

De interactie tussen grondwater en oppervlaktewater: Valkuilen bij het modelleren van waterlopen

WIM DE LANGE, JAN VAN BAKEL, PAUL TORFS, HUI TE BOOTSMA EN JACCO HOOGEWOUD

Artikel

Onder de hydrologische condities in Nederland is er vrijwel overal een significante interactie tussen het grondwatersysteem en het oppervlaktewatersysteem. In een numeriek grondwatermodel opgebouwd met MODFLOW worden waterlopen beschreven met de conductance, die wordt bepaald door de celgrootte te delen door een opgeschaalde weerstand. In MODFLOW wordt enkel gebruikgemaakt van de weerstand van de waterbodem. Wij stellen voor om hiervoor de cel-drainweerstand te gebruiken, die is opgebouwd uit vier deelweerstanden in navolging van Ernst (1962). Door het negeren van de andere weerstanden die in een cel kunnen optreden, worden waterlopen in een MODFLOW-model vaak onjuist geparameteriseerd en kunnen significante fouten ontstaan tijdens kalibratie. De ad hoc werkgroep Celdrainweerstand ziet het als haar missie dat de celdrainweerstand in numerieke modellen gaat worden gebruikt en stelt daarvoor kennis en tools beschikbaar. Aan het eind tonen we de verschillen in de conductances gebaseerd op de landsdekkende dataset van LHM.

Inleiding

Een wijdverbreide opvatting onder grondwatermodelleers is: als je maar fijn genoeg modelleert, lossen de schaalproblemen zich vanzelf op. Dat is een misvatting. Zelfs als je per vierkante meter rekent, gaat het soms niet goed. Bovendien is er geen (regionaal) model dat met een knooppuntafstand van 1 meter zinnige scenario's kan doorrekenen. Een andere misvatting is dat je een fijn model 1-op-1 kunt opschalen (conductances sommeren) naar een grof model, dus zonder herberekening van modelparameters. De belangrijkste 'boosdoener' is de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater.

Onder de hydrologische condities in Nederland is er vrijwel overal een significante interactie tussen het grondwatersysteem en het oppervlaktewatersysteem. Er zijn immers vrijwel overal waterlopen aanwezig die het neerslagoverschot in de winter draineren en afvoeren en in het peilbeheerste deel in het groeiseizoen water aanvoeren en infiltreren. De mate van interactie – in termen van de hoeveelheid water die wordt uitgewisseld tussen beide systemen – kan worden benaderd uit het potentiaalverschil gedeeld door de drainageweerstand, zoals gedefinieerd door Ernst (Van Bakel, 1996). De drainageweerstand is te bepalen uit hydrologische parameters waaronder de gemiddelde afstand tussen waterlopen. Als we de waterstand in de waterlopen als een randvoorwaarde aannemen, kunnen we met de drainageweerstand de opbolling, en dus de grondwaterstand midden tussen de waterlopen, berekenen (en daarvan met de vormfactor af te leiden gemiddelde grondwaterstand). Deze kennis is de basis van de benadering van Ernst (1962)

die de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater beschrijft in deelweerstand. Wij denken dat deze kennis van waarde is voor de huidige modelleringspraktijk.

In een MODFLOW-model wordt oppervlaktewater beschreven met de conductance, die wordt berekend uit de celgrootte gedeeld door de opgeschaalde bodemweerstand, die wij hier de **modflow-weerstand** zullen noemen. De modflowweerstand wordt berekend uit een lineaire opschaling van de bodemweerstand, die wordt vermenigvuldigd met het quotiënt van de celgrootte en natte omtrek van de waterloop. In het vervolg zullen we laten zien dat dit een te sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid is die tot significant verkeerde waarden van de conductance kan leiden.

Als we het grondwatersysteem gaan modelleren met een ruimtelijk discreet model zoals MODFLOW, dan is de celgrootte meestal niet gelijk aan de slootafstand. Dan moeten we gaan verschalen naar – wat wij hebben genoemd – de **celdrainweerstand**. De schaalregels die daarbij horen zijn voor veel modelleurs op zijn minst geen gesneden koek, zodat we gerust kunnen spreken van een schaalprobleem.

Bij de modellering van de interactie grondwater-oppervlaktewater kan conceptueel het nodige misgaan. Bijvoorbeeld: als stroming van grondwater nabij een waterloop convergeert, treedt er een extra weerstand op die nogal eens over het hoofd wordt gezien. Ook de stromingsweerstand die de grondwateraanvulling ondervindt in het gebied van de cel met waterloop, wordt niet meegenomen in de conductance. Ook neemt de invloed van de celdrainweerstand op de berekende grondwaterstand in de cel toe met het groter worden van de afvoer naar de waterloop, en dus met het toenemen van de afstand tussen de waterlopen.

Tijdens kalibratie leidt de afwijking in de grondwaterstand in de cel van de waterloop direct tot wijziging van de conductance in die cel omdat meetpunten vaak dicht bij waterlopen liggen. Het niet meenemen van de complete serie weerstanden leidt ertoe dat de startwaarde en de toegestane range van de conductance significant onjuist kunnen zijn. De fysische basis van de celdrainweerstand, die we in dit artikel uitleggen, zal leiden tot een betere kennis van de realistische range van waarden van de conductance in MODFLOW voor kalibratie.

Soms worden de modelproblemen gerelateerd aan waterlopen genegeerd omdat ‘we het toch niet weten’. Ook worden de misconcepties ‘weggekalibreerd’. Echter, van het op de juiste wijze modelleren van de stroming naar waterlopen hebben we, hydrologen in Nederland, wel harde, feitelijke kennis. We weten hoeveel er fout kan gaan in de modeluitkomsten als je 1) de schaalregels niet goed toepast of 2) als je weerstanden anders dan de waterbodemweerstand over het hoofd ziet of verwaarloost. Als we die kennis goed toepassen, weten we ook wanneer de conductance goed genoeg in het model zit en hoe groot de onzekerheidsrange is voor de kalibratie.

Onze missie

Waarom vinden wij, als ad hoc werkgroep Celdrainweerstand, het belangrijk dat de celdrainweerstand correct wordt bepaald? We zijn van mening dat, met name bij grote MODFLOW-modellen, in Nederland verkeerde waarden voor de conductance worden gebruikt die van grote invloed kunnen zijn op de uitspraken die op het model gebaseerd zijn. De weg van het modelleren van het topsysteem bevat de nodige valkuilen, die wij in dit artikel zullen benoemen. Met dit artikel willen we een aantal breed verspreide misvattingen uit de wereld helpen. We willen een juist begrip creëren van hoe de wereld dicht onder maaiveld hydrologisch functioneert. En we geven richtlijnen voor de modelleerpraktijk. Vergelijkbaar met het Woudlopershandboek dat Kwik, Kwek en Kwak raadplegen. Daarmee kunnen 'goed gecamoufleerde valkuilen' worden herkend en vermeden. Woudlopers hebben in hun rugzak ook tools tot hun beschikking, zoals een zakmes en een kompas. Wij bieden ook tools aan in de vorm van scripts voor wiskundige vergelijkingen die zijn te gebruiken om de juiste waarde van de conductance in een MODFLOW-model te bepalen, bijvoorbeeld op basis van NHI-data. Ook leveren we de tool iGrOw om de stroming in het topsysteem beter te begrijpen en de opbouw van de celdrainweerstand te verklaren. We geven hiervan voorbeelden. Onze tools stellen wij beschikbaar via GitHub: <https://github.com/Huite/effective-drainage-resistance>.

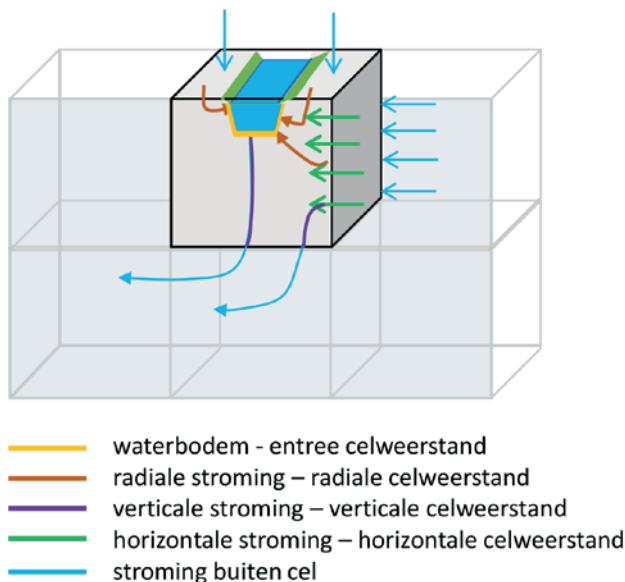
Gewapend met deze kennis en tools hebben we het aangedurfd voor heel Nederland te verkennen wat onze aanpak bijdraagt. We sluiten het artikel af met de eerste resultaten van vergelijkingen tussen conductances op basis van de verschillende geschaalde weerstanden en data uit het Landelijke Hydrologische Model (LHM, zie <https://nhi.nu/modellen/lhm/>).

Grondwaterstroming in een cel met een waterloop

De sleutel tot een goede modellering van het topsysteem is een juiste bepaling van de celdrainweerstand als onderdeel van de conductance in MODFLOW. We maken dat duidelijk aan de hand van een onderverdeling van de grondwaterstroming naar een waterloop. Bij waterlopen denken we zeker niet alleen aan grote A-waterlopen maar ook en vooral (vanwege het aandeel in de grondwaterafvoer) naar kleinere boerensloten, zie afbeelding 1.



Afbeelding
1: Typische
boerensloot.



Afbeelding 2: Typen van grondwaterstroming naar een waterloop en de bijbehorende deelweerstand in een cel.

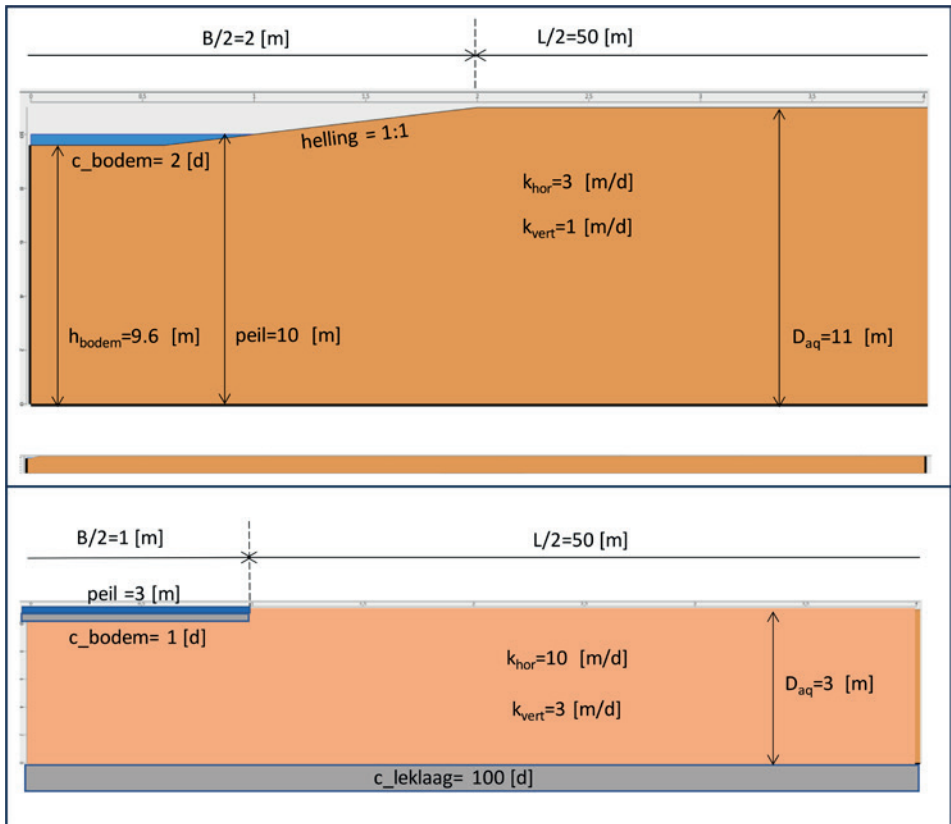
De sleutel tot het begrip van dit topsysteem is het gebruik van een onderverdeling in vier stromingstypen en bijbehorende weerstand in navolging van Ernst (1962). Deze weerstanden worden de horizontale, radiale, entree- en verticale weerstand genoemd, die we hieronder in detail zullen bespreken. De celdrainweerstand is gelijk aan de som van de vier deelweerstand binnen een cel. Voor de toepassing naar de celdrainweerstand vertalen we de Ernst-benadering naar de deelweerstand binnen een MODFLOW-cel, zie afbeelding 2.

De **celdrainweerstand** wordt gedefinieerd als ‘het verschil tussen celdgemiddelde grondwaterstand (incl. grondwaterstand onder de sloot) en de slootwaterstand gedeeld door de afvoer naar de sloot per eenheid van celoppervlakte’, in formule:

$$C_{\text{drain,cell}} = \frac{\bar{h} - h_{\text{ditch}}}{q_{\text{ditch}}} \quad [\text{d}]$$

waarin $\bar{h}$ is de gemiddelde grondwaterstand in de cel en h_{ditch} de slootwaterstand (beiden in m t.o.v. referentieniveau) en q_{ditch} is de afvoer per eenheid van celoppervlakte [m/d]. Deze weerstand bepaalt de grondwaterstand in de cel van de waterloop. Wij hanteren Engelstalige termen om aan te sluiten bij de internationale toepassing van MODFLOW. In het numerieke rekenschema van MODFLOW, representeert de gemiddelde grondwaterstand in de cel $\bar{h}$ de berekende waarde op de rekenknoop en de slootwaterstand h_{ditch} het waterpeil aan de buitenkant van het model, terwijl de afvoer en weerstand in het traject daartussen gelden.

We gebruiken in onze uitleg een éénlaags-grondwatermodel dat een enkel watervoerend pakket schematiseert (bovenste kader in afbeelding 3) en een topsysteem-model dat de bovenste laag van een meerlaags regionaal systeem voorstelt (onderste kader in afbeelding 3).



Afbeelding 3: Schematische voorstelling van sloot en een enkel watervoerend pakket (bovenste kader) met bovenin, verticaal sterk opgeschaald, eerste 4 m vanuit hart van de sloot, daaronder halve doorsnede tot aan waterscheiding, eenduidig verschaald. Onderste kader: schematische voorstelling van sloot en topsysteem boven één of meerdere watervoerende lagen (geschaald als bovenin bovenste kader). Figuur gegenereerd met iGrOw.

Het belangrijkste verschil tussen de celdrainweerstand en de modflow-weerstand in de conductance in de RIVER- of GHB-randvoorwaarde in MODFLOW is dat daar wordt uitgegaan van lineaire opschaling van de waterbodemweerstand met een plaats-constante stroming over de waterbodem. De andere deelweerstand (radiale, verticale en horizontale weerstand in de cel) zijn daarin niet opgenomen.

Voor de berekening van elke deelweerstand in de celdrainweerstand zijn formules beschikbaar die zijn gebaseerd op de formules van Ernst (1962) voor het éénlaagssysteem afgekort als Ernst 2.0 en die van De Lange uit 2020 (De Lange, 2025) voor het meerlaagssysteem afgekort als DL2020. Wij hebben de celdrainweerstand volgens Ernst 2.0 en DL2020 en de modflow-weerstand zowel onderling vergeleken als met die uit iGrOw, onze numerieke modelleertool. iGrOw rekent de verzadigde grondwaterstroming uit langs een verticaal profiel met variërende dikte tussen midden 'waterloop' en midden 'land tussen waterlopen', door middel van een zeer fijne indeling van de ondergrond in driehoeken op basis van de eindige elementen methode, zie de handleiding op Github via de link gegeven bij Onze missie.

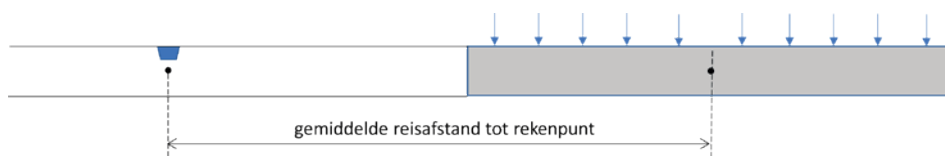
Op basis van onze expertise en gebruikmakend van vergelijkingen van modelresultaten beschrijven we de valkuilen voor de modelleur.

Valkuilen bij het modelleren van waterlopen

We presenteren de valkuilen in volgorde van afnemende belangrijkheid voor de MODFLOW-modeleerpraktijk, die we afleiden uit de grootte van het verschil van de 'MODFLOW' en de 'celdrainweerstand', berekend met iGrOw.

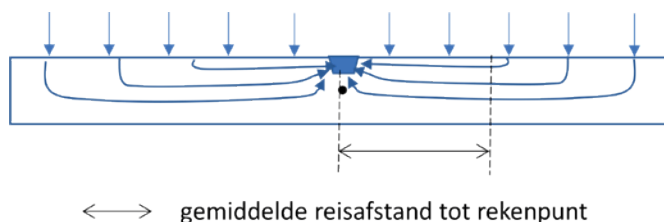
Valkuil 1: Horizontale weerstand

MODFLOW rekent tussen rekenknopen. Tussen horizontale knopen wordt weerstand tegen horizontale stroming meegenomen, zie afbeelding 4.



Afbeelding 4: De stroming tussen cellen wordt meegenomen in MODFLOW (wit = cel met waterloop, grijs = cel zonder waterloop).

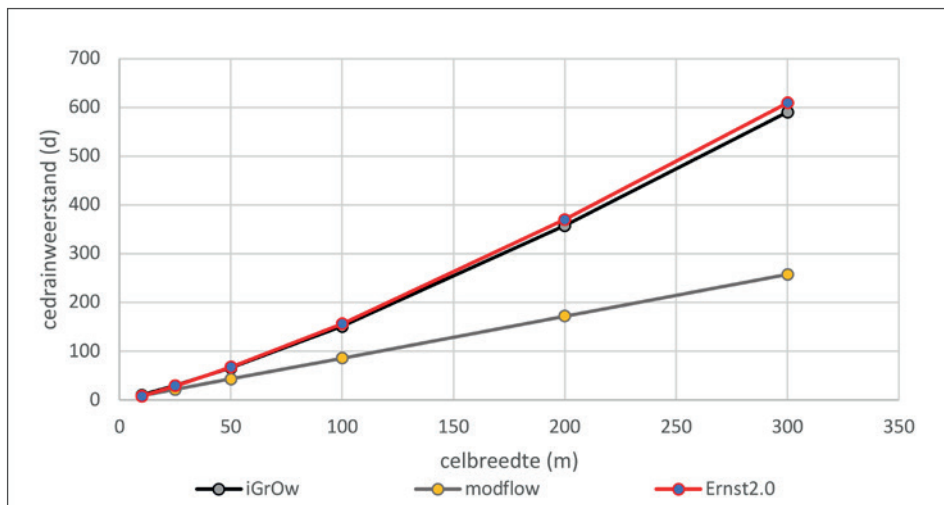
Voor horizontale stroming tussen rekenknopen heeft MODFLOW de juiste parameterwaarden, volgend uit de eindige differentievergelijking. Echter binnen de cel zelf gaat het fout. De neerslag die valt op de cel stroomt binnen de cel in horizontale richting naar de waterloop, zie afbeelding 5. De horizontale weerstand over de gemiddelde reisafstand tot het rekenpunt wordt in MODFLOW niet meegenomen. Hoe groter de cel, hoe groter de weerstand. Deze kan (veel) groter worden dan die van de waterbodem waarmee MODFLOW in de cel rekent. Dit is een potentieel belangrijke oorzaak van modelafwijkingen.



Afbeelding 5: De neerslag die op de cel valt, stroomt naar de waterloop. De weerstand van deze stroming wordt in MODFLOW niet meegenomen.

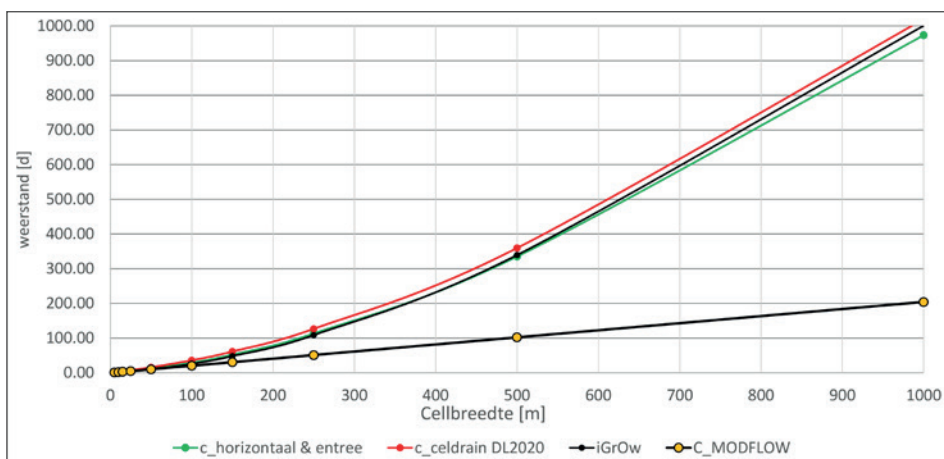
Dit probleem lichten we allereerst toe met een eenvoudig éénlaagsmodel. Uit de klassieke analytische oplossing van Ernst volgt dat de horizontale weerstand evenredig is met het kwadraat van de celbreedte. Dit niet-lineair verband tussen celbreedte en celdrainweerstand wordt berekend met iGrOw en Ernst 2.0, terwijl MODFLOW een lineair verband laat zien waardoor voor grotere cellen de celdrainweerstand wordt onderschat (en bijgevolg de conductance wordt overschat). De aanduiding Ernst 2.0 staat voor de Ernst-formules aangepast voor celbreedtes

ongelijk aan de slootafstand. In afbeelding 6 is te zien dat de onderschatting in de modflow-weerstand ten opzichte van de celdrainweerstand aanzienlijk kan worden bij grote celbreedtes en slootafstanden.



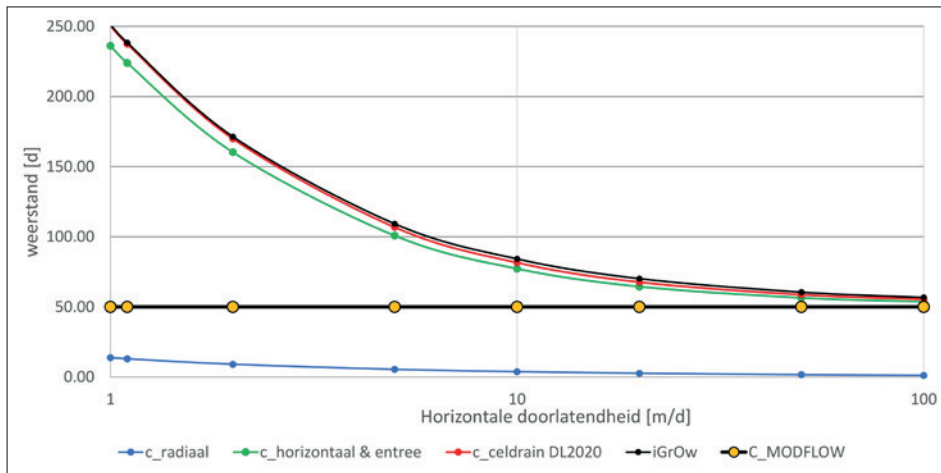
Afbeelding 6: Effect van de celbreedte op de celdrainweerstand voor een éénlaagssysteem, berekend met 3 methoden.

Bij bovenstaande beschrijving zijn we ervan uitgegaan dat de cel kleiner is dan de afstand tussen de waterlopen. Als er meerdere waterlopen in een cel liggen, telt natuurlijk de afstand tussen de waterlopen voor de horizontale weerstand. Omdat de meeste modellen in Nederland meerlaags zijn, laten we in afbeelding 8 zien dat binnen grotere cellen de slootafstand niet lineair is gerelateerd aan de horizontale weerstand, die vaak maatgevend is voor de celdrainweerstand. Onze tools houden rekening met deze mogelijke gevallen.



Afbeelding 7: Effect van de celbreedte (kleiner dan slootafstand) op de verschillende weerstanden voor een meerlaagssysteem.

Om het toepassingsgebied breder te trekken, kijken we ook naar het effect van de horizontale doorlatendheid op de verschillende (deel)weerstanden. Als de horizontale doorlatendheid kleiner wordt (bij toename van kleiige of venige afzettingen), groeit de horizontale weerstand voor grondwateraanvulling binnen een cel. Onderstaande afbeelding 8 is gebaseerd op de formules van DL2020 en geeft het effect aan als de horizontale weerstand binnen een cel wordt genegeerd zoals bij gebruik van de modflow-weerstand.



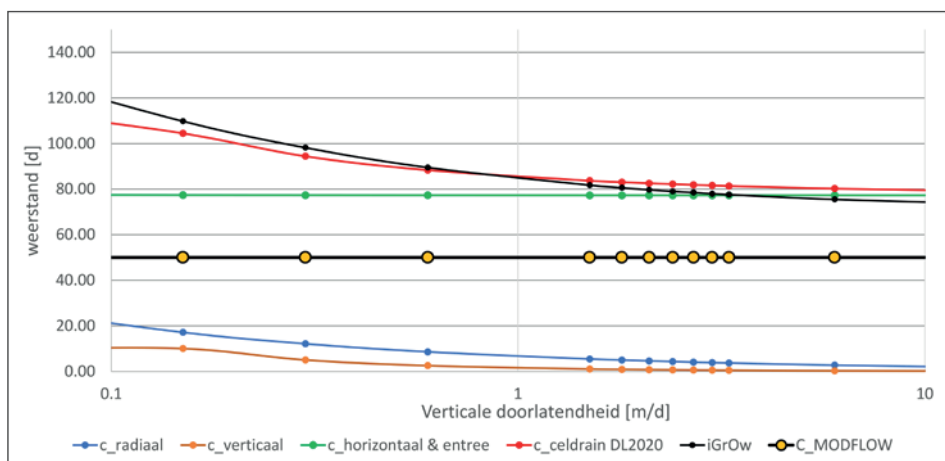
Afbeelding 8: Effect van de horizontale doorlatendheid op verschillende (deel)weerstanden berekend op basis van DL2020.

Bij het opschalen van cellen op basis van een fijn MODFLOW-model wordt vaak gebruikgemaakt van het optellen van conductances, wat neerkomt op het harmonisch optellen van parallelle weerstanden. Daarbij wordt geen rekening gehouden met de horizontale weerstand, die toeneemt met de celgrootte zoals hiervoor beschreven. Uit ervaring weten we dat de horizontale weerstand, dus de celdrainweerstand, in cellen groter dan zeg 100 meter in hoge zandgronden hiervoor gevoelig is. Hetzelfde geldt voor de horizontale weerstand in grote cellen in gebieden met lage doorlatendheid, zoals veengebieden. Bij structurele herinrichtingsmaatregelen, zoals het dempen van sloten, wordt de horizontale stromingsafstand en dus de horizontale weerstand onderschat. Hierdoor wordt het effect van dempen van sloten onderschat; de grondwaterstand neemt meer toe dan gemodelleerd. Daarom pleiten wij ervoor om het opschalen te doen op basis van onze tools. Dan weet je zeker dat het voor alle typen cellen in het model goed gaat.

Valkuil 2: Radiale weerstand

De radiale weerstand beschrijft het effect van het toeknijpen (contractie) van stroomlijnen naar vaak kleine uitstroomzones van de waterloop. De radiale weerstand neemt lineair toe met de celgrootte. De radiale weerstand is vaak relevant in grote cellen, maar ook als een cel een relatief dik watervoerend pakket bevat en/of bij sterke gelaagdheid (anisotropie) in het topsysteem. Ook in een niet dik maar anisotroop watervoerend pakket is de radiale weerstand relevant. De blauwe

lijn in onderstaande afbeelding 9 laat zien dat de radiale weerstand toeneemt met de afname van de verticale doorlatendheid.



Afbeelding 9: Effect van de verticale doorlatendheid op verschillende deelweerstandens bepaald met DL2020 en de celdrainweerstand uit drie verschillende methoden.

De modflow-weerstand kan dus significant te klein zijn omdat de radiale stroming niet wordt meegenomen. Ook in dit geval is gebruik van onze tool hiervoor de oplossing.

Bij het opschalen van een fijn model worden de celafmetingen groter en daarmee groeit de radiale weerstand. Ook bij het samentrekken van cellen in verticale richting groeit de radiale weerstand.

Valkuil 3: Entree- of waterbodemplaat

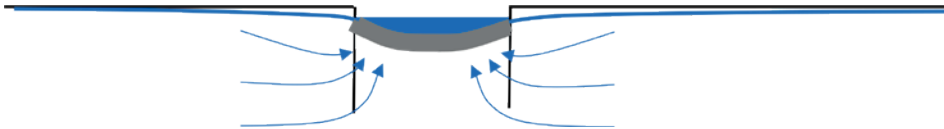
Waterbodemplaat 1: Variatie in de doorstroming

Bij relatief brede waterlopen met lage weerstand, zoals stromende beken in bijvoorbeeld Noord-Brabant (afbeelding 10), stroomt het grondwater toe langs de oevers en niet of nauwelijks in het midden.



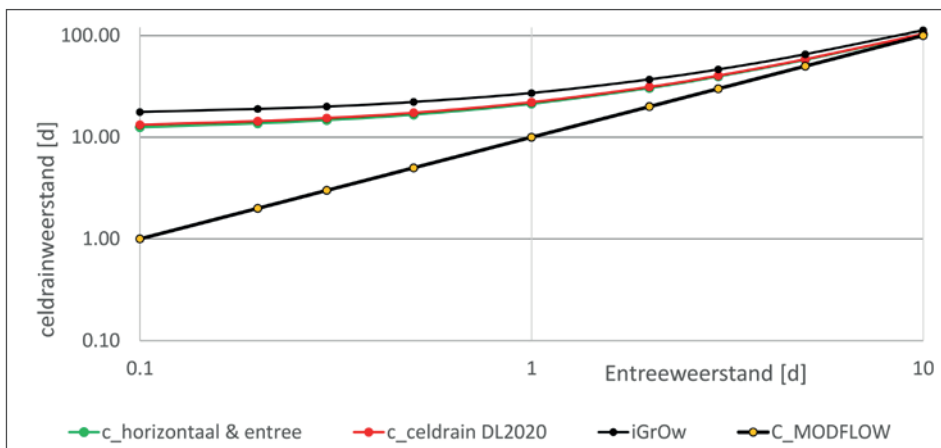
Afbeelding 10: Brede waterloop met zandige bodem (bijv. rivier in Noord-Brabant) [Zicht op het Amerdiep ©Bert van As: CC BY-SA 4.].

In de MODFLOW-methode wordt de weerstand van de hele waterbodem gebruikt in de celconductance. De lineaire verscaling naar de celgrootte die daarbij wordt gebruikt, veronderstelt dat de stroming over de waterbodem (natte omtrek) uniform is. Dat is zelden zo: de stroming treedt meestal hoofdzakelijk langs de oevers op, zie afbeelding 11.



Afbeelding 11: Stroming van grondwater naar brede waterloop.

De voor de grondwaterstroming effectieve natte omtrek is dan niet gelijk aan de natte omtrek van de waterloop. De effectieve breedte is dan kleiner omdat de grondwaterstand midden onder de waterloop, dus tussen de oevers, vrijwel gelijk wordt aan de waterstand. Er is daar dan geen potentiaalverschil en dus geen stroming meer, terwijl de waterbodem uit schoon zand kan bestaan. De grootte van de niet-doorstroomde zone hangt af van de parameters van het topsysteem. De modflow-weerstand leidt in deze gevallen tot een onderschatting van de entreeweerstand en dus de celdrainweerstand (afbeelding 12).



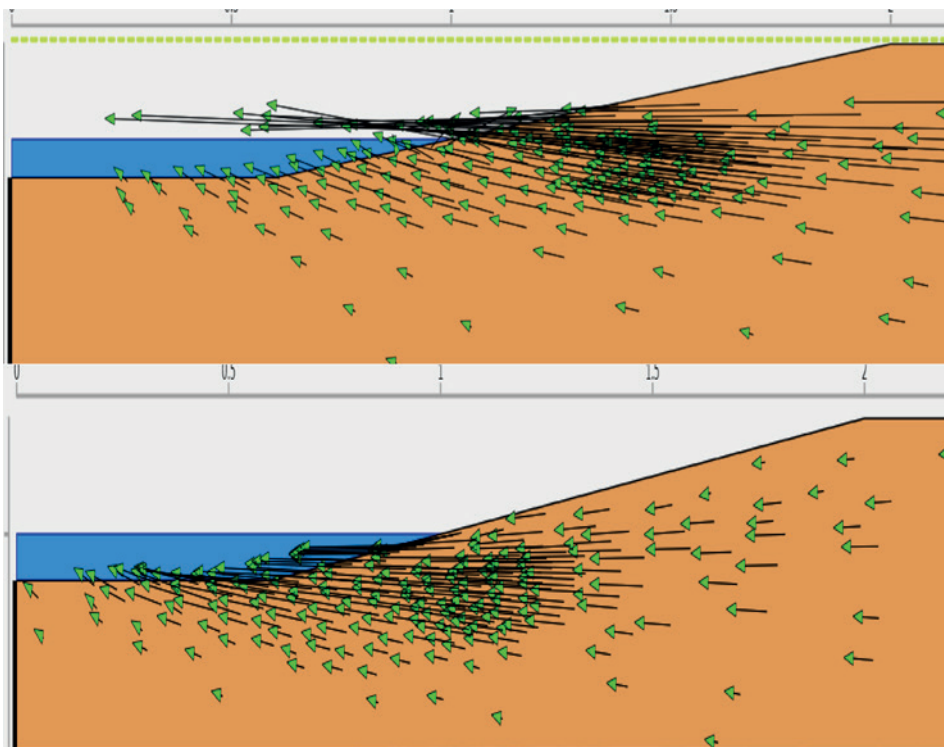
Afbeelding 12: Effect van variatie van de entreeweerstand op de verschillende weerstanden bepaald met de verschillende methoden.

Afbeelding 12 (let op: log-schalen) is gebaseerd op een dun zandig watervoerend pakket ($D = 3$ [m] $k_h = 10$ [m/d] $k_v = 3$ [m/d]) boven een dunne scheidende laag (weerstand 10 [d]) onder een brede beek ($B = 10$ [m]), zoals wordt aangetroffen in Brabant. De zandige beekbodem heeft een lage tot geen weerstand. Als dan in het numerieke model de bodemweerstand op 0.1 [d] wordt gesteld, en een automatische optimalisatie op grondwaterstanden in het eerste watervoerend pakket (dus onder het topsysteem) wordt uitgevoerd, blijkt dat de weerstand in de cel met de waterloop niet in de orde van 10 [d] ligt maar een veelvoud daarvan: 25 tot 30 [d]. Wordt deze weerstand dan toegekend aan de dunne scheidende laag – omdat het onlogisch is om die aan de waterbodem toe te kennen – dan zal

een peilverhoging als natuurvriendelijke maatregel te veel effect laten zien in het freatisch pakket boven de scheidende laag en te weinig in het watervoerend pakket eronder. Dan lijkt het alsof de peilverhoging vooral lokaal effectief (goed voor de natuur) is en geen invloed heeft op grotere afstand (goed voor de boer ernaast), terwijl het omgekeerde het geval is. Dit is een voorbeeld dat werkelijk is opgetreden.

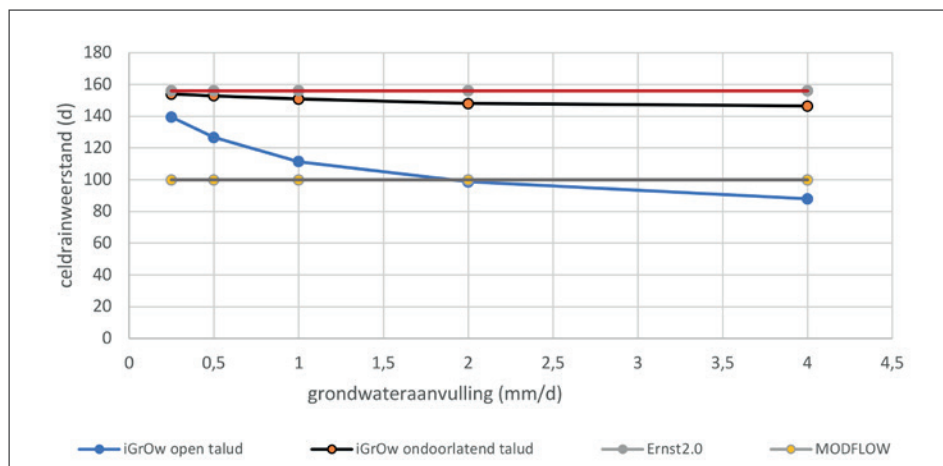
Waterbodemweerstand 2: Stroming bovenlangs door het talud

De bodemweerstand van het talud boven de waterspiegel is vaak kleiner dan die van de waterbodem. Dan stroomt het grondwater boven de waterspiegel uit bij kleinere waterlopen. Dat geeft een ander resultaat voor fluxen en stroombaanberekeningen nabij de waterloop (zie afbeelding 13). Dit is bijvoorbeeld van belang voor berekening van de uitspoeling van meststoffen, omdat zowel de snelheid als de plaats van uitstroming verkeerd wordt bepaald.



Afbeelding 13: Snelheden berekend met iGrOw voor uitstroming door het talud (boven) en door de waterbodem (onder).

Bij een vergroting van de grondwateraanvulling neemt de uitstromingsdikte door het talud toe door de verhoging van de grondwaterstand en wordt de stroming door het talud belangrijker. Dan wordt de effectieve weerstand van de waterbodem, dus de celdrainweerstand, kleiner. Zie blauwe lijn in afbeelding 14.

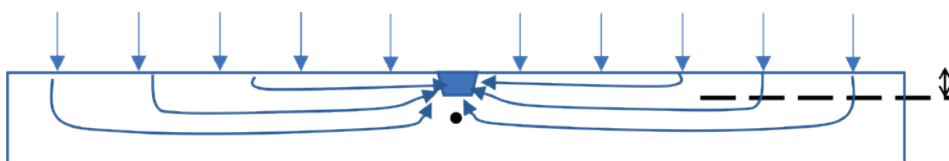


Afbeelding 14: Verandering van de celdrainweerstand met doorstroming door het talud (blauwe lijn).

Bij het niet meenemen van taludstroming zal de grondwaterstand in de cel van de waterloop te hoog worden berekend (te grote weerstand tot de waterloop). Dit is een belangrijke oorzaak voor niet-lineair gedrag van de conductance bij hoge grondwaterstanden. Voor de toepassing in numeriek modelleren willen wij een rekenregel voor de taludweerstand gaan ontwikkelen als een van onze tools.

Valkuil 4: Verticale weerstand

Neerslag die aankomt op het freatisch vlak binnen een cel met waterloop stroomt ook in verticale richting naar de waterloop. Onderstaande afbeelding 15 schetst de stroming als het bovenste watervoerend pakket met een enkele cel wordt gemodelleerd. In MODFLOW wordt de verticale weerstand meegenomen tussen rekenknooppunten onder de bovenste rekenknoop maar niet erboven. De verticale weerstand in de celdrainweerstand geldt dan ook over de gemiddelde verticale stromingsafstand boven het rekenknooppunt van de cel.



Afbeelding 15: Stroming in het gebied van een cel met de gemiddelde verticale stromingsafstand boven het rekenpunt.

De verticale weerstand hangt af van de verticale doorlatendheid en kan van belang zijn bij significante anisotropie in het watervoerend pakket. Van alle bovenbeschreven weerstanden is de impact van deze weerstand meestal het kleinst en hij valt vaak weg ten opzichte van de radiale weerstand, zie afbeelding 9.

Landsdekkende toepassing

Tijdens onze onderzoeken hebben wij de celdrainweerstand berekend met onze tools Ernst 2.0 en DL2020. Ook hebben we de MODFLOW-methode vergeleken met de waarden uit iGrOw, ons ijkmodel. Om een meer compleet beeld voor heel

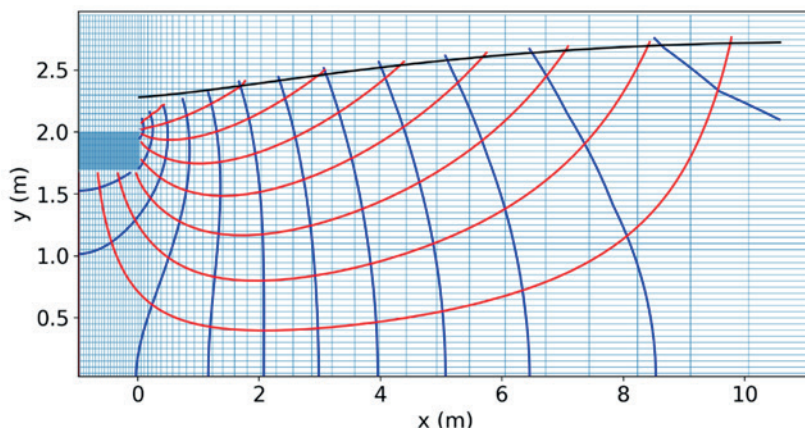
Nederland te krijgen, zijn grote aantallen berekeningen nodig. Op basis van doorlaatvermogens en weerstanden van de bovenste twee pakketten uit het LHM hebben wij een representatieve dataset samengesteld van de geohydrologische situaties in Nederland. Voor de overige parameters hebben we representatieve ranges bepaald voor sloten in een klei- of zandbodem en voor beken in een zandbodem. Tabel 1 geeft de maximum- en minimumwaarden waar tussen uniform is gemonsterd om steeds 500 gevallen door te rekenen.

Tabel 1: Parameters gebruikt voor de landsdekkende toepassing

Parameter	Klei		Zand		Beek	
	Onder-grens	Boven-grens	Onder-grens	Boven-grens	Onder-grens	Boven-grens
Domeinbreedte (m)	50.0	50.0	125.0	125.0	500.0	500.0
Domeinhoogte (m)	3.0	3.0	3.0	10.0	5.0	15.0
Slootbreedte (m)	1.0	3.0	0.5	1.5	5.0	10.0
Ontwateringsdiepte (m)	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0
Slootdiepte (m)	0.5	0.5	0.3	0.3	1.5	1.5
Horizontale doorlatendheid (m/d)	0.5	2.5	0.5	3.0	2.0	10.0
Anisotropie kv/kh (-)	0.1	0.3	0.1	0.5	0.1	0.5
Neerslagoverschot (m/d)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
Slootweerstand (d)	1.0	2.5	1.0	2.5	1.0	2.5
Aquitardweerstand (d)	50.0	1000.0	50.0	1000.0	50.0	1000.0
Stijghoogteverschil aquifer (m)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

iGrOw is heel sterk in de grafische presentatie van resultaten en om een model snel en flexibel te analyseren, maar het bleek moeilijk in te zetten voor het geautomatiseerd doorrekenen van al deze situaties. Daarom is voor de landelijke vergelijking MODFLOW 6 gebruikt met modellen die qua detail en rekenresultaten dezelfde nauwkeurigheid hebben als bij het rekenen met iGrOw. De volledige Python-code voor de MODFLOW 6 berekeningen, de analytische functies, en de afbeeldingen is te vinden op GitHub: <https://github.com/Huite/effective-drainage-resistance>.

Een voorbeeld van een MODFLOW 6 model is weergegeven in afbeelding 16. De modellen zijn fijn gediscriteerd: 5 cm in de horizontaal, en 5 cm in de verticaal rondom de sloot. In de horizontaal groeit vanaf de slootkant de celgrootte exponentieel, met een groeifactor van 1,1. Het model rekt met homogene k-waarden en met verticale anisotropie. Het model rekt ongespannen en gebruikt de MODFLOW 6 Newton formulering (de grondwaterstand bepaalt de doorstroomde dikte). De Recharge-package levert de neerslag aan de bovenzijde. Aan de onderzijde bevindt zich een General Head Boundary die het effect van het diepere watervoerende pakket simuleert. De sloot is via de River-package geschematiseerd; de *seepage face* door middel van de Drain-package. Kortom, het model bevat al de bovengenoemde aspecten voor verzadigde stroming in een verticale doorsnede met daarbij de variabele doorstroomde dikte.



Afbeelding 16: Een fijnchalig tweedimensionaal MODFLOW 6 model. Over het gehele model valt neerslag, dat van rechts naar links richting de sloot met seepage face stroomt. De isohypsen zijn in het blauw afgebeeld, de contouren van de stroomfunctie in het rood. De grondwaterstand is met de zwarte lijn afgebeeld. De grenzen van de cellen zijn in het lichtblauw getekend. De x-grootte van de cellen groeit exponentieel vanaf de slootkant ($x=0$).

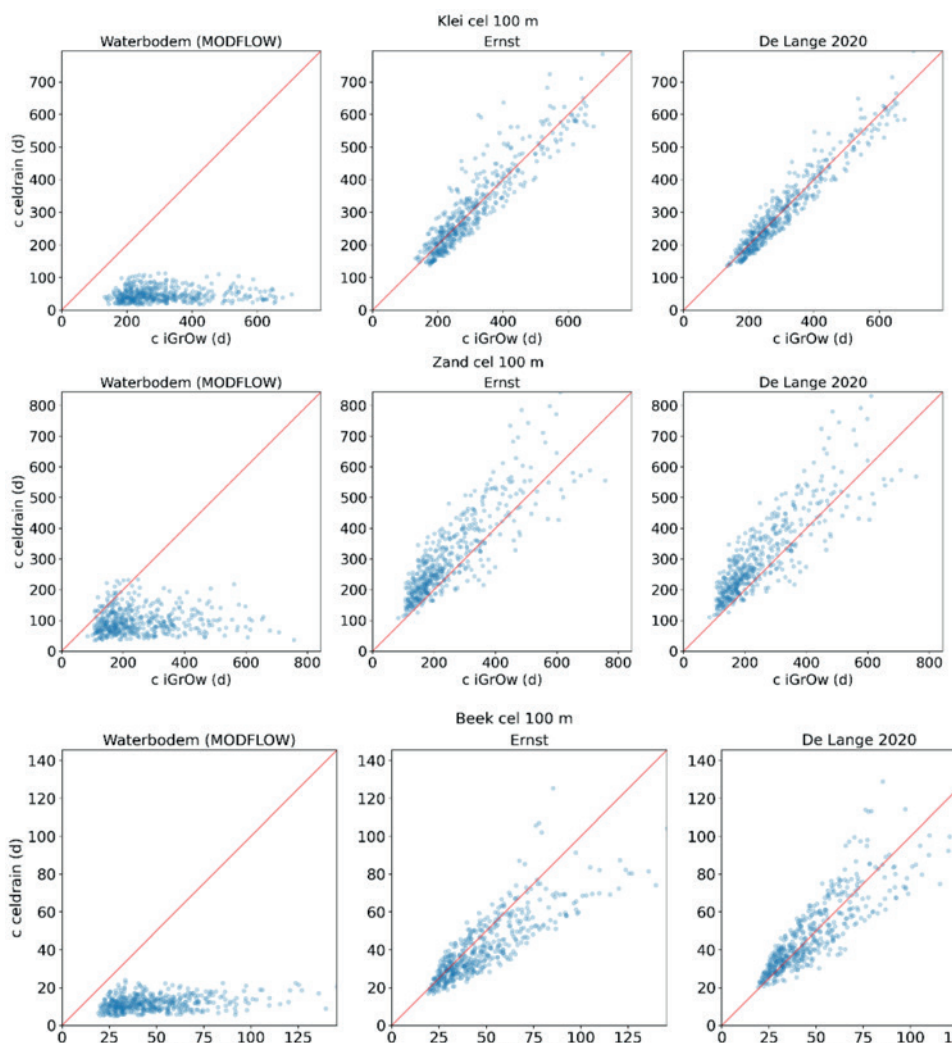
Vervolgens is met vier methoden de celdrainweerstand bepaald: de ‘werkelijke’ is berekend uit de gemiddelde stijghoogte en de drainafvoer (MODFLOW 6) en de overige drie zijn berekend met de in de vorige paragrafen beschreven methoden (‘MODFLOW’, ‘Ernst’, ‘DL2020’). Dit is gedaan voor cellen van 100×100 m door de gemiddelde grondwaterstand te berekenen voor slootafstanden kleiner dan 100 m. De resultaten hiervan zijn afgebeeld in afbeelding 17.

Uit deze resultaten, geldig voor de hierboven beschreven gevallen in Nederland, blijkt dat MODFLOW de plank flink kan misslaan. ‘Ernst2.0’ en ‘DL2020’ geven logische, bruikbare resultaten. De volledige Python-code voor de MODFLOW 6 berekeningen, de analytische functies volgens De Lange 2020, en de afbeeldingen is te vinden via bovengenoemde link op GitHub.

Samenvatting en conclusie

De weg naar een correcte modellering van de interactie grondwater-oppevlakte-water is bezaaid met valkuilen. In dit artikel beschrijven we hiervan voorbeelden aan de hand van de conceptuele benadering met deelweerstand, vergelijkbaar met die in het proefschrift van Ernst, namelijk de horizontale, radiale, entree- en verticale weerstand.

Voor de modellering van de relatie tussen het grondwatersysteem en het oppervlaktewatersysteem hebben wij de celdrainweerstand gedefinieerd, die kan worden gezien als de som van de deelweerstand. De analyse op basis van de vier deelweerstand geeft een modelleur inzicht in mogelijke oorzaken van fouten in de bepaling van, uiteindelijk, de conductance in MODFLOW. Een belangrijke bron van fouten is het op klassieke wijze numeriek opschalen van kleine naar grote cellen waarbij de vergroting van de horizontale en de radiale weerstand wordt genegeerd, zodat de celdrainweerstand wordt onderschat en de conductance in MODFLOW wordt overschat. Als voorbeeld voor de praktijk



Afbeelding 17: De celdrainweerstand berekend met drie methoden ('MODFLOW', 'Ernst' 'De Lange 2020', naast elkaar op de y-as) vergeleken met de resultaten van een tweelaags numeriek model (MODFLOW 6 vergelijkbaar met iGrOw op de x-as) voor de typen 'klei', 'zand' en 'beek in zand' (van boven naar beneden) voor cellen van 100x100 m en slootafstanden kleiner dan celgrootte.

noemen we dat bij het dempen van sloten de weerstand in het grondwater-systeem wordt onderschat, waardoor de dynamiek in de freatische grondwater-stand wordt onderschat.

Als eerste stap in onderzoek naar de gevolgen voor grootschalige grondwater-modellering hebben wij een selectie van invoerparameters uit de landelijke data-bestanden van het LHM gebruikt in de vergelijking van de celdrainweerstand uit onze tool met de waarde volgens de MODFLOW-benadering en volgens een gedetailleerd MODFLOW 6 model vergelijkbaar met onze iGrOw-tool. Daaruit blijkt dat de MODFLOW-benadering de plank vaak flink mislaat voor cellen van

100 meter en groter, en dat de formules van DL2020 in het algemeen geschikt zijn om de celdrainweerstand te bepalen. Wij bevelen dan ook aan om de verscaling in de klassieke RIVER- en GHB-tools in MODFLOW definitief en direct te vervangen door onze Python-tool, te vinden op Github: <https://github.com/Huite/effective-drainage-resistance>.

Literatuur

Ernst, L.F. (1962) Grondwaterstroming in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen; Proefschrift UU; Pudoc, Wageningen.

De Lange, W.J. (2025) Equations for the surface water - groundwater interaction. Derivation of formula's for the cell-drain-resistance referred to as DL2020. Version 0.6 <https://github.com/Huite/effective-drainage-resistance>.

Van Bakel, J. (1996) De Hydrologische grootheid 'Ernst'; in: *Stromingen*, vol. (2) nr. 2, pag. 17-21.

English title: Pitfalls in the Parametrization of Surface Water in a Groundwater Model

Summary

The road to a proper model of the interaction between groundwater and surface water is paved with pitfalls. In this paper we describe examples by applying the concept of sub-resistances as defined by Ernst in 1962.

To model the relationship between groundwater and surface water, we introduce the so-called cell-drain-resistance, which is the sum of Ernst's sub-resistances and should be used as the resistance parameter in MODFLOW's conductance. The four sub-resistances are called the horizontal, radial, entrance and vertical resistances. These sub-resistances are described by formulas that are included in a Python script and available in the National Hydrologic Model LHM.

The flow concepts and formulas of the four sub-resistances give insight in the parameters that determine the cell-drain-resistance. The lack of knowledge regarding these concepts in modeling practice causes significant errors in the value of the cell-drain-resistance. A major error occurs during the numerical upscaling of small cells into large cells because the growth of both the horizontal and radial resistances is neglected, resulting in an overestimation of conductance in MODFLOW.

Using a selection of input parameters from the national database of LHM, we compared the cell drain resistance from the 'MODFLOW method' with two analytically based values and a very detailed 2D vertical MODFLOW-model. We conclude that the 'MODFLOW method' can be considerably wrong for cells of 100 meter and larger. In contrast, the formulas of De Lange (DL2020) are generally applicable for calculating the cell drain resistance.

Our general conclusion is that knowledge and tools are sufficiently available to accurately model the interaction between groundwater and surface water in MODFLOW, but they are hardly used. Therefore, we recommend replacing the current 'MODFLOW method' with our Python tool, which is available through <https://github.com/Huite/effective-drainage-resistance>.

Auteurs

WIM DE LANGE GEPENSIONEERD, WIMLANGLELY@OUTLOOK.COM

JAN VAN BAKEL, GEPENSIONEERD, JAN.VAN.BAKEL@HETNET.NL

PAUL TORFS, GEPENSIONEERD, PIJF.TORFS@GMAIL.COM

HUITE BOOTSMA, DELTARES, HUIITE.BOOTSM@DELTARES.NL

JACCO HOOGEWOUD, ZELFSTANDIG ADVISEUR,
JACCO.HOOGEWOUD@ADVIESINWATER.NL