar rekenen op uur- of kwartierbasis nodig, en is er o.a. extra aandacht nodig voor het parameteriseringsproces van de infiltratiecapaciteit van de bodem; is hiervoor voldoende data beschikbaar?
- Hoe weeg je potentiële schade door wateroverlast tegenover schade door droogte?
- Hoe koppel je daartoe verschillende effectmodellen (landbouw, natuur, waterkwaliteit, drinkwater) aan hydrologische modellen vanuit een drietrapp (1) hydrologie, (2) kwantificeerbare effecten voor sectoren (biomassa, waterkwaliteit, soortabundanties, etc.) naar (3) waarden (economisch, ecologisch, monetair, niet-monetair)?
- Hoe verbeter je de modelleerbaarheid van de interactie tussen grond- en oppervlaktewater t.b.v. waterverdelingsvraagstukken?
- Rekentijden: veel huidige modellen zijn zeer gedetailleerd maar hebben daardoor (zeer) lange rekestijden, waardoor ze in een verkenningsfase nauwelijks inzetbaar zijn. Wat zijn de mogelijkheden om de bestaande modellen te versnellen of vanuit de bestaande gedetailleerde modellen gezien grovere benaderingen (metamodellen) af te leiden, geschikt voor verkenningen? En hoe zorg je dan voor onderlinge consistentie tussen eenvoudige en complexe benaderingen voor verkennende respectievelijk gedetailleerde studies?
- In hoeverre kunnen de bestaande deterministische hydrologische modellen worden toegepast buiten de bandbreedtes (b.v. met extremere meteo-input) waarmee ze oorspronkelijk geijkt zijn?

- Hebben we genoeg (goede) data? Als we meer willen zeggen in detail en met meer nauwkeurigheid, hebben we dan betere en/of meer data nodig, en zo ja, welke?

Met betrekking tot de hydrologische modellen kan er nog veel verbeterd worden op het gebied van:

- Onzekerheidskwantificering van het model zelf (gevoeligheid van resultaten voor een net iets andere parameterisering, die net zo valide kan zijn).
- Berekening van de actuele verdamping, zie de [paragraaf 'Kennisleemten' van de Deltafact 'Verdamping'](#).
- Wat zijn de maatgevende condities in een veranderend klimaat (neerslagstatistieken etc.)?

Meer algemene technische kennisvragen:

- Waar liggen de kansen m.b.t. Machine Learning-technieken?
- Hoe integreer je deterministisch modelleren met stochastische modellen in het licht van nieuwe ontwikkelingen zoals Artificiële Intelligentie / Machine Learning? Of hoe gebruik je ze op een goeie manier naast elkaar?

11. Bronnen en links

[Beersma, J., Brink, H. van den, Hegnauer, M, 2022. Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Meuse. Final report of GRADE-Meuse version 3.0. Deltares-rapport 11205237-003-ZWS-0016.](#)

[Hegnauer, M; Beersma, J; van de Brink, H, Leander, R; 2023. Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Rhine. Final report of GRADE-Rhine version 3.0. Deltares-rapport 11205237-003-ZWS-0016.](#)

AGRICOM: <https://www.wur.nl/en/Publication-details.htm?publicationId=publication-way-343831343437>

AMIGO: <https://nhi.nu/modellen/amigo/>

AMIGO: <https://nhi.nu/modellen/amigo/>

AZURE: <https://nhi.nu/modellen/azure/>

Basis Registratie Ondergrond (BRO): <https://basisregistratieondergrond.nl/>

Berekening:

<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/berekening>

Bodemdaling: <https://www.stowa.nl/deltafacts/ruimtelijke-adaptatie/adaptief-deltamanagement/bodemdaling>

Delft3D FM Suite: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft3d-flexible-mesh-suite>

Delft-FEWS: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft-fews-platform>

Deltascenario's: <https://www.stowa.nl/deltafacts/waterveiligheid/innovatieve-dijkconcepten/deltascenarios-en-adaptief-deltamanagement>

D-Emissions: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft3d-fm-suite/modules/d-emissions>

DF Klimaat en landbouw:
<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/effecten-klimaatverandering-op-landbouw>

D-Flow FM: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft3d-fm-suite/modules/d-flow-flexible-mesh>

Dinoloket: <https://www.dinoloket.nl/>

Dynamisch peilbeheer:
<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/dynamisch-peilbeheer>

GeoTOP-data: <https://basisregistratieondergrond.nl/inhoud-bro/registratieobjecten/modellen/geotop-gtm/>

HyDAMO: <https://nhi.nu/data/oppervlaktewater/hydamo-regionaal/>

HYDROMEDAH: <https://nhi.nu/modellen/hydromedah/>

IBRAHYM: <https://nhi.nu/modellen/ibrahym/>

IBRAHYM: <https://nhi.nu/modellen/ibrahym/>

iMOD5 en iMOD Suite: <https://nhi.nu/tooling/imod-5-en-imod-suite/>

Klimaatschadeschatter: <https://www.klimaatschadeschatter.nl/>

KLIMAP: <http://www.klimap.nl/>

Landelijk Waterkwaliteitsmodel (LWKM): <https://nhi.nu/modellen/lwkm/>

LHM: <https://nhi.nu/modellen/lhm/>

LHM-zoetzout: <https://nhi.nu/modellen/lhm-zoet-zout/>

LWKM: <https://nhi.nu/modellen/lwkm/>

Lumbricus programma: <https://www.programmalumbricus.nl/proeftuinen/proeftuin-zuid/onderwerpen/wellend-water/>

MetaSWAP: <https://nhi.nu/modelcode/metaswap/>

MIPWA: <https://nhi.nu/modellen/mipwa/>

MIPWA: <https://nhi.nu/modellen/mipwa/>

MODFLOW: <https://nhi.nu/modelcode/modflow/>

MODFLOW6/iMOD Suite: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/imod-groundwater-modelling>

MORIA: <https://nhi.nu/modellen/moria/>

MORIA: <https://nhi.nu/modellen/moria/>

MOZART/DM: <https://nhi.nu/modelcode/mozart-en-dm/>

Nationaal Water Model (NWM): <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/watermanagementmodellen/nationaal-water-model/>

Nederlands Hydrologisch Instrumentarium: <http://www.nhi.nu/>

Nederlands Hydrologisch Instrumentarium: <https://nhi.nu/organisatie/teams-binnen-de-nhi/>

NHI Tooling in ontwikkeling: <https://nhi.nu/tooling/tooling-in-ontwikkeling/>

NHI-dataportaal: <https://data.nhi.nu/>

NHI-dataportaal: <https://data.nhi.nu/>

NHI-modellen: <http://www.nhi.nu/modellen>

NHI-modellen: <https://nhi.nu/modellen/lhm>

Paragraaf 'Kennisleemten' van de Deltafact 'Verdamping':
<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/verdamping#Kennisleemten>

Provinciale normering wateroverlast:
<https://www.stowa.nl/nieuws/wateroverlastnormering-tegen-het-licht-gehouden>

Regelbare drainage:
<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/regelbare-drainage>

Regenwaterlenzen:
<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/regenwaterlenzen>

REGIS-data: <https://www.dinoloket.nl/>

Remote Sensing:
<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/remote-sensing-waterkwantiteits-kwaliteitsbeheer>

RIBASIM: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/ribasim-river-basin-planning-and-management>

RTC Tools 2: <https://nhi.nu/modelcode/rtc-tools-2/>

STOWA 2020-32A: <https://www.stowa.nl/publicaties/regioscan-zoetwatermaatregelen-fase-2>

SWAP: <https://www.swap.alterra.nl/>

TKI-project 'Oppervlaktewater NHI':
<https://tkideltatechnologie.invoermodule.nl/project/oppervlaktewatermodule-nhi/>

TKI-project AI-kennis voor grondwaterverkenningen:

<https://tkideltatechnologie.invoermodule.nl/project/ai-kennis-voor-grondwaterverkenningen/>

TKI-project Conceptuele modelverbetering NHI:

<https://tkideltatechnologie.invoermodule.nl/project/conceptuele-modelverbetering-nhi/>

TKI-project Grow with the Flow:

<https://tkideltatechnologie.invoermodule.nl/project/grow-with-the-flow/>

TKI-project Oppervlaktewater NHI:

<https://tkideltatechnologie.invoermodule.nl/project/oppervlaktewatermodule-nhi/>

TRANSOL: <https://nhi.nu/modelcode/transol/>

Verdamping:

<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/verdamping>

WALRUS: <https://www.wur.nl/en/research-results/chair-groups/environmental-sciences/hydrology-and-environmental-hydraulics-group/research/research-projects/walrus.htm>

Water vasthouden en bergen:

<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/aanpassen-aan-klimaatverandering/water-vasthouden-en-bergen>

Water Wijzer Landbouw: <https://waterwijzer.nl/achtergronden/de-waterwijzer-landbouw>

Watercloud:

https://open.rijkswaterstaat.nl/publish/pages/185503/p1229_uitwerking_watercloud_beschrijving_use_cases_definitief.pdf

Waterschadeschatter: <https://www.waterschadeschatter.nl/damage/>

Waterwijzer Natuur (WWN): <https://waterwijzer.nl/achtergronden/de-waterwijzer-natuur>

Wflow: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/wflow-catchment-hydrology>

WOFOST: <https://nhi.nu/modelcode/wofost/>

WWN toegepast: <https://www.kwrwater.nl/tools-producten/waterwijzer-natuur>

www.onswater.nl: <http://www.onswater.nl/>

Zoetwatervoorziening:

<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/zoetwatervoorziening>

Zoutindringing:

<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/verzilting/zoutindringing>

12. Colofon

Auteurs: Bennie Minnema (Deltares),
Jeroen Veraart (Wageningen University & Research)

Versie:1, November 2023.