TYGRON PLATFORM

Deltares

Verkenning GPU integrale oppervlakte-grondwatermodellering

voor casus Veluwe

Verkenning GPU integrale oppervlakte-grondwatermodellering
voor casus Veluwe

Auteur(s)
Timo Kroon
Maxim Knepfle
Hendrik Kok
Robert Leander
Hedi van Dijk
Nadine Slootjes

Partners
Tygron B.V., 'S-GRAVENHAGE

Verkenning GPU integrale oppervlakte-grondwatermodellering
voor casus Veluwe

Opdrachtgever	Waterschap Vallei en Veluwe
Contactpersoon	Harmen van de Werfhorst
Projectreferenties	
Trefwoorden	GPU, Veluwe, Integraal, oppervlakte-grondwaterinteractie, hoge resolutie, Tygron, MODFLOW

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	06-02-2026
Projectnummer	11212568-002
Document ID	11212568-002-DSC-0003
Pagina's	37
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

Timo Kroon
Maxim Knepfle
Hendrik Kok
Robert Leander
Hedi van Dijk
Nadine Slootjes

Samenvatting

Waterschap Vallei en Veluwe wil hydrologische analyses op perceelniveau verbeteren, waarbij snelle processen aan het maaiveld en langzamere processen in de ondergrond geïntegreerd worden doorgerekend. Met het huidige modelinstrumentarium loopt men hierbij echter tegen beperkingen in de rekentijd aan:

- Er is geen integrale doorrekening met de snelle processen aan het maaiveld mogelijk op hoge resolutie.
- In het AZURE 2.0 model (AZURE, 2024) wordt gerekend met relatief grove rastercellen, in de orde van 200-400 m waardoor het hoogtemodel afwijkt en er geen directe simulatie tussen grond- en oppervlaktewater is.

Recente technologische ontwikkelingen bieden nieuwe mogelijkheden. GPU-technologie, zoals toegepast in het Tygron Platform, maakt het mogelijk om op hoge ruimtelijke resolutie te rekenen zonder sterk toenemende rekentijden. Hierdoor worden interacties tussen oppervlakkige afstroming, drainage en infiltratie beter zichtbaar en zijn gedetailleerdere procesrepresentaties mogelijk. De ondergrondberekeningen in het Tygron Platform zijn nog in ontwikkeling en het is wenselijk te verkennen hoe de grondwaterberekeningen op de GPU verder kunnen worden verbeterd.

In deze verkenning zijn de conceptuele verschillen in hydrologische processen tussen het Tygron Platform en MODFLOW-MetaSWAP nader geanalyseerd, gefocust op de processen in de ondergrond, inclusief de interactie met het oppervlaktewater. In de verkenning concluderen we dat er twee oplossingsrichtingen denkbaar zijn om met GPU-technologie het grondwater realistischer te modelleren. De eerste optie is een hybride aanpak met zowel CPU als GPU: Tygron berekent hierbij de snelle maaiveldprocessen en de interactie met het freatische grondwater, terwijl MODFLOW de meerlaagse stroming in de diepere ondergrond voor zijn rekening neemt. De tweede optie is een volledig GPU-gebaseerde grondwaterberekening. Dit biedt maximale rekensnelheid, maar vraagt om een aanzienlijke investering, terwijl de inhoudelijke meerwaarde vooraf niet vaststaat.

Wij adviseren om de onderstaande stappen te zetten voor een doelgerichte doorontwikkeling:

- **Korte termijn**
  Uitbreiden van het Tygron Platform met een dynamische Q–ΔH-relatie voor grond-oppervlaktewaterinteractie en een (meerlaagse) transferfunctie voor realistischere reistijden in de onverzadigde zone. Daarna kan worden bepaald welke vervolgaanpassingen de meeste meerwaarde bieden.

- **Middellange termijn**
  Realiseren van een online koppeling tussen het Tygron Platform en MODFLOW.

- **Lange termijn**
  De hybride aanpak biedt al duidelijke voordelen, maar voor optimale prestaties zijn verdere stappen mogelijk. Aanvullend onderzoek is nodig om de haalbaarheid en de meerwaarde te beoordelen. Richtingen zijn onder meer het inbouwen van geavanceerde onverzadigde zone-concepten (zoals de full Richardsmethode in 1D of 3D, aansluitend op ontwikkelingen in MODFLOW 6) en het op lange termijn verkennen van een volledige GPU-implementatie van een meerlaags grondwatermodel. Dit laatste vereist verdiepend fundamenteel onderzoek, bijvoorbeeld via promotietrajecten of grotere onderzoeksprogramma's.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
	Inhoud	**5**
1	**Inleiding**	**7**
1.1	Aanleiding van de verkenning GPU voor grondwatermodellering	7
1.2	GPU Technologie	8
1.3	Nadere duiding van de vragen vanuit het waterschap	10
1.4	Context van de verkenning en aanpak	11
1.5	Casus Veluwe	12
2	**Oplossingsrichtingen op hoofdlijnen**	**13**
3	**Beschrijving van de hydrologische processen**	**16**
3.1	Inleiding	16
3.2	MODFLOW-MetaSWAP	16
3.2.1	Scope en rol in het instrumentarium	16
3.2.2	Interacties tussen grond- en oppervlaktewater	17
3.2.3	Onverzadigde-zone benadering (MetaSWAP)	18
3.2.4	Randvoorwaarden en klimaat-vegetatie interacties	19
3.2.5	Oppervlakkige afstroming	19
3.2.6	Sterktes en aandachtspunten voor de casus Veluwe	19
3.3	Tygron Platform	20
3.3.1	Scope en rol in het instrumentarium	20
3.3.2	Interacties tussen grond- en oppervlaktewater	20
3.3.3	Processen grond- en oppervlaktewater en het gehanteerde schaalniveau	21
3.3.4	Interactie tussen diep en ondiep grondwater	23
3.3.5	Onverzadigde zone	23
3.3.6	Randvoorwaarden onverzadigde zone	24
3.3.7	Oppervlakkige afstroming	25
4	**Modelperformance**	**26**
5	**Aanbevelingen**	**28**
5.1	Korte termijn	28
5.2	Middellange termijn	29
5.3	Lange Termijn	30
5.4	Aanvullende onderwerpen	31
5.5	Tot slot	31
	Bijlage: Beschrijving begrippen	**32**
	Bijlage: Nadere toelichting modelconcepten MODFLOW	**33**

1 Inleiding

1.1 Aanleiding van de verkenning GPU voor grondwatermodellering

Waterschappen staan in een veranderend klimaat voor steeds complexere wateropgaven, waarbij processen met verschillende ruimtelijke en temporele resoluties in samenhang moeten worden bekeken. Steeds vaker ontstaan vragen waarvoor een hogere ruimtelijke resolutie en een betere aansluiting tussen oppervlakkige processen, de uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater en de interactie met het diepere grondwater essentieel zijn. Dit vraagt om een instrumentarium dat de werkelijkheid fijnmaziger kan benaderen dan tot nu toe gebruikelijk is in het grondwaterinstrumentarium. Om realistische en bruikbare inzichten te krijgen voor beleid en gebiedsgerichte maatregelen, is het nodig dat processen zoals oppervlakkige afstroming, infiltratie, berging, lokale kwelpatronen en regionale grondwaterstroming geïntegreerd worden geanalyseerd.

Waterschap Vallei en Veluwe heeft daarom de ambitie om een hydrologisch instrumentarium in te zetten waarmee analyses op perceelsniveau kunnen worden uitgevoerd, bijvoorbeeld hoge resolutie maatregelen in het kader van beekherstel (zoals maatregelen gericht op meanderen, natuurlijke oevers en dood hout), en de samenhang met de processen in de ondergrond op realistische wijze wordt meegenomen.

De bestaande regionale grondwatermodellen bieden hiervoor een degelijk uitgangspunt, maar lopen tegen duidelijke grenzen aan. Veel modellen werken met relatief grove rastercellen, waardoor snelle maaiveldsprocessen worden vereenvoudigd en schalingsproblemen ontstaan zodra processen op perceel- of beekdalniveau relevant worden. Dit bemoeilijkt een realistische weergave van lokale variatie in afstroming, infiltratie en kwel, terwijl juist die dynamiek bepalend is voor het beoordelen van het functioneren van lokale maatregelen en voor de herkenbaarheid van modelresultaten in het veld.

Met het huidige instrumentarium in de vorm van het AZURE 2.0 model, opgebouwd uit MODFLOW en MetaSWAP, zijn in 2024 uitgebreide berekeningen verricht voor het waterschap. Echter liep men al snel tegen een beperking in de rekentijd aan waardoor niet alles mogelijk was. Dit vertaalt zich in een tweetal punten:

- Er is geen integrale doorrekening met de snelle processen aan het maaiveld mogelijk op hoge resolutie (in de orde grootte van meters). Hierdoor is het lastig om bijvoorbeeld beekherstel of maaiveld maatregelen goed mee te nemen.
- In de recente versie van AZURE (AZURE 2.0, 2024) is gerekend met relatief grove rastercellen, van 200-400 m[1]. Bij deze modeltoepassingen is het hoogtemodel grof en geen directe simulatie van de interactie tussen grond- en oppervlaktewater op het gewenste detailniveau mogelijk, en moet dus worden gewerkt met opgeschaalde karakteristieken van het oppervlaktewatersysteem.

Waterschap Vallei en Veluwe zet naast AZURE in verschillende projecten ook Tygron in om ruimtelijke en hydrologische vraagstukken te verkennen. Het platform maakt het mogelijk om snel op hoge resolutie te rekenen en gebiedsinformatie op een toegankelijke manier te visualiseren, wat helpt bij het bespreken van scenario's en het onderbouwen van keuzes. De rekentechnieken op GPU's zorgen ervoor dat grote datavolumes efficiënt kunnen worden verwerkt en dat berekeningen aanzienlijk sneller verlopen. Binnen het waterschap zijn

[1] Eerdere modelversies van AZURE en andere regionale modellen werken dikwijls met 25 m resolutie. Ook deze resolutie voldoet niet aan de wens van het waterschap m.b.t. hoge resolutie berekeningen van de ondergrond.

hiermee al goede ervaringen opgedaan in overstromingsberekeningen. De uitdaging is om de rekensnelheid en dataverwerking in Tygron optimaal te benutten voor de grondwaterberekeningen die nog in ontwikkeling zijn.

Tegen deze achtergrond zijn Deltares en Tygron door het waterschap gevraagd een verkenning uit te voeren naar de kansen van GPU-technologie voor grondwatermodellering. Deltares brengt hierbij de inhoudelijke expertise in van MODFLOW en MetaSWAP, terwijl Tygron zijn GPU-ervaring en de bestaande watermodule in het Tygron Platform inbrengt. Voor de bredere achtergrond en gezamenlijke ambitie wordt verwezen naar paragraaf 1.4.

Voordat verder op de achterliggende vragen vanuit het waterschap wordt ingegaan, wordt eerst een toelichting gegeven op GPU-technologie.

1.2 GPU Technologie

Binnen de hydrologische modellering wordt in toenemende mate gekeken naar manieren om analyses op grotere schaal en met een hogere ruimtelijke resolutie uit te voeren. Een ontwikkeling die de laatste tijd in de aandacht staat is het gebruik van GPU-technologie. Tijdens een STOWA-workshop in 2025, die grotendeels inging op kansen voor GPU-technologie, hield Kees Vuik, hoogleraar numerieke wiskunde TU Delft, een pleidooi voor grootschaligere toepassing van GPU's in modellering. Volgens hem zouden CPU's in de toekomst niet veel sneller worden en men juist meer gebruik moet maken van de GPU 'explosie' (Vuik, 2025). Het grote aantal aanwezige waterschappers toonde in ieder geval de toenemende interesse en nieuwsgierigheid naar de GPU-technologie.

GPU's zijn in staat om grote aantallen vergelijkbare rekenstappen parallel uit te voeren, waardoor omvangrijke datasets efficiënt verwerkt kunnen worden en modellen potentieel fijnmaziger kunnen rekenen zonder dat rekentijden in gelijke mate toenemen. Dit komt omdat GPU's, in tegenstelling tot de (traditionele) CPU's, juist zijn ontwikkeld voor het uitvoeren van parallelle berekeningen. Een GPU kan een "enkele taak" minder snel, maar duizenden nagenoeg identieke taken kunnen veel efficiënter worden uitgevoerd.

Voor de watersector betekent dit dat GPU-technologie kansen biedt om analyses uit te voeren die dichter bij de fijnmazige werkelijkheid liggen, zeker voor lokale dynamische detailprocessen die gebaseerd zijn op lokale hoogteverschillen, zoals lokale afstromingspatronen en daarbij gepaard gaande lokale variatie in infiltratie.

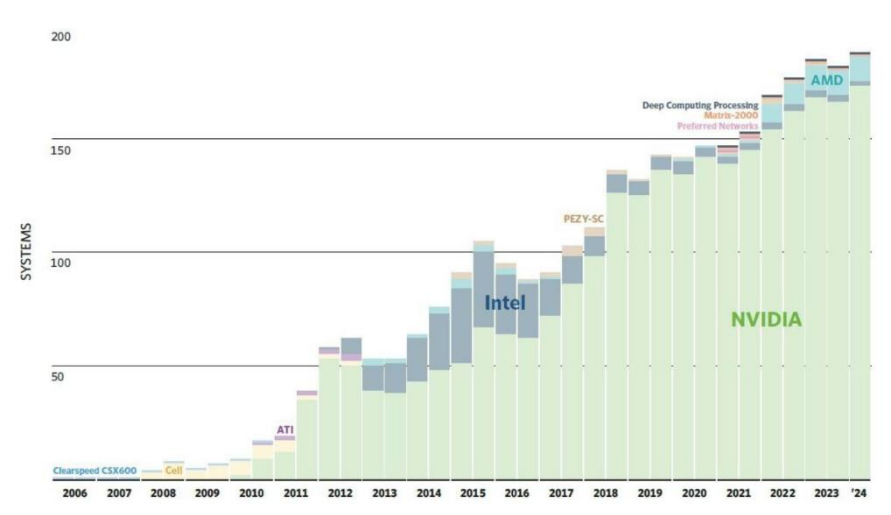
De hoge resolutieberekeningen op de GPU maken het mogelijk dat:

- Een directere en gedetailleerdere procesrepresentatie mogelijk is. Een voorbeeld daarvan zijn rivierkribben, die kunnen nu direct worden berekend vanuit het hoogtemodel en hebben geen complexe, empirisch bepaalde weerstand meer nodig (Buwalda, e.a. 2023).
- Simpelere preprocessing van invoerdata kan worden gerealiseerd; lokale variatie in de vegetatie hoeft bijvoorbeeld niet meer te worden gecombineerd tot een gemiddelde waarde.
- Resultaten beter herkenbaar en visueel inzichtelijk zijn, wat de communicatie met burgers en andere belanghebbenden ondersteunt.

Dit vraagt er wel om dat de software hiervoor geschikt moet zijn. GPU-technologie vereist rekenmodellen die opgebouwd zijn uit taken die goed kunnen worden opgesplitst in kleine, onderling grotendeels onafhankelijke brokjes (zoals gridcellen) en rekenstappen, die niet veel synchronisatie ertussen vragen. Vandaar dat veel GPU-modellering expliciet is i.p.v. impliciet rekent.

Intermezzo: technische toelichting op GPU-hardware (stand van zaken eind 2025):

- *Een enkele moderne GPU, zoals de NVIDIA Blackwell GB202 (2025), bevat tot 24.576 rekenkernen.*
- *Dankzij geavanceerde interconnect-technologieën zoals NVLink 5.0 en PCIe Gen5 kunnen meerdere GPU's binnen één systeem efficiënt samenwerken. In geavanceerde systemen zoals NVIDIA's NVL72 kunnen zelfs 72 GPU's volledig onderling verbonden worden. In standaard servers is samenwerking tussen 8 tot 10 GPU's gangbaar.*
- *Geheugentechnologieën zoals High Bandwidth Memory (HBM3e) zorgen voor extreem hoge geheugenbandbreedte (tot 4,8 TB/s), wat essentieel is voor het snel aanleveren van data aan de duizenden rekenkernen.*
- *Om de samenwerking tussen rekenkernen, geheugen en interconnects te optimaliseren, zijn uitgebreide softwareplatforms ontwikkeld. De bekendste hiervan is CUDA van NVIDIA, waarvan de ontwikkeling in 2004 begon en die officieel werd gelanceerd in 2007.*
- *GPU's vormen de ruggengraat van moderne AI-modellen zoals ChatGPT. De training van dergelijke modellen vereist zelfs tienduizenden GPU's, en het merendeel van de rekenkracht in de Top500-supercomputers wordt geleverd door GPU-gebaseerde systemen.*
- *Het aantal GPU-versnelde systemen is de afgelopen jaren sterk toegenomen. In 2025 draaien 384 van de 500 krachtigste supercomputers op NVIDIA-technologie, en 85% van de nieuwe systemen op de lijst maakt gebruik van GPU-acceleratie (zie figuur).*



Figuur 1: Toename van het aantal GPU systemen in de loop van de tijd (bron: Vuik, 2025)

Niet alle hydrologische modellen zijn ontworpen om optimaal te profiteren van GPU-technologie. Voor MODFLOW 6 is eerder een verkenning uitgevoerd door de USGS (Huges & White, 2013) wat de meerwaarde van inzetten op GPU-parallellisatie van MODFLOW was, maar de versnelling bleek destijds beperkt omdat slechts een deel van de numerieke structuur geschikt is voor GPU-verwerking. Een volledige overstap van de huidige, impliciete berekeningen in MODFLOW op GPU's vraagt om een fundamentele herformulering van de rekenkern, wat destijds niet is ingezet. In plaats daarvan heeft de USGS ervoor gekozen om, in samenwerking met Deltares, MODFLOW 6 te versnellen via CPU-parallellisatie.

Inmiddels hebben sinds 2013 de GPU's zich enorm ontwikkeld en het is de moeite waard om voor de huidige instrumentaria de balans op te maken, een visie te vormen en te onderzoeken hoe optimaal gebruik kan worden gemaakt van parallelle GPU-technieken in berekeningen van het grondwater, en ook te onderzoeken hoe de werelden van CPU-berekeningen en GPU-berekeningen beter op elkaar kunnen worden afgestemd.

1.3 Nadere duiding van de vragen vanuit het waterschap

In september 2025 vond een gesprek plaats tussen vertegenwoordigers van Tygron, Deltares en de waterschappen Vallei en Veluwe en Aa en Maas, gericht op het scherp krijgen van de wensen van het waterschap. Het gesprek ging in op wat voor het waterschap nodig is om te komen tot een toekomstbestendige modellering van het watersysteem, waarbij zowel snelle maaiveldprocessen als langzamere ondergrondse processen realistisch worden meegenomen. De belangrijkste punten die vanuit het waterschap (de waterschappen) is meegegeven, vormen het vertrekpunt voor de verdere verkenning en de oplossingsrichtingen die in de volgende paragrafen worden beschreven.

1. Snelle rekensnelheid en slim omgaan met hoge resoluties

Het waterschap wil een modelomgeving die grote datasets snel verwerkt en flexibel omgaat met hoge resoluties, vooral aan het maaiveld waar detail echt telt en hoge resolutie (in de orde grootte van 1 m) gewenst is. GPU-technologie ziet het waterschap als een logische stap vooruit. Het systeem moet daarbij slim rekenen: fijn waar detail waarde toevoegt, grover waar dat kan. Zo blijft het mogelijk om grote gebieden door te rekenen zonder onnodige rekentijd.

2. Integrale modellering van maaiveldsprocessen en regionale grondwaterwaterstroming

Het waterschap zoekt een aanpak waarin boven- en ondergrond als één geheel worden gemodelleerd. Processen zoals maaiveldafstroming, drainage, infiltratie en de dynamiek in de onverzadigde zone moeten fysisch logisch worden meegenomen. Het model moet kunnen omgaan met grote hoogteverschillen, met genoeg detail bovenin het systeem om realistische beleidsvragen te beantwoorden, en tegelijkertijd voldoende rekening houden met een kwalitatief goede beschrijving van de grootschalige regionale stroming. Integraliteit is belangrijker dan losse modules.

3. MODFLOW als basis voor validatie en uitlegbaarheid

Voor het waterschap blijft MODFLOW een vertrouwde standaard voor kalibratie, validatie en reproduceerbaarheid. Het hoeft niet vervangen te worden, maar moet wel dé referentie blijven waarmee Tygron-resultaten worden getoetst en verklaard.
De ideale situatie is een modelomgeving waarin de rekensnelheid van Tygron wordt gecombineerd met de processen in MODFLOW, inclusief de wijze waarop deze processen voor beschrijving in de stroming van het grondwater de afgelopen decennia zijn geborgd. Dat is nodig om vertrouwen op te bouwen binnen expertgroepen en richting bestuur.
Gewenste oplossingsrichtingen hoeven wat betreft het waterschap niet vast te liggen en zouden kunnen variëren van het ‘peer reviewed’ verbeteren en integraler maken van de bestaande Tygron grondwatermodule, tot het opzetten van een geïntegreerd concept waarin Tygron in MODFLOW goed met elkaar samenwerken, tot zelfs het helemaal berekenen van de grondwaterstromingsprocessen in MODFLOW op de GPU.

4. Stapsgewijze ontwikkeling met eenvoudige pilots

Het waterschap wil een opbouw in kleine stappen. Begin met overzichtelijke tests: bijvoorbeeld met eenvoudige (deel)modellen, basisvergelijkingen tussen bestaande grondwatermodellen en Tygron, en analyses van verschillen. Deze aanpak voorkomt snelle afwijzing van resultaten en zorgt voor een stevig fundament. De eerste stappen moeten vooral inzicht geven: waar komen modellen overeen, waar niet, en waarom?

5. Flexibiliteit voor hydrologische kennis en experimenten

Het waterschap vraagt om een modelomgeving die ruimte biedt voor experimenteren. Hydrologen moeten flexibel kunnen (blijven) werken met formules, iteraties en parametrisatie.

Dat geldt in ieder geval ook voor de onverzadigde zone, waar verschillende benaderingen eenvoudig implementeerbaar moeten zijn. De omgeving moet bruikbaar zijn voor zowel onderzoek als operationele vraagstukken.

6. Heldere visie, samenwerking en een lange-termijn perspectief
Tygron en Deltares worden aangemoedigd om samen over de langere termijn na te denken en mogelijkheden te onderzoeken naar een gezamenlijke, meerjarige richting, waarin uiteindelijk R&D, pilots, softwareontwikkeling en wetenschappelijke validatie moeten worden verbonden, om te kunnen bouwen aan een robuust, toekomstbestendig modelplatform voor hydrologische waterbeheer in Nederland.

1.4 Context van de verkenning en aanpak

Deze verkenning kan worden gezien als uitwerking van een al eerder ingezette, bredere verkenning van mogelijke samenwerking van Deltares en Tygron, met als doel hun complementaire krachten te bundelen en gezamenlijk meer maatschappelijke impact te realiseren.

Hierbij heeft Deltares uitgebreide domeinkennis over grondwatermodellering en CPU gebaseerde expertmodellen zoals MODFLOW en MetaSWAP. Deltares draagt bovendien direct bij aan ontwikkeling en beheer en onderhoud van de modelcode MODFLOW van de USGS, een instrumentarium dat inmiddels al meer dan 50 jaar een bewezen staat van dienst heeft en wereldwijd wordt toegepast.

Tygron heeft 20 jaar ervaring met visualisatie, simulatie en AI-modellen op GPU's, en heeft in de afgelopen jaren een instrumentarium ontwikkeld genaamd het Tygron Platform. In deze cloudomgeving worden dagelijks duizenden hoge resolutie GPU-berekeningen (circa 0,5 tot 2 meter) uitgevoerd op verschillende domeinen, zoals overstromingen, hittestress, geluid, AI-objectherkenning en biodiversiteit. Binnen het platform zijn de oppervlakkige hydraulische processen inmiddels uitontwikkeld en al toegepast voor meerdere waterschappen. De grondwatermodule en uitwerking van de onverzadigde is echter nog in ontwikkeling.

De gezamenlijke ambitie van Deltares en Tygron is om bestaande in Nederland toegepaste modelinstrumentaria zodanig door te ontwikkelen dat:

- modellen sneller en nauwkeuriger gaan rekenen binnen een interoperabel, schaalbaar modellenlandschap, waarmee gebruikers geïntegreerde analyses op verschillende schaalniveaus kunnen uitvoeren.
- kennis en expertise in Nederland worden gebundeld om als Nederland internationaal koploper te blijven op het gebied van geavanceerde watermodellen, inclusief de toepassing van GPU-technologie en AI. Dit past zowel in de speerpunten van de Nederlandse overheid als de EU.

Deze verkenning is vormgegeven door middel van een reeks gesprekken en inhoudelijke discussies met vertegenwoordigers van Tygron en Deltares, over de gebruikte concepten en onderliggende technieken in Tygron en MODFLOW-MetaSWAP en een systematische vergelijking van de modelconcepten en aannames in beide benaderingen.

Op voorhand is gezien de vragen van het waterschap bewust niet ingezet op een volledige modelimplementatie of prestatiebenchmark, maar op het identificeren van kansen, beperkingen en mogelijke synergiën tussen de verschillende modelaanpakken. Vervolgens zijn de resulterende denkrichtingen besproken en verder uitgewerkt, en zijn de stappen benoemd die op korte én langere termijn kunnen worden gezet. Bij de uitwerking is het

beheergebied van Waterschap Vallei en Veluwe steeds als casus gebruikt, door samen te doordenken wat de voorgestelde modelaanpak in dit gebied zou kunnen betekenen.

1.5 Casus Veluwe

De verkenning is toegespitst op het beheergebied van Waterschap Vallei en Veluwe, waar een bijzondere mix van hydrologische processen samenkomt. In de hogere delen van de Veluwe leiden omvangrijke infiltratiegebieden tot een diepgelegen regionale stroming richting onder meer de Flevopolder. Aan de randen (bijv. rond de randmeren) bepalen zowel grote regionale als ondiepe kwelstromen de dynamiek van de hydrologische deelsystemen en beïnvloeden zij de lokale grondwateraanvulling en ontwatering. Ook zijn er gebieden die sneller en directer reageren op neerslagbuien, zoals rond de Eem, waar oppervlakkige afstroming, snelle drainage en korte verblijftijden een belangrijkere rol spelen.

Deze combinatie van diepe regionale stroming, ondiepe kwelpatronen en snel reagerende systemen en maaiveldprocessen is te verklaren uit de geohydrologische, gelaagde opbouw van de ondergrond, inclusief de invloed van de oppervlaktewatersystemen, zoals het al dan niet ingesneden zijn van waterlopen of het vrijwel ontbreken daarvan. Door de grote variatie aan processen, schaalniveaus en fysische condities vormt het beheergebied daarmee een geschikt referentiekader voor deze verkenning. Het gebied stelt hoge eisen aan de onderliggende concepten in één modelinstrumentarium of in samenhangende hydrologische modelinstrumentaria, omdat zowel langzame als snelle processen realistisch en consistent in de modelconcepten moeten worden beschreven.

2 Oplossingsrichtingen op hoofdlijnen

Op basis van de verdiepende gesprekken tussen Tygron en Deltares onderscheiden we op hoofdlijnen twee oplossingsrichtingen: een volledig GPU-gebaseerde berekening en een hybride CPU-GPU benadering.

De **eerste denkbare oplossingsrichting is een volledig GPU-gebaseerde berekening van het grondwater,** waarbij er grofweg 2 smaken zijn:

- 1a. alle MODFLOW-processen worden naar de GPU overgebracht.
- 1b. de berekeningen in Tygron worden meerlaags (een of meerdere modules).

Hoewel **oplossingsrichting 1a** inhoudelijk aantrekkelijk lijkt, vanwege verwachte toenemende rekensnelheden bij de opkomende generatie supercomputers, zijn Deltares en Tygron het er over eens dat deze route op korte tot middellange termijn niet realistisch is. Dit wordt hieronder verder toegelicht.

MODFLOW is ontworpen voor CPU-gebaseerde systemen en in de afgelopen jaren sterk geoptimaliseerd via zogenaamde parallelle threads en communicerende processen (MPI). In principe werken GPU's op dezelfde manier met threads en optioneel MPI, alleen dan op een grotere schaal ('massively parallel'). Het is echter de vraag of alle MODFLOW algoritmen efficiënt gebruik kunnen maken van verregaande parallellisatie ('strong scaling') of dat bepaalde onderdelen beperkt parallel kunnen dan wel veel synchronisatie overhead hebben ('weak scaling').

Een overstap van MODFLOW 6 naar GPU zou daarom een ingrijpende project worden:

1. CPU- en GPU-programmering zijn verschillende specialismen, waardoor er meerdere domeinexperts nodig zijn.
2. Pre- en post-processing, zoals de rasterisatie van geo-data, vereist door de hogere resolutie een overgang van miljoenen naar miljarden gridcellen, wat extra eisen stelt aan de dataverwerkingsalgoritmen.
3. Niet alle MODFLOW-gebruikers zullen in de komende jaren over krachtige GPU-clusters beschikken. Dit zou betekenen dat er ofwel in hardware geïnvesteerd moet worden of dat er een gedeelde codebasis voor zowel CPU als GPU moet worden ontwikkeld (dubbele kosten).
4. Het is op voorhand onduidelijk of de gewenste oplossingen in GPU-vorm tot voldoende versnelling zullen leiden.

De totale investering die nodig zou zijn om een volledig GPU-gebaseerde MODFLOW-variant te ontwikkelen – van fundamenteel onderzoek tot een stabiele, gevalideerde operationele implementatie – staat daarmee niet in verhouding tot de beschikbare middelen van de Nederlandse watersector en zou bovendien het bestaande commitment van capaciteit aan MODFLOW-werkzaamheden voor de USGS in gevaar brengen. Daarom moet ervan worden uitgegaan dat MODFLOW 6 de komende jaren gebaseerd blijft op CPU-berekeningen, gecombineerd met parallelle verwerking via MPI.

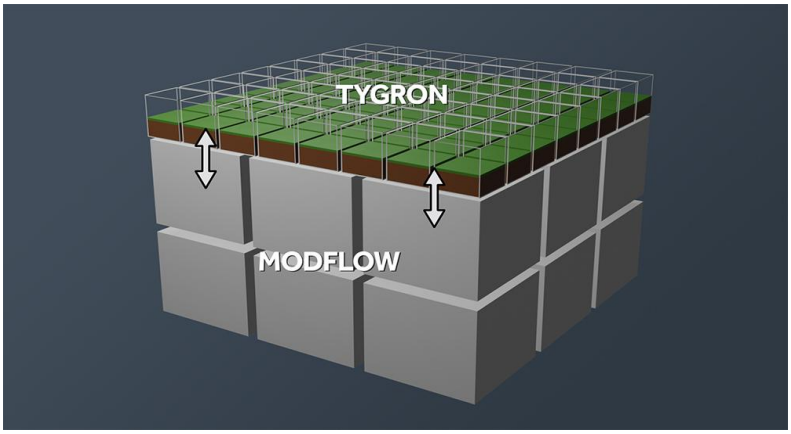
Oplossingsrichting 1b voor een volledig GPU-gebaseerde grondwaterberekening omvat het integreren van alle of een deel van de functies van MODFLOW en MetaSWAP in Tygron. Dit zou kunnen door een nieuwe integrale rekenkern, inclusief wiskundige basis, te ontwikkelen, of door afzonderlijke GPU-gebaseerde componenten te koppelen tot een meerlaagse module.

Het voordeel van deze 1b-route is dat punten 1, 2 en 3 deels kunnen worden opgelost. Echter, het blijft een aanzienlijke investering, met vooraf onzekere factoren over de vraag of alle noodzakelijke processen en functionaliteiten in een GPU-formulering goed schalen en voldoende versnelling bieden. Hierdoor is het vooral een optie voor de lange termijn. Onder ‘lange termijn’ verstaan we een meerjarig traject, waarbij de technische en conceptuele aanpassingen omvangrijk zijn en de haalbaarheid op voorhand niet vast staat.

Het is daarom realistischer om te onderzoeken waar GPU-technieken op specifieke aspecten tot verbeteringen kunnen leiden, al dan niet in combinatie met CPU gebaseerde technieken. Daarbij kan ook geleerd worden van andere benaderingen op de GPU, zoals hydrologische modellering met ParFlow (Hokkanen et al., 2021).

De tweede oplossingsrichting is een hybride CPU-GPU-benadering, waarin het Tygron Platform de snelle maaiveldprocessen en de interactie met het ondiepe grondwater op hoge ruimtelijke resolutie berekent, terwijl MODFLOW de meerlaagse regionale grondwaterstroming op lagere resolutie berekent. Dit sluit goed aan bij de verschillen in procesdynamiek van beide modellen en verenigt zo de sterke kanten van beide benaderingen.

Voor deze oplossingsrichting is een helder koppelvlak nodig tussen beide modellen, al dan niet met een overlappend deeldomein. Een mogelijke uitwerking is om aan te sluiten bij de bestaande werkwijze in het NHI, waarbij op het freatische niveau een koppelvlak wordt gelegd tussen MetaSWAP en MODFLOW. Vanuit MODFLOW kunnen dan tijdsafhankelijke stijghoogtes en weerstanden aan Tygron worden doorgegeven. Zowel een offline data-uitwisseling (met regionale berekeningen op regionale rekenservers) als een online koppeling met MODFLOW berekeningen op de CPU’s (via de MODFLOW-API) is daarbij in principe mogelijk, afhankelijk van de gewenste rekencyclus en het detailniveau van de toepassing. Deze route vraagt nader onderzoek naar efficiënte gegevensuitwisseling tussen CPU en GPU-berekeningen, zowel in data interactie als in geheugengebruik.



Figuur 2: een hybride aanpak van Tygron op GPU’s en MODFLOW op CPU’s.

Via deze route zou uiteindelijk een instrumentarium kunnen ontstaan waarin Tygron op de GPU de fijnmazige processen nabij het maaiveld en eventueel de onverzadigde zone simuleert, terwijl MODFLOW op de CPU de diepere grondwaterstroming berekent. Zo ontstaat een hybride modelopzet waarin detail aan het oppervlak wordt gecombineerd met een fysisch consistente beschrijving van de ondergrond. Aanbevolen wordt dit stap voor stap te onderzoeken en te verfijnen, zodat de aanpak snel in de praktijk kan worden getest en toegepast.

De hybride aanpak op gangbare koppelvlakken heeft een aantal voordelen:

- Het Tygron Platform voegt oppervlakkige afstroming toe en een hoge resolutie voor directe numerieke interactie met het grondwater.
- MODFLOW heeft al de componenten voor meerlaagse stroming van grondwater en kan deze processen op grovere resolutie betrouwbaar beschrijven.
- Door aan te sluiten bij bestaande koppelvlakken op het freatisch grondwater, kan (uiteindelijk) makkelijker worden aangesloten bij bestaande simulaties van de waterbeheerders en biedt dit meer mogelijkheden om voorberekende tijdsafhankelijke stijghoogtes en weerstanden vanuit een MODFLOW model te combineren met berekeningen in Tygron en minder inspanningen om desgewenst uiteindelijk online koppelingen (via de MODFLOW 6 API) te realiseren.

Daarbij moet worden beseft dat hier nog wel de nodige conceptuele uitdagingen inzitten. Denk bijvoorbeeld aan het goed aansluiten van de modelschematisaties en het overbruggen van het verschil in ruimtelijke schaalniveaus. Dit is zeker relevant als MODFLOW werkt met grovere cellen (groter dan 25 m), terwijl Tygron op 1-meterschaal rekent.

Een voorwaarde voor het realiseren van de hybride oplossingsrichting is dat de conceptuele benaderingen in Tygron en MODFLOW goed op elkaar aansluiten. Zoals eerder beschreven, is de huidige grondwatercomponent in Tygron pas recent ontwikkeld en bevindt zich nog in een vroege fase van doorontwikkeling. De gehanteerde concepten zijn daardoor nog beperkt, zeker in vergelijking met de gedetailleerde en decennialang doorontwikkelde modelconcepten in MODFLOW. Dit geldt ook voor de beschrijving van de onverzadigde zone en de interactie tussen onverzadigde en verzadigde stroming in Tygron, die verdere verfijning vragen om tot een robuuste aansluiting of zelfs vervanging te kunnen komen.

Deze verkenning richt zich daarom in eerste instantie op wat nodig is om de combinatie-route op korte termijn mogelijk te maken. Dat vraagt vooral om het uitbreiden en aanscherpen van enkele kernconcepten in het Tygron Platform, zodat een nieuwe versie kan worden gekoppeld aan MODFLOW en kan dienen als basis voor vervolgonderzoek.

Een belangrijk voordeel van deze oplossingsrichting is dat er in samenwerking tussen Tygron en Deltares incrementeel kan worden doorontwikkeld, via opeenvolgende versies die stap voor stap worden getest, verbeterd en gevalideerd. Wanneer de combinatie stabiel en betrouwbaar blijkt, kan op termijn ook worden verkend of verdere opschaling richting een volledig GPU-gebaseerde grondwaterberekening uiteindelijk haalbaar is.

Uit voorgaande beschouwingen blijkt dat het vergelijken en verder afstemmen van de gehanteerde concepten voor stroming in de ondergrond in het Tygron Platform en het MODFLOW-MetaSWAP instrumentarium een no-regret stap is. Daarom wordt in de volgende hoofdstukken eerst verder ingegaan op de beschrijving van de hydrologische processen.

Vanwege de jarenlange doorontwikkeling van MODFLOW, wordt de inhoudelijke concepten in MODFLOW hier als ‘geavanceerder’ en ‘gangbaar’ gezien in de huidige modelleerpraktijk. De hierin beschreven concepten kunnen dan ook meer als referentie aanpak worden beschouwd, waarmee Tygron-resultaten uiteindelijk aan kunnen worden getoetst, rekening houdend met de schaalverschillen in beide benaderingen.

3 Beschrijving van de hydrologische processen

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de conceptuele benaderingen van de hydrologische processen beschouwd in het Tygron Platform en in MODFLOW, in combinatie met MetaSWAP, zoals toegepast in AZURE 2.0 en dus de huidige grondwatermodelleringspraktijk van het waterschap. Bij het lezen is het goed te beseffen dat beide modelinstrumenten een verschillende invalshoek hebben.

In het Tygron Platform ligt de focus op de oppervlakkige processen nabij het maaiveld, waarbij oppervlaktewaterstanden dynamisch en hydraulisch worden berekend op basis van afstroming en het oppervlaktewatersysteem. Hierdoor ontstaan dynamische oppervlaktewaterstanden die fungeren als randvoorwaarde voor grondwaterberekeningen. De uitwisseling met de diepere grondwaterlagen kan als randvoorwaarde worden meegenomen via een lekterm, maar alleen het ondiepe grondwater wordt expliciet in de simulatie betrokken.

In AZURE 2.0 bestaande uit MODFLOW-MetaSWAP modellen wordt zowel de ondiepe als de diepere ondergrond gesimuleerd, maar worden de oppervlaktewaterstanden constant verondersteld of als voorberekende tijdsafhankelijke invoer opgelegd aan de grondwaterberekeningen.

3.2 MODFLOW-MetaSWAP

3.2.1 Scope en rol in het instrumentarium

In het AZURE instrumentarium van het waterschap fungeert MODFLOW 6 als de rekenkern voor de verzadigde, meerlaagse grondwaterstroming op regionale schaal, terwijl MetaSWAP de processen in de onverzadigde zone efficiënt benadert, inclusief de interactie met de atmosfeer en de uitwisseling met gewassen.

De berekening van de onverzadigde zone in MetaSWAP is gebaseerd op een stationaire benadering van bodemvochtprofielen, waarbij de Richards-vergelijking wordt benaderd via tabellen met metarelaties tussen vochtgehalte, drukhoogte en verticale fluxen bij verschillende grondwaterstanden.

MODFLOW en MetaSWAP zijn online gekoppeld via zogenoemde shared state variables. Beide modellen delen één freatische grondwaterstand, en per tijdstap worden de relevante variabelen — waaronder fluxen en veranderingen in de berging — uitgewisseld. In samenspel bepalen de modellen daarmee hoe snel de grondwaterstand reageert op fluxveranderingen in de onverzadigde zone. Voor een nadere toelichting wordt verwezen naar Van Walsum & Veldhuizen (2011). Naast de standaard koppeling tussen MODFLOW en MetaSWAP is er een optie om voor profielen met grote onverzadigde zones de koppeling uit te breiden met transferfuncties al dan niet in combinatie met een UZF-package, om de extra vertraagde grondwateraanvulling te simuleren. In recente versies van AZURE wordt hier ook gebruik van gemaakt.

Vanuit MODFLOW bezien berekent MetaSWAP de grondwateraanvulling, afgestemd op de toestandsvariabelen in MODFLOW. Vanuit MetaSWAP bezien bepaalt MODFLOW de onderrandvoorwaarde, in overeenstemming met de uitwisseling met gewassen en de atmosfeer. Daarbij worden de randvoorwaarden van de modellen elke tijdstap afgestemd. Wanneer er bijvoorbeeld wordt beregend uit grondwater vindt aanvullende uitwisseling tussen beide modellen plaats. MetaSWAP bepaalt in dat geval de beregeningsflux op basis van de actuele bodemtoestand en vooraf door de gebruiker gedefinieerde triggers voor beregening. De resulterende onttrekking wordt vervolgens doorgegeven aan de berekening van stroming in de ondergrond in MODFLOW.

Binnen het traject Vervanging MetaSWAP wordt gewerkt aan een koppeling tussen SWAP en MODFLOW 6. Naast het uitgebreide SWAP-model, waarin de Richards-vergelijking volledig wordt opgelost, wordt ook een snellere benadering ontwikkeld: de sequential steady state-methode (Kok en Leander, in prep.); die conceptueel aansluit bij de werkwijze van MetaSWAP en de koppeling met MODFLOW.

3.2.2 Interacties tussen grond- en oppervlaktewater

Voor de uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater hanteert MODFLOW Robin-randvoorwaarden (Jazayeri en Werner, 2019) met een niet-lineaire Q–ΔH-relatie. In regionale toepassingen worden met name de RIV- (River), GHB- (General Head Boundary) en DRN- (Drain) packages gebruikt. Hier volgt een beknopt overzicht, voor meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar de bijlage:

- De General Head Boundary (GHB)-package beschrijft een Robin-randvoorwaarde door een extern waterniveau te combineren met een conductance. De flux wordt simpelweg bepaald door het stijghoogteverschil maal de conductance. Deze benadering wordt vooral toegepast voor grotere waterlichamen die het watervoerende pakket voldoende diep doorsnijden.
- De River-package (RIV) is de meest gebruikte optie voor het beschrijven van de interactie met het oppervlaktewater. Dit package werkt voor drainerende condities hetzelfde als de GHB-package, maar voegt kenmerken toe voor infiltrerende condities en voor de situatie waarin de grondwaterstand onder het niveau van de waterloop zakt[2].
- Drainage wordt in MODFLOW geschematiseerd met de Drain-package (DRN). De DRN-package functioneert hetzelfde als de GHB-package, maar is alleen actief als de grondwaterstand boven het ingestelde drainageniveau ligt. Er vindt dus geen infiltratie plaats als de grondwaterstand daaronder zakt.
- Een bijzondere toegepaste vorm van drainage is de maaiveldsdrainage (Surface Overland Flow package in iMOD), waarbij de maaivelddrain op vergelijkbare wijze als de standaard Drain-package ondiepe grondwaterstanden nabij het maaiveld kan aftoppen.

Het is aan de modelleur hoe de interactie tussen grond- en oppervlaktewater precies wordt geparametriseerd. Er kan gebruik worden gemaakt van de standaard MODFLOW-benadering, waarbij een conductance wordt afgeleid uit o.a. de intreeweerstand en de afmetingen van de waterlopen, maar doorgaans wordt in NHI-toepassingen (waaronder AZURE) gewerkt met parameters waarbij effectieve weerstanden zijn geschaald om het effect van kleinschalige processen binnen grotere modelcellen te representeren (zoals in AZURE, met 200–400 m gridcellen). Dit gebeurt vaak met formules van De Lange of Ernst, zie een uitgebreidere toelichting hierop in het volgende intermezzo, met informatie uit de NHI-workshop (2020).

[2] Opgemerkt dat het in regionale modellen gebruikelijk is te werken met een infiltratiefactor, hoewel dit niet standaard MODFLOW 6 is. Dit was standaard mogelijk in iMODFLOW (MODFLOW 2005) en wordt in de praktijk in MODFLOW 6 toegepast door gebruik te maken gestapelde river en drainpackages, dit resulteert effectief in een niet-lineaire relatie van de interactie grondwater-oppervlaktewater (zie ook de informatie in de bijlage).

Intermezzo: resultaten uit NHI workshop 2020

Op 3 december 2020 vond een NHI-expertworkshop plaats over de modellering van de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater met een aantal experts op dit gebied en vertegenwoordigers van het NHI. Doel was om te komen tot consensus over de te hanteren modelconcepten in regionale en landelijke NHI-toepassingen.

In verschillende presentaties zijn de belangrijkste analytische en numerieke benaderingen beschouwd; de klassieke MODFLOW-benadering (RIV-package), formules van Ernst (1962), De Lange (1998) en Bruggeman (1972). Daarnaast is ingegaan op een nieuw ontwikkelde tool iGrOw. Deze applicatie biedt een visueel en interactief hulpmiddel om de fysische processen binnen een modelcel inzichtelijk te maken en verschillende conceptuele keuzes te toetsen. Geconcludeerd is dat de tool waardevol is om gevoeligheden te verkennen.

Casussen lieten zien dat de standaard MODFLOW-RIVER-benadering onder slechts beperkte omstandigheden geschikt is. De ruimtelijke schaal van de fysieke processen die een rol spelen in de grondwater-oppervlaktewater interactie zijn namelijk vaak aanzienlijk kleiner dan de schaal van de cellen van de regionale grondwater modellengangbaar is, waardoor dit bij directe toepassing voor grotere modelcellen mis kan gaan. Vooral horizontale en radiale stroming en grondwaterstanden in cellen met sloten worden dan onjuist berekend.

De Ernst-benadering werkt goed bij lineair gedrag, maar overschat weerstanden wanneer non-lineaire processen zoals taluduitstroming meespelen. De analytische benadering van De Lange is uitgewerkt in python tools, maar de toepassing blijft uitdagend.

De herziening "Ernst 2020" biedt een verbeterd concept met vier deelweerstanden die gezamenlijk de grondwater-oppervlaktewaterinteractie bepalen en goed aansluiten bij numerieke berekeningen:
1. *de in- en uittredeweerstand van de slootbodem;*
2. *de radiale weerstand die ontstaat door convergentie van stroombanen nabij de waterloop;*
3. *verticale weerstanden in het freatische pakket;*
4. *de laterale weerstanden in het freatische pakket.*

Toepassing in de praktijk vraagt echter nog altijd veel keuzes van de modelleur, bijvoorbeeld door gelaagdheid, variabele slootpeilen en verschillen in celgrootte. Een robuust protocol voor parameterbepaling is daarom wenselijk. De workshop leidde tot een duidelijk advies voor de beschrijving van de interactie tussen grond- en oppervlaktewater in NHI-toepassingen (gebaseerd op MODFLOW – MetaSWAP):

Gebruik Ernst 2020 bij één freatisch pakket, De Lange (1998) in Holoceen-gebieden en Hooghoudt waar buisdrainage dominant is. Daarnaast werd aanbevolen om de iGrOw applicatie te benutten als toetsingsinstrument om specifieke casussen verder te onderzoeken, en waar nodig in vervolgsessies verdere aandacht te besteden aan de parametrisatie en de praktische toepassing ervan en aan eventuele toekomstige aanscherping van het advies.

3.2.3 Onverzadigde-zone benadering (MetaSWAP)

MetaSWAP hanteert een efficiënte methode om processen in de onverzadigde zone op regionale schaal te modelleren. Het model maakt gebruik van een database met vooraf uitgevoerde, stationaire berekeningen, die zijn afgestemd op vergelijkbare SWAP-simulaties. Hierdoor kan de waterbalans tijdens runtime worden bepaald zonder dat de volledige Richards-vergelijking numeriek hoeft te worden opgelost.

In de berekeningen worden per modelcel de karakteristieke bodem- en gewaseigenschappen als modelinvoer opgegeven. Dit betreft onder meer het bodemtype — doorgaans gebaseerd op bodemfysische eenheden (meestal 79 BOFEK-eenheden, of een uitgebreidere set met 370 eenheden) — en het landgebruikstype, inclusief de daaraan gekoppelde gewas- en verdampingsparameters. Daarnaast wordt bijvoorbeeld aangegeven of in een cel kan worden beregend, en zo ja, of dit uit grondwater afkomstig is of uit oppervlaktewater.

3.2.4 Randvoorwaarden en klimaat-vegetatie interacties

MetaSWAP bevat verschillende verdampingsconcepten, waaronder interceptie, bodemverdamping en gewasverdamping. Voor de beschrijving van gewasverdamping zijn meerdere opties mogelijk:

1) Penman–Monteith in combinatie met een dynamisch gewasgroeimodel (WOFOST).
2) Verdamping door berekening van het uitgebreide Penman–Monteith-concept binnen MetaSWAP, in combinatie met gewasspecifieke eigenschappen.
3) Opgeven van referentieverdamping of open waterverdamping, toe te passen in combinatie met (tijdsafhankelijke) gewasfactoren.

In MetaSWAP kan de potentiële gewasverdamping worden gereduceerd tot de actuele verdamping met behulp van de Feddes-functie. Deze functie beschrijft hoe droogtestress optreedt bij toenemende drukhoogten in de onverzadigde zone, waarbij per gewas specifieke drukhoogtepunten kunnen worden gespecificeerd.

Voor de onverzadigde zone berekeningen is de worteldiepte een bepalende factor. Afhankelijk van de gekozen optie wordt deze statisch ingevoerd of dynamisch berekend via WOFOST.

3.2.5 Oppervlakkige afstroming

Het maaiveld wordt gerepresenteerd in MetaSWAP, maar oppervlakkige afstroming wordt niet als afzonderlijk proces berekend. Als de neerslaghoeveelheid groter is dan de infiltratiecapaciteit dan kan water op het maaiveld worden geborgen. Als de door de gebruiker gespecificeerde maaiveldsberging wordt overschreden dan wordt het water uit het model gevoerd (Hortonian runoff). Ook is het mogelijk dat het bodemprofiel van onderuit wordt verzadigd, en de grondwaterstand boven het maaiveld uitstijgt en tot afvoer via het maaiveld komt (Dunnean overland flow). Met deze benadering van het maaiveld, wordt dus geen stromingsproces tussen de MetaSWAP cellen gesimuleerd, waardoor lokale effecten van maaiveldreliëf en kleinschalige ingrepen buiten beeld blijven.

Als MetaSWAP gekoppeld is aan een oppervlaktewatermodule (bijv. Ribasim, zie verderop) dan wordt dit water geloosd in het oppervlaktewaterbasin, als er geen oppervlaktewater-module wordt gebruikt, dan is de runoff uitsluitend een resulterende uitterm in de waterbalans.

3.2.6 Sterktes en aandachtspunten voor de casus Veluwe

- Sterktes: robuuste, uitlegbare representatie van meerlaagse (diepe) stroming van het grondwater, aangevuld met de uitgebreidere benadering van de onverzadigde-zone via MetaSWAP, die is afgestemd op gedetailleerde SWAP-berekeningen;
- Bewezen praktijk voor grondwater gecentreerde studies en beleidsanalyses, waarvoor langjarige berekeningen kunnen worden ingezet.
- Aandachtspunten:

- beperkte expliciete beschrijving van fijnmazige maaiveldprocessen en dynamische waterstanden in het oppervlaktewatersysteem en noodzaak van geaggregeerde weerstanden en zorgvuldige parameterisatie om schalingsfouten te voorkomen;
- voor dikke onverzadigde zones (> 5 m) is aanvullend een transferfunctie nodig (zoals is gerealiseerd in AZURE);
- rekentechnische grenzen bij zeer hoge resoluties en lange simulaties.

3.3 Tygron Platform

3.3.1 Scope en rol in het instrumentarium

Het Tygron Platform bevat verschillende modules, die uit of aan kunnen worden gezet en vervolgens integraal met elkaar kunnen doorrekenen in dezelfde GPU-rekenkern.

1. Oppervlakkige afstroming op hoge resolutie (circa 0,5 tot 2 meter) op basis van de ondiepwatervergelijkingen (Saint-Venant).
2. Vereenvoudigde oppervlakkige afstroming op basis van gemiddelde waterstanden in watergangen en verdeling over het land (vooral nuttig voor poldersystemen meerdere jaren doorrekenen).
3. Grondwater op basis van een onverzadigde zone, een eenlaags grondwaterlaag en koppelvlak met diepere ondergrond.
4. Grondwater op basis van alleen infiltratie en berging (vooral nuttig voor stresstesten).

Voor deze casus waarin detail en lokale interacties centraal staan gaan we uit van de ondiepwatervergelijkingen voor oppervlak (1) en het eenlaags grondwatermodel (3).

3.3.2 Interacties tussen grond- en oppervlaktewater

Binnen het Tygron Platform is de invalshoek de oppervlakkige processen nabij het maaiveld en worden de oppervlaktewaterpeilen hydraulisch berekend op basis van zowel afstromingsprocessen als het oppervlaktewatersysteem zelf. Hierdoor ontstaan dynamische oppervlaktewaterstanden die fungeren als randvoorwaarde voor de grondwaterberekeningen.

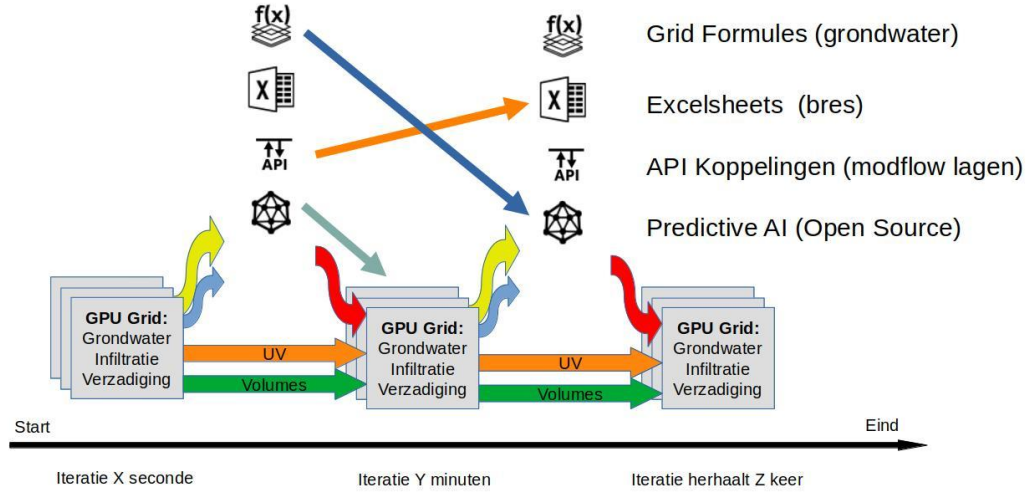
Vervolgens hangt de interactie tussen grond- en oppervlaktewater sterk af van de mate waarin een watergang het watervoerende pakket doorsnijdt. Bij volledige doorsnijding is de grondwaterstand ter plaatse gelijk aan het oppervlaktewaterpeil. Dit principe is in Tygron geïmplementeerd en komt binnen MODFLOW6 het meest overeen met de CHD-package.

In de praktijk doorsnijden watergangen het watervoerende pakket meestal niet volledig. De grondwaterstand langs de waterloop wijkt dan af van het oppervlaktewaterpeil. In MODFLOW wordt deze situatie geschematiseerd met Robin randvoorwaarden, waarbij de flux tussen grond- en oppervlaktewater wordt bepaald door het stijghoogteverschil tussen het grond- en oppervlaktewater (ΔH) en een opgegeven weerstand.

In Tygron kan in het geval van infiltratie (o.a. vanuit oppervlaktewater) een maximale capaciteit worden opgegeven via de *surface infiltration* en *ground infiltration* parameters. Het Tygron Platform kent standaard geen Robin-randvoorwaarde waarin een expliciete bodemweerstand wordt meegenomen. Wel kan een effectieve weerstand benaderd worden door de horizontale doorlatendheid in de randcellen langs de waterloop aan te passen. Hierbij wordt de actuele grond- en oppervlaktewaterstand gebruikt. Omdat celwanden schuin kunnen liggen, verschilt de waterstand binnen één cel sterk. Bij een wandhoek van bijvoorbeeld 45 graden kan links nog water staan terwijl het rechts al droog is. Dit wordt met

een wiskundige correctie realistisch verrekend. Dit resulteert echter nog steeds in een lineaire Q–ΔH-relatie. Een niet-lineariteit, meer vergelijkbaar met de MODFLOW-benadering, zou via het beschikbare iteratieve rekenmechanisme in Tygron kunnen worden gerealiseerd, bijvoorbeeld als een grondwaterstand een grenswaarde bereikt.

Binnen dit iteratieve rekenmechanisme in Tygron kunnen variabelen in de schematisatie tijdens de simulatie dynamisch worden aangepast op basis van andere modelvariabelen, door gebruik te maken van door de gebruiker vooraf gedefinieerde formules. Hierdoor ontstaat bijvoorbeeld de mogelijkheid om de effectieve weerstand afhankelijk te maken van het actuele slootpeil en de lokale grondwaterstand. Gezien het groot aantal mogelijkheden hierin is deze aanpak binnen deze verkenning niet verder beschouwd en komt daarom verderop terug bij de aanbevelingen voor verdere doorontwikkeling. Er wordt wel opgemerkt dat uiteindelijk in de praktijk de parametrisatie beperkender kan zijn dan de gehanteerde modelconcepten.



Figuur 3: Iteratief rekenmodel in Tygron Platform

3.3.3 Processen grond- en oppervlaktewater en het gehanteerde schaalniveau

De processen die de interactie tussen grond- en oppervlaktewater bepalen, worden in hydrologische modellen op verschillende manieren benaderd. In sommige gevallen hangt de parametrisatie bovendien sterk af van de gekozen ruimtelijke schaal. Een belangrijk aandachtspunt hierbij is dat de schaal van de onderliggende fysieke processen veel kleiner kan zijn dan de celgrootte, zoals bij regionale MODFLOW-modellen.

De eerder genoemde NHI-werkgroep concludeerde in 2020 dat de interactie tussen grond- en oppervlaktewater in essentie een schalingsprobleem is: “*wanneer een modelleur zeer fijne cellen hanteert, zouden de relevante processen in principe expliciet worden gesimuleerd*”, zoals in Tygron het geval is bij ondiep grondwater.

Voor de verdere afstemming tussen Tygron en MODFLOW betekent dit dat dezelfde analytische formules kunnen worden gebruikt als binnen iGrOw (zie intermezzo). De iGrOw-applicatie zou daardoor als ‘grensrechter’ kunnen dienen om te beoordelen of Tygron- en MODFLOW-modellen, ondanks verschillen in schaal, conceptueel consistent kunnen worden gemaakt. Een alternatieve aanpak is het opzetten van een zeer gedetailleerd MODFLOW-model voor een klein gebied, met een ruimtelijke resolutie vergelijkbaar met die van Tygron. Dit kan worden gebruikt als benchmark; een recente toepassing hiervan is beschreven in het artikel van De Lange et al. (2025). In het volgende intermezzo wordt een

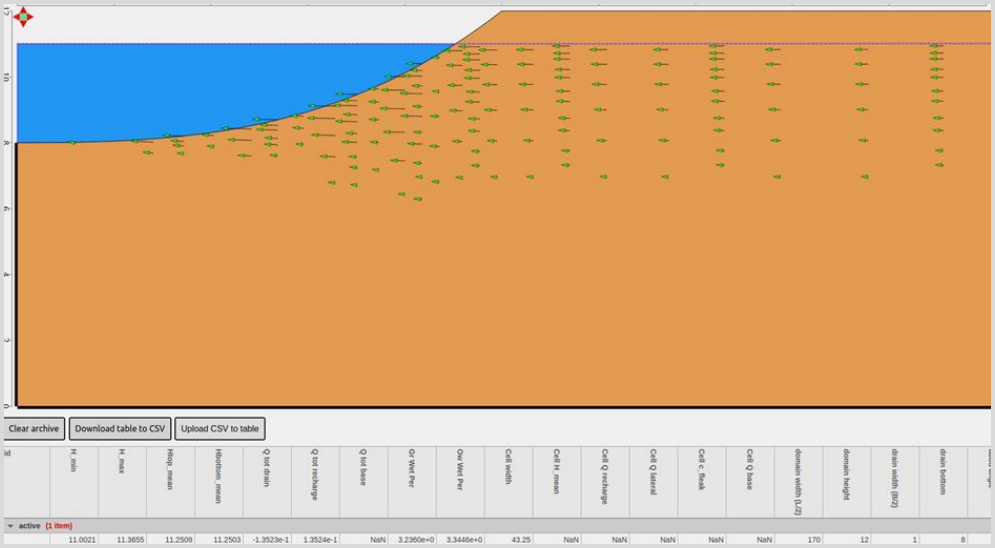
eerste snelle test gepresenteerd waarin is onderzocht of iGrOw inderdaad bruikbaar is als grensrechter voor het verder afstemmen van de grond-oppervlaktewaterrelatie tussen Tygron en MODFLOW. Het betreft een eenvoudig eenlaagsmodel ter illustratie, in de wetenschap dat voor het testen van het Veluwe systeem complexere testen nodig zullen zijn.

Intermezzo: testberekeningen Tygron en vergelijking met iGrOw

Om te testen of iGrOw in het vervolgproces kan worden gehanteerd als benchmark en een vergelijking kan worden gemaakt met de voorgetelde aanpak in de NHI-workshop over de interactie grond- en oppervlaktewater (zie eerder intermezzo) is een eerste experiment gedaan met een vergelijking met Tygron.

Een veelvoorkomende situatie in regionale watersystemen is een watergang die het watervoerende pakket volledig doorsnijdt, waarbij de peilopzet wordt bepaald door neerslag in de omgeving die via infiltratie en ondergrondse stroming wordt afgevoerd.

*Voor deze verkenning is een eerste eenvoudig referentiemodel opgezet in iGrOw, met een constante neerslag (recharge) van 0,8 mm/dag, een doorlatendheid van K = 3 m/d en een initiële grondwaterstand van 11 m. Figuur toont het iGrOw-model met een visualisatie van de dominante fluxen. De resultaten uit iGrOw zijn vervolgens op enkele karakteristieke afstanden tot de watergang vergeleken met de uitkomsten van het Tygron Platform (*Tabel 1*).*



Figuur 4: iGrOw model met visualisatie van primaire fluxen.

Tabel 1: Vergelijking uitkomsten iGrOw en Tygron.

Afstand tot watergang	***20 m***	***100 m***	***170 m***
iGrOw	*11,09*	*11,30*	*11,36*
Tygron	*11,07*	*11,28*	*11,35*

Deze casus kan tevens analytisch worden benaderd met de formule van Bear, die ook ten grondslag ligt aan de formule van Hooghoudt, en leidt tot vergelijkbare resultaten. De stroming is in deze situatie overwegend lateraal (horizontaal), hetgeen ook zichtbaar is in de fluxverdeling van het iGrOw-model. Hierdoor is de invloed van verticale discretisatie bij een uniforme bodemopbouw beperkt. Voor deze situatie levert Tygron vergelijkbare omstandigheden op als iGrOw. Verdere toetsing van meerdere voorbeelden en complexere situaties onder variërende omstandigheden (drainage en infiltratie) is nodig om de toepasbaarheid en beperkingen verder te onderzoeken en beter te kunnen duiden.

3.3.4 Interactie tussen diep en ondiep grondwater

Het Tygron Platform maakt gebruik van een enkel-laags grondwatermodel, waarbij aan de onderzijde optioneel een lekterm kan worden opgelegd. Deze lekterm wordt bepaald door een opgegeven weerstand en een stijghoogte (eventueel tijdsafhankelijk) en is conceptueel consistent met de wijze waarop uitwisseling tussen modellagen binnen MODFLOW wordt berekend. Hierdoor kan deze formulering goed worden toegepast om regionale effecten te representeren die zijn afgeleid uit een MODFLOW-MetaSWAP-model, of om dergelijke effecten dynamisch te koppelen.

De voorkeur is wel om deze aanpak alleen toe te passen wanneer de onverzadigde zone relatief beperkt is en dat kan beperkend zijn voor de Veluwe casus. Aanvulling vanaf het maaiveld wordt namelijk direct over de volledige kolom van de onverzadigde zone verdeeld, waardoor de 'reistijd'[3] ontbreekt en de percolatieflux al na één tijdstap verandert.

In de toekomst kan dit worden opgelost door een transferfunctie of een meerlaags concept voor de onverzadigde zone aan Tygron toe te voegen. Daarmee wordt het reistijdprobleem verholpen en ontstaat meer detailinformatie voor uiteenlopende casussen. In het hoofdstuk Aanbevelingen komen we hierop terug.

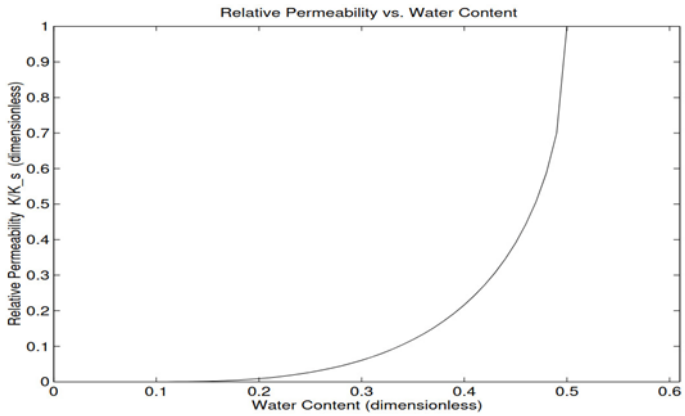
3.3.5 Onverzadigde zone

Binnen het Tygron Platform worden de volgende processen onderscheiden, bezien vanaf het maaiveld:

1. **Infiltratie aan het maaiveld**
   De infiltratie vanaf het maaiveld richting de onverzadigde zone wordt begrensd door een opgegeven maximale infiltratiesnelheid. Deze snelheid wordt bepaald door de minimale waarde van de parameters *surface infiltration* en *ground infiltration*. Hierdoor kan bijvoorbeeld een verhard oppervlak of een watergang op een doorlatende bodem alsnog de infiltratie beperken of blokkeren.
2. **Verdeling in de onverzadigde zone**
   Het geïnfiltreerde water wordt instantaan en gelijkmatig verdeeld over de volledige onverzadigde zonekolom. De omvang van deze kolom wordt bepaald door de afstand tussen het maaiveld en de actuele grondwaterstand, in combinatie met de opgegeven bergingscapaciteit (*water storage percentage*).
3. **Percolatie naar de verzadigde zone**
   Vanuit de onverzadigde zone stroomt water met een opgegeven percolatiesnelheid (ground infiltration) af richting de verzadigde zone. Deze percolatie resulteert in een neerwaartse flux. In de huidige schematisatie vindt geen capillaire nalevering plaats vanuit de verzadigde zone naar de onverzadigde zone.

Het output signaal richting de verzadigde zone wordt gestuurd via de opgegeven percolatiesnelheid "ground infiltration" (in m/d). Hierdoor ontstaat er een constante stroom naar beneden waarmee geen rekening wordt gehouden met de "*water rentention curve*". Om dit effect toch te simuleren kan er wederom gebruikt worden gemaakt van "iteratief" rekenen. Hierbij wordt de percolatiesnelheid aangepast op basis van de actuele verzadiging van de bodem op basis van de Van Genuchten-Mualem-relatie (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980). Figuur 4 toont de relatie tussen de verticale hydraulische geleidbaarheid en de bergingsfractie op basis van deze methodiek.

[3] Strict genomen gaat het hier niet om de reistijd, maar om de tijd die nodig is voor voortplanting van het signaal.



Figuur 5: Relatieve doorlatendheid volgens de Mualem-van Genuchten relatie (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980).

Omdat deze component cruciaal is voor de modellering van processen in de onverzadigde zone, ondersteunt het Tygron Platform deze functionaliteit inmiddels ook standaard via een expliciete optie (selectie in de modelinstellingen). De iteratieve benadering blijft daarnaast beschikbaar, onder meer om te kunnen experimenteren met alternatieve formuleringen, zoals de Brooks–Corey-relatie (Brooks en Corey, 1964).

3.3.6 Randvoorwaarden onverzadigde zone

De simulatie in de onverzadigde zone wordt in belangrijke mate bepaald door de gehanteerde randvoorwaarden.

Runoff

Binnen Tygron worden twee typen runoff onderscheiden:

- Hortonian runoff, die optreedt wanneer de opgegeven maximale infiltratiesnelheid en/of de bergingscapaciteit van het maaiveld wordt overschreden.
- Dunnean overland flow, die ontstaat wanneer de grondwaterstand boven het maaiveld uitstijgt.

Atmosferische interactie

Binnen het Tygron Platform zijn meerdere verdampingsprocessen gedefinieerd:

1. Openwaterverdamping in situaties waarin sprake is van ponding op het maaiveld.
2. Gewasverdamping op basis van een gewasfactor.
3. Gewasverdamping op basis van gewasgroei, met een tijdsafhankelijke gewasfactor waarmee de jaarlijkse groeicyclus kan worden gespecificeerd.

Interceptie en bodemverdamping worden in Tygron niet expliciet gemodelleerd, maar lijken wel logische uitbreidingen om de concepten dichter bij MODFLOW-MetaSWAP berekeningen te brengen. Afhankelijk van de gekozen worteldiepte kan verdamping in Tygron plaatsvinden uit zowel de onverzadigde als de verzadigde zone, deze processen kunnen gelijktijdig optreden op basis van een verdeling.

In Tygron wordt de verdampingsreductie beschreven aan de hand van een waterdiepte-reductierelatie. Voor elke cel worden karakteristieke bodem- en gewaseigenschappen vastgesteld op basis van gekoppelde BOFEK-eenheden en de Basisregistratie Gewaspercelen (BRP). Hoewel deze relatie wordt aangeduid als een Feddes-functie, wijkt zij conceptueel af van de klassieke Feddes-benadering, omdat reductie wordt gebaseerd op waterdiepte in plaats van drukhoogte. Deze formulering maakt het wel mogelijk om processen zoals zuurstofstress te modelleren, waarbij hoge grondwaterstanden leiden tot

verminderde of stopgezette opname door planten. De gehanteerde aanpak vertoont conceptuele overeenkomsten met de EVT-package in MODFLOW 6. Maaiveldverdamping wordt altijd bepaald op basis van de actuele waterstanden uit het oppervlaktewatermodel.

Daarnaast kan in Tygron een seizoensgebonden groeicyclus van vegetatie worden opgegeven via de *water transpiration* factor (de gewasfactor). Hiermee kan een jaarlijkse cyclus worden opgegeven op basis van een aantal punten waartussen lineair wordt geïnterpoleerd. Zo kan bijvoorbeeld gras in de zomer groeien en meer verdampen (‘transpireren’) dan in de winter. Deze methodiek kan verder worden verfijnd door gebruik te maken van iteratief rekenen, waarbij complexere relaties of per dag kan worden gerekend.

3.3.7 Oppervlakkige afstroming

Het Tygron Platform kan oppervlakkige afstroming op hoge resolutie (circa 0,5 tot 2 meter) berekenen op basis van de ondiepwatervergelijkingen (Saint-Venant). Dankzij deze hoge resolutie kunnen de effecten van lokale maatregelen realistisch worden weergegeven, wat belangrijk is voor de Veluwe casus van het waterschap, mede gezien de grote variatie in maaiveldhoogte in het gebied. Daarom wordt voor deze toepassing gebruik gemaakt van het volledige hydraulische model. Binnen Tygron zijn ook vereenvoudigde oppervlaktemodellen beschikbaar, maar deze worden minder geschikt geacht voor deze toepassing waarin detail en lokale interacties centraal staan, en daar wordt dan ook niet verder op ingegaan.

Opgemerkt wordt dat een fijn ruimtelijk schaalniveau om hoogwaardige en gedetailleerde invoerdata vraagt. Binnen Tygron kan deze automatisch worden ingelezen via AI-functionaliteit, waarmee onder meer bomen, heide en struiken nauwkeurig worden herkend. Dankzij dit detailniveau kunnen lokale verschillen in eigenschappen zoals doorlatendheid en berging worden meegenomen in de berekeningen; iedere gridcel krijgt daarbij een eigen horizontale en verticale weerstand en bergingscapaciteit. Deze aanpak is in 2024 toegepast op de Veluwe en heeft geleid tot verbeterde stroombanen van de oppervlakkige afstroming en verbeterde infiltratiepatronen ten opzichte van de standaard topografische methode.

4 Modelperformance

Rekentijd is een belangrijk criterium bij de keuze van hydrologische modellen en hangt sterk af van het doel van de analyse. Voor extreme neerslag op de Veluwe zijn simulaties van enkele weken nodig; voor grondwateraanvulling in droge perioden kunnen simulaties oplopend tot vele jaren relevant zijn. Gebruikers accepteren dat complexe berekeningen enkele dagen duren, maar simulaties die weken vergen worden in de praktijk als onwerkbaar ervaren. Deze beperkingen gelden voor AZURE, maar evengoed voor het Tygron Platform.

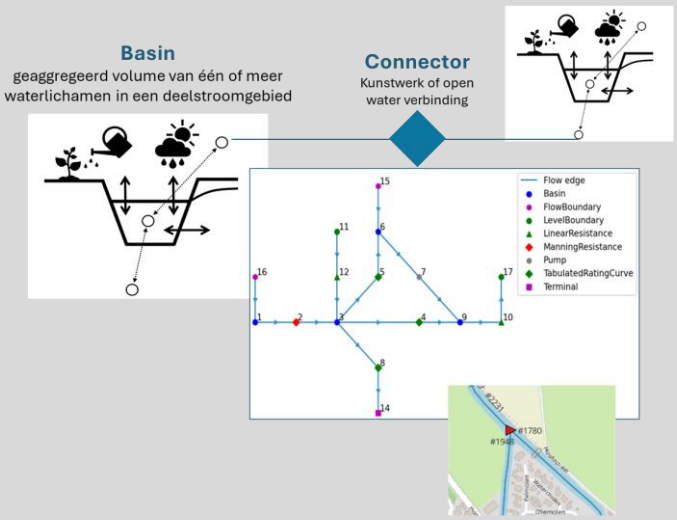
Binnen het AZURE-model heeft dit, zoals eerder vermeld, geleid tot keuzes in een grovere ruimtelijke discretisatie. De huidige modelversie is gekalibreerd op gridcellen van circa 400 meter, omdat fijnere resoluties in combinatie met lange simulatieperioden niet haalbaar waren in de 2024 studie. Dit stelt bovendien stevige performance eisen aan de nu al uitgebreide workflows, waarin basisdata zoals AHN, BGT en watergangen via een reeks geschakelde scripts worden verwerkt. Bij wijzigingen in invoerdata of gridcelgrootte moeten de gecombineerde weerstanden telkens opnieuw worden doorgerekend.

In de huidige praktijk fungeert het AZURE-model met een resolutie van circa 400 m dan ook vooral als regionale basis. Voor berekenen van effecten van lokale maatregelen wordt daarom vaak een aanvullend, fijnmaziger model opgesteld al dan niet opnieuw gekalibreerd met gebiedskennis. Een deel van de performance-uitdaging binnen AZURE kan worden opgevangen door meer gebruik te maken van parallel rekenen op CPU’s, al vraagt dit om uitbreiding van de beschikbare hardwarecapaciteit. Daarnaast worden de omvang en detaillering van de uitvoerbestanden van MODFLOW 6 als beperkend ervaren. Dit punt is inmiddels bij de USGS onder de aandacht gebracht en zal mogelijk op korte termijn worden opgepakt.

De rekentijdbeperkingen maken aanvullende technische uitbreidingen van het grondwaterinstrumentarium lastig. Koppelingen van AZURE met gedetailleerde oppervlaktewatermodellen zoals D-HYDRO zijn technisch mogelijk, maar in de praktijk nauwelijks toepasbaar door de sterke toename in rekentijd en modelcomplexiteit. Daarom is binnen het NHI de afgelopen jaren gewerkt aan een lichtere oppervlaktewatermodule, Ribasim (zie het volgende intermezzo).

Intermezzo: Ribasim
In Ribasim wordt de stroming in waterlopen op vereenvoudigde wijze berekend, waardoor deze aanpak aanzienlijk sneller is dan volledig hydraulische modellen. De kenmerken die relevant zijn voor de interactie met het grondwater worden teruggebracht tot de essentie, zoals sturing van kunstwerken en effectieve Q-h-relaties voor deelstroomgebiedjes. Het oppervlaktewater wordt weergegeven door een netwerk van nodes en links, waar randvoorwaarden van sturing aan kunnen worden meegegeven. Interactie met het grondwater wordt samen gevat voor de deelstroomgebiedjes (basins). Hierdoor kunnen effecten van beperkte beschikbaarheid van oppervlaktewater in droge perioden en sturing van water op bijvoorbeeld splitsingspunten realistischer worden meegenomen in berekeningen van het grondwaterinstrumentarium, zonder dat de rekentijd sterk toeneemt.

Ribasim is nog niet toegepast in het AZURE-instrumentarium, maar ontwikkelingen van het landelijke model (LHM) voor het beheergebied laten zien dat de uitbreiding van de rekentijden (orde minuten) veel lager liggen dan die van de grondwaterberekeningen (uren tot dagen).



Binnen het Tygron Platform beperken vooral hydraulische kunstwerken (zoals duikers en stuwen) in combinatie met zeer kleine tijdstappen (milliseconden) de maximale simulatieduur. Hierdoor zijn simulaties van enkele maanden haalbaar, maar nog geen meerjarige berekeningen. Dit wordt in de nabije toekomst naar verwachting wel mogelijk.

Voor de verwerking van data op hoge resolutie is er wel een duidelijk verschil met AZURE. Binnen het Tygron Platform wordt Geo-data zoveel mogelijk automatisch via online API-koppelingen in een cloudomgeving ingelezen en direct gecombineerd tot modelinvoer. Deze sterk geautomatiseerde werkwijze voorkomt afhankelijkheid van lokale scripts en hardware. Ook kunnen maatregelen, zoals stedenbouwkundige plannen in BIM-formaat, binnen één modelomgeving worden verkend via een referentie- en een toekomstvariant.

Voor het AZURE-model is deze mate van automatisering niet beschikbaar. De preprocessing van modellen en het verwerken van geodata zullen naar verwachting wel aanzienlijk verbeteren wanneer de nieuwe Pythontools binnen de iMOD-Suite (iMOD Python en efficiënte modules daarbinnen zoals Xu-grid) volledig worden ingezet.

5 Aanbevelingen

In deze verkenning zijn twee hoofdopties beschreven voor de casus Veluwe:

1. **Een volledig GPU-gebaseerde grondwaterberekening**.
Deze route biedt in theorie maximale rekensnelheid en schaalbaarheid, maar vraagt - zoals eerder toegelicht - een omvangrijke herbouw van de rekenkern en integratie van alle benodigde processen. Bovendien is het op voorhand niet duidelijk wat de meerwaarde is voor de casus Veluwe. Dat maakt deze optie op korte termijn niet realistisch.

2. **Een hybride CPU–GPU-aanpak**.
In deze 'combinatie-route' rekent het Tygron Platform de snelle, fijnmazige processen nabij het maaiveld door, terwijl MODFLOW wordt ingezet voor de meerlaagse stroming in de diepere ondergrond. Dit sluit aan bij de procesverschillen tussen beide modellen en afhankelijk van de keuzes voor het koppelvlak kan worden voortgebouwd op bestaande praktijkervaringen met modelkoppelingen (offline of online).

In de volgende paragrafen worden de aanbevelingen verder uitgewerkt voor de korte, middellange en lange termijn.

5.1 Korte termijn

We bevelen aan op korte termijn te werken aan de hybride oplossingsroute. Zoals in de vorige hoofdstukken is beschreven, sluiten de procesbeschrijvingen van Tygron en MODFLOW ten dele op elkaar aan, maar zijn er twee kernonderdelen waarin de huidige lijnen in ieder geval dichter bij elkaar zouden moeten worden gebracht:

- Een realistische Q–ΔH-relatie implementeren in Tygron voor de interactie tussen grond- en oppervlaktewater, in lijn met de gangbare MODFLOW-benadering (oplossingsrichting: de RIV-module, DRN-module en GHB module in MODFLOW).
- Een transferfunctie in Tygron is nodig om de reistijd door de onverzadigde zone realistischer te modelleren, vooral in gebieden met diepe grondwaterspiegels zoals de Veluwe. Zie bijvoorbeeld een mogelijke benadering in Collenteur et al, 2021. Een alternatief is om een meerlaagse onverzadigde-zonebeschrijving te introduceren, maar dit vergt naar verwachting meer ontwikkelinspanning en is daarom meer een optie voor de middenlange tot lange termijn.

Op basis hiervan kunnen we een gezamenlijk onderzoek starten waarin de modelresultaten van beide instrumentaria in een proefgebied systematisch worden vergeleken. Daarbij moet, zoals eerder genoemd, zorgvuldig rekening worden gehouden met (blijvende) verschillen in de ruimtelijke resolutie. iGrOw kan hierbij dienen als benchmarkinstrument om zowel de Tygron uitwerking als de MODFLOW resultaten voor uiteenlopende casussen en condities te vergelijken en de gevoeligheid voor schaalverschillen verder te analyseren.

Op basis van het resultaat moet worden onderzocht welke componenten en processen eventueel aanvullend verder verbeterd moeten worden, waarbij de inhoudelijke meerwaarde duidelijk op moet wegen tegen de benodigde inspanning. Het is bijvoorbeeld relevant om te weten of een aanpassing leidt tot bijvoorbeeld 30% verbetering van de uitkomsten, of slechts tot de laatste paar procent.

De vervolgstap is een offline koppeling te implementeren op het freatisch grondwater. Concreet kunnen stijghoogten en fluxen uit AZURE worden opgelegd als tijdsafhankelijke randvoorwaarden in Tygron, met aandacht voor een sluitende waterbalans. Dit biedt inzicht in de praktische toepasbaarheid en vormt een opmaat naar mogelijke online koppelingen.

5.2 Middellange termijn

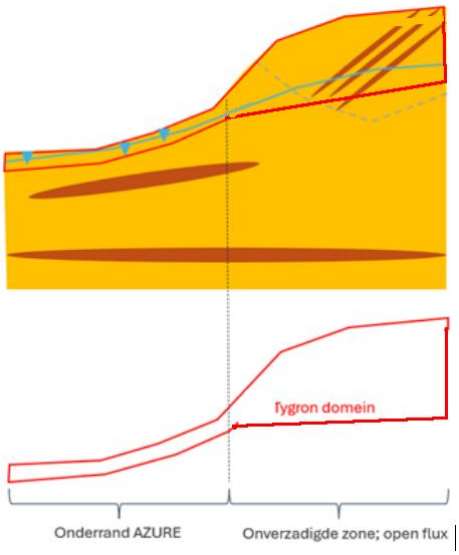
Online koppeling
De volgende stap is het realiseren van een online koppeling tussen het Tygron Platform en MODFLOW, via API-technieken:

- De online koppeling sluit aan bij de bestaande mogelijkheid van het Tygron Platform om te koppelen aan de bovenste grondwaterlaag van een extern model (zie figuur 4). Het voordeel hiervan is dat Tygron de benodigde hoge ruimtelijke resolutie levert voor de oppervlakkige afstroming en de interactie met het ondiepe grondwater, terwijl MODFLOW de diepere grondwaterlagen kan doorrekenen op een grovere resolutie zonder dat rekentijd beperkend wordt.
- De koppeling verloopt via een moderne web-API of C-koppeling. Het Tygron Platform kan, op basis van iteratief rekenen, de GPU-berekening op vaste momenten onderbreken en een API-verzoek sturen naar MODFLOW. Tijdens deze uitwisseling worden stijghoogten (grondwaterstanden), fluxen en weerstanden gedeeld.
- Na de uitwisseling rekenen beide modellen parallel de volgende periode door, bijvoorbeeld een uur of een dag, waarna de cyclus zich herhaalt.

Onderzoek verbetering onverzadigde zone
Daarnaast wordt aanbevolen om ook de meerwaarde van verbetering van processen in de onverzadigde zone te onderzoeken, in afstemming met Wageningen Universiteit & Research. De belangrijkste op de middellange termijn zijn:

- Verbeterde interactie tussen bodem en gewas, op basis van de (klassieke) Feddes-benadering met drukhoogtes.
- De huidige benadering voor stroming in de onverzadigde zone te vervangen door de de Sequential Steady State methode, die in ontwikkeling is (Kok en Leander, in prep.) en die wordt gezien als beoogde opvolger van MetaSWAP binnen het SWAP Framework.

Op deze wijze zou Tygron het hele hydrologische topsysteem kunnen bedienen, en de grootschalige regionale stroming door MODFLOW kunnen worden gesimuleerd (zie onderstaande figuur).



Figuur 6: Voorbeeld van mogelijke invulling van het koppelvlak Tygron Platform-MODFLOW op de eerste grondwaterlaag bij een dwarsdoorsnede van de Veluwe. Een mogelijke variant is het koppelvlak door te laten lopen tot aan de scheidende laag.

Verkenning andere type gebieden
Aanbevolen wordt om de inzichten uit deze verkenning ook te toetsen aan andere typen gebieden. Naast de Veluwe kan worden gedacht aan West-Nederlandse polders, waar bijvoorbeeld bodemdaling, veenoxidatie en waterbeheer centraal staan. In zulke systemen ligt de nadruk sterker op de onverzadigde zone, waardoor kan worden onderzocht in hoeverre de hier besproken concepten generiek toepasbaar zijn of juist gebiedsspecifieke aanpassingen vragen.

5.3 Lange Termijn

De hybride oplossing kan al vele voordelen hebben voor de inzetbaarheid in de praktijk van verschillende waterschappen. Maar voor optimale performance en uitkomsten zijn er nog meer stappen denkbaar. Voorafgaand zou in ieder geval aanvullend onderzoek nodig zijn om te beoordelen of deze richting haalbaar is en voldoende kans van slagen heeft.

Onverzadigde zone: full Richards
Het inbouwen van nog geavanceerdere onverzadigde zone concepten in Tygron, namelijk de ‘full Richards’ methode, in 1D of zelfs 3D. Conceptueel is de 3D benadering de meest geavanceerde benadering. De hiervoor benodigde inspanning mag zeker niet onderschat worden, leert ook de recente implementatie van de 3D Richards oplossing in MODFLOW 6.

Volledig GPU
Uiteindelijk, vooralsnog meer theoretisch, zou voor de lange termijn ook verder kunnen worden gekeken naar een volledige GPU-implementatie van een meerlaags grondwatermodel, vergelijkbaar met MODFLOW. Zoals eerder aangegeven zou deze stap eerst aanzienlijk verdiepend fundamenteel onderzoek vergen, om na te gaan of dit überhaupt voordelig is, bijvoorbeeld via promotietrajecten of grote onderzoeksprojecten.

5.4 Aanvullende onderwerpen

Naast de inhoudelijke aanbevelingen voor de interactie tussen grond- en oppervlaktewater, de onverzadigde zone en de diepe grondwatersystemen, zijn er aanvullende onderwerpen die relevant zijn voor de verdere afstemming en doorontwikkeling van het instrumentarium.

- **Terminologie**: Het is wenselijk om de gebruikte terminologie voor de verschillende concepten verder te harmoniseren en in samenhang te duiden. In dit rapport is hiervoor een eerste aanzet gedaan (zie ook de bijlage), maar verdere uitwerking is nodig.

- **Organisatie en samenwerking**: Het is daarnaast van belang te onderzoeken wat de voorgestelde oplossingsrichtingen betekenen voor organisatie, samenwerking en kosten. Dit betreft vragen rond model- en data-eigenaarschap, verdeling van ontwikkel- en onderhoudslasten, en de inrichting van samenwerking tussen kennisinstellingen, softwareontwikkelaars en beheerders. Deze aspecten zijn tot nu toe bewust buiten beschouwing gelaten, maar zijn cruciaal bij eventuele implementatie.

- **Hybride modellering met AI.** Het is goed te benadrukken dat het in elk geval zinvol is en blijft om verder in te zetten op hybride modellen, waarin klassieke numerieke modellering wordt aangevuld met AI- en datagedreven technieken. De data-gedreven aanpak in Tygron biedt hier ook interessante aanknopingspunten waar in de benadering met MODFLOW en MetaSWAP van kan worden geleerd. Denk aan AI-toepassingen voor parameterafleiding, modelreductie, versnelling van berekeningen en ondersteuning bij kalibratie en scenarioanalyse. De uiteindelijke vraag - voor zowel berekeningen op de GPU als CPU - hoe deze methoden optimaal kunnen worden gecombineerd met fysisch-consistente modellering, en hoe hun betrouwbaarheid kan worden geborgd, vraagt de komende jaren verder onderzoek.

5.5 Tot slot

Dit traject was voor alle betrokkenen een waardevolle kennismaking met elkaars expertise en manier van werken. In de gezamenlijke sessies hebben we inhoudelijke inzichten gedeeld, hebben we langzamerhand leren wennen aan de verschillende benaderingen en de achterliggende filosofie, en gaandeweg samen een gedeelde visie ontwikkeld op de kansen van GPU-technologie voor hydrologische modellering. Het resultaat is een gezamenlijk perspectief waar we de komende jaren verder op kunnen voortbouwen. We zien uit naar vervolgstappen en verdere uitwerking.

Bijlage: Beschrijving begrippen

AZURE
Regionaal hydrologisch model voor Midden Nederland (Actueel modelinstrumentarium voor de ZUiderzee REgio), gebaseerd op MODFLOW 6 in combinatie met MetaSWAP.

CPU
Centrale rekeneenheid (de processor) die standaard aanwezig is en een computer bestuurt. Een CPU voert sequentiële en kan een beperkt aantal parallelle berekeningen uitvoeren. Ze worden gebruikt in traditionele grondwatermodellen zoals MODFLOW. Systemen beschikken doorgaans één of twee CPU's.

D-HYDRO
Modelleringssoftware voor het simuleren van oppervlakkige stroming en hydraulische processen. Ontwikkeld door Deltares.

GPU
Origineel een grafische rekeneenheid, tegenwoordig ook een accelerator voor zware berekeningen in data centers. Dit type chip is gebouwd voor massief parallelle rekenkracht en bevat in de huidige generatie 24.576 rekenkernen (NVIDIA Blackwell 2025). Ze kunnen bovendien relatief eenvoudig worden gekoppeld, waardoor meerdere chips gezamenlijk binnen één systeem kunnen worden ingezet.

MetaSWAP
Emulator van het SWAP-model voor grootschalige toepassingen. MetaSWAP is gevalideerd tegen SWAP-resultaten en biedt een efficiëntere rekenaanpak voor grootschalige regionale modellering. Ontwikkeld door Wageningen Environmental Research (WENR).

iGrOw
Ondersteunende software die is gemaakt om de interactie tussen Grond en Oppervlaktewater inzichtelijker te maken. De software is ontwikkeld door een groep hydrologen en vorm gegeven als HTML applicatie (zie https://nhi.nu/tooling/igrow/).

MODFLOW
Grondwatermodelleringssoftware ontwikkeld door de United States Geological Survey (USGS), onderdeel van de Amerikaanse overheid. MODFLOW wordt wereldwijd toegepast voor het simuleren van verzadigde grondwaterstroming. De actuele versie is MODFLOW 6.

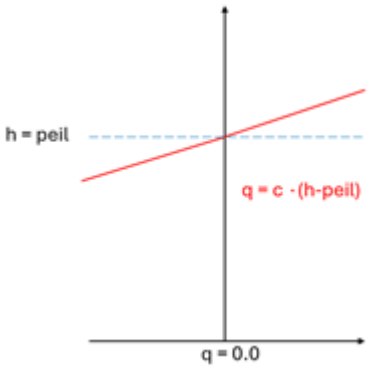
RIBASIM
Modeleringssoftware met een vereenvoudigde benadering voor het simuleren van oppervlaktewater inclusief waterverdeling, die kan worden toegepast in combinatie met grondwatermodellering. Ontwikkeld door Deltares.

Tygron Platform
Cloud-gebaseerde modelleeromgeving (software en hardware) voor het simuleren van oppervlakte- en grondwaterprocessen. Het platform maakt al 20 jaar gebruik van GPU technologie voor hoge resolutie, snelle berekeningen, AI en visualisatie. Ontwikkeld door Tygron B.V. in Den Haag.

Bijlage: Nadere toelichting modelconcepten MODFLOW

In de **Constant Head (CHD)**-package van MODFLOW wordt een oppervlaktewaterwaterstand als randvoorwaarde hard opgelegd (Dirichlet randvoorwaarde).

De **General Head Boundary (GHB**)-package beschrijft een Robin-randvoorwaarde door een extern waterniveau te combineren met een conductance. De resulterende flux Q naar of vanuit de modelcel volgt uit het verschil tussen de opgelegde oppervlaktewaterstand en de stijghoogte in de onderliggende cel (ΔH), vermenigvuldigd met de conductance. De relatie tussen Q en ΔH is volledig lineair, zowel onder drainerende als infiltrerende condities. Deze benadering wordt vooral toegepast voor grotere waterlichamen zoals het IJsselmeer of de Noordzee. Hierbij wordt aangenomen dat infiltratie en drainage vergelijkbaar verlopen, en de grondwaterstanden niet tot onder de waterbodem zullen wegzakken. De bijbehorende lineaire Q–ΔH-relatie is weergegeven in figuur 7.

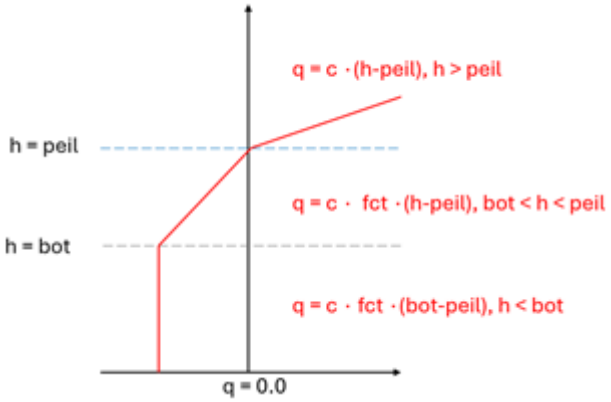


Figuur 7: Q–ΔH relatie voor GHB-package van MODFLOW

De **River (RIV)**-package is een uitbreiding op de GHB-benadering die veel wordt toegepast voor het modelleren van waterlopen (zie figuur 8). Ook deze package beschrijft een Robin-randvoorwaarde, maar introduceert aanvullende niet-lineariteiten in de Q–ΔH-relatie:

1. Onder drainerende condities is het gedrag gelijk aan dat van de GHB-package.
2. Onder infiltrerende condities, waarbij de grondwaterstand boven het bodemniveau ligt, wordt een grotere effectieve weerstand gehanteerd; in regionale toepassingen wordt hiervoor vaak bovendien een factor (bijvoorbeeld 3) gebruikt[4]. De gedachte achter deze extra weerstand is dat opgeloste bodemdeeltjes (slib) de poriën van het medium deels verstoppen, waardoor de doorlatendheid afneemt.
3. Wanneer de grondwaterstand onder het bodemniveau van de waterloop zakt, wordt ΔH begrensd door de bodemhoogte, waardoor de infiltratieflux een constante waarde aanneemt.

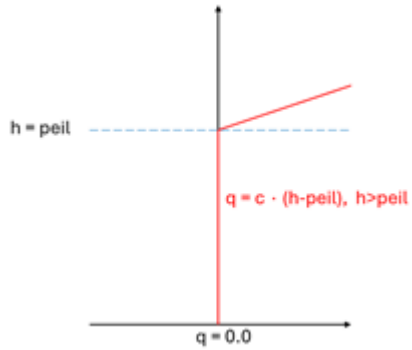
[4] In iMODFLOW kon dit direct worden geïmplementeerd via een infiltratiefactor, In de praktijk wordt dit in MODFLOW 6 toegepast door gebruik te maken van gestapelde river (RIV) en drainpackage (DRN), dit resulteert effectief in een niet-lineaire relatie van de interactie grondwater-oppervlaktewater, zoals weergegeven in figuur 8.



Figuur 8: Niet-lineaire Q–ΔH relatie voor RIV-package zoals doorgaans in de praktijk effectief gebruikt in MODFLOW-MetaSWAP modellen.

Binnen MODFLOW wordt drainage geschematiseerd met de **Drain (DRN)-package**. Deze package is conceptueel verwant aan de General Head Boundary (GHB)-package en beschrijft eveneens een Robin-randvoorwaarde, waarbij een waterniveau wordt gecombineerd met een conductance (zie figuur 9).

Het onderscheidende kenmerk van de DRN-package is dat uitsluitend afvoer van grondwater wordt toegestaan wanneer de grondwaterstand boven het ingestelde drainageniveau ligt. Dan wordt water onttrokken aan de modelcel; zodra de grondwaterstand onder dit niveau zakt, stopt de interactie volledig. Onder drainerende condities gedraagt de DRN-package zich daarmee gelijk aan de GHB-package.



Figuur 9: Niet-lineaire $Q–\Delta H$ relatie voor DRN-package van MODFLOW.

Referenties

AZURE 2.0 (18 november 2024). Opzet en kalibratie AZURE 2.0, gridgrootte, pagina 37.

Brooks, R. y Corey, A. (1964). Propiedades hidráulicas en medios porosos. Universidad Estatal de Colorado, Fort Collins, Colorado.

Buwalda F.J.L, et al (2023). Comparison of an Explicit and Implicit Time Integration Method on GPUs for Shallow Water Flows on Structured Grids, MDPI Water, 18.

Collenteur, R.A., M. Bakker, G. Klammler en S. Birk (2021). Estimation of groundwater recharge from groundwater levels using nonlinear transfer function noise models and comparison to lysimeter data. Hydrology and Earth System Sciences, 24, 2931-2949.

De Lange, W.J. (1998). Groundwater–surface water interactions in regional groundwater flow modelling. PhD thesis, Vrije Universiteit Amsterdam.

De Lange, W.J. (1999). A Cauchy boundary condition for the lumped interaction between surface water and groundwater. Journal of Hydrology, 226, 250–261.

De Lange, W.J., et al. (2020). Improved parameterisation of surface water–groundwater interaction for regional groundwater models. Journal of Hydrology, 582, 124503.

De Lange, W.J., J. van Bakel, P. Torfs, H. Bootsma en J. Hoogewoud (2025). De interactie tussen grondwater en oppervlaktewater: valkuilen bij het modelleren van waterlopen. Stromingen (NHV), 2025.

Ernst, L.F. (1987). Grondwaterstroming nabij sloten en drains. Cultuurtechnisch Tijdschrift, 27(4), 243–256.

Hokkanen, J., S. Kollet, J. Kraus, A. Herten, M. Hrywniak, D. Pleiter (2021). Leveraging HPC accelerator architectures with modern techniques — hydrologic modeling on GPUs with ParFlow. Computational Geosciences, 25, 1579–1590.

Hughes, J.D., & White, J.T. (2013). Efficient explicit solution to the groundwater-flow equation using GPUs. Computers & Geosciences, 60, 156–165.

Boundary Condition Nomenclature Confusion in Groundwater Flow Modeling (2019), Amir Jazayeri and Adrian D. Werner, 2019, Groundwater Volume 57, 664-668.

Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12(3), 513–522.

NHI workshop (3 december 2020). NHI workshop interactie grondwater-oppervlaktewater, verslag, 1-3.

NVIDIA Blackwell (2025). Website: https://en.wikipedia.org/wiki/Blackwell_(microarchitecture)

Top500 (2025). Website: https://top500.org/lists/top500/2025/11/

Van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892–898.

Van Walsum, P. E. V., & Veldhuizen, A. A. (2011). Integration of models using shared state variables: Implementation in the regional hydrologic modelling system SIMGRO. Journal of Hydrology, 409(1–2), 363–370.

Vuik, K (8 september 2025), Kansen van GPU’s voor waterbeheerders, conclusies, 32-33.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl