

K. Buis¹, C. Anibas², K. Bal¹,
R. Banasiak³, L. DeDoncker³,
N. De Smet^{1,4}, M. Gerard¹,
S. van Belleghem¹,
O. Batelaan², P. Troch³,
R. Verhoeven³ en P. Meire¹

Fundamentele studie van uitwisselingsprocessen in rivierecosystemen - Geïntegreerde modelontwikkeling

¹ Universiteit Antwerpen, Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer

² Vrije Universiteit Brussel, Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde

³ Universiteit Gent, Laboratorium voor Hydraulica, Vakgroep Civiele Techniek

⁴ Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, Land & Water Management

De hoeveelheid water die naar de kustzee stroomt, wordt voor een belangrijk deel bepaald door de eigenschappen van het stroomopwaarts gelegen bekken. Dit geldt tevens voor de kwaliteit van het water (e.g. nutriënten). Recentelijk komt steeds meer het besef dat de temporele dynamiek (de "hot moments") en de heterogeniteit van de watersystemen, waaronder de interactie met de terrestrische ecosystemen, (de "hot spots") van groot belang zijn voor het stroomafwaarts transport van materiaal.

Om dit te kunnen analyseren en bestuderen is geïntegreerde modellering van watersystemen nodig. Met "geïntegreerd" wordt hier niet enkel een verbinding van disciplines (e.g. oppervlaktewater(hydraulica), grondwater, ecologie) verstaan, maar ook een daadwerkelijk interactieve koppeling daartussen, waardoor cascade- en terugkoppelingsprocessen kunnen worden bestudeerd.

In dit artikel worden de ontwikkeling, de kenmerken en enkele illustraties van een dergelijk geïntegreerd model getoond. De accenten worden op dit moment gelegd op de rol van waterplanten en de interactie tussen het ondiepe grondwater en oppervlaktewater in de waterbodem op het functioneren van watersysteem.

Achtergrond

De kwaliteit en kwantiteit van het naar zee afgevoerde water wordt bepaald in het rivierbekken. Niet alleen vindt daar de toevoer plaats, maar resulteren hydrologische, chemische en biologische processen in omzetting en verwijdering van materiaal (Billen et al. 1991; Fisher et al. 1998).

Er bestaan rekenmodellen en studies waar men voor (deel)stroomgebieden het transport van verschillende componenten probeert te begrijpen en kwantificeren door koppeling van landschapseenheden (bos, landbouw, wetlands, bebouwing) aan het waterloopnetwerk. De uitwisseling tussen de landschapseenheden is veelal sterk vereenvoudigd beschreven en vaak is de studie gericht op één of enkele componenten (pesticiden, stikstof). Voor een accurate beschrijving en inschatting van uitwisselingsprocessen op (sub)bekkenschaal is echter een goed begrip van het functioneren van land-water overgangen (ecotones) nodig, met een accent op de rol die de temporele dynamiek en ruimtelijke heterogeniteit spelen, de zogeheten "hot moments" en "hot spots" (McClain et al. 2003). Inzicht is dan vereist in de hechte interactie tussen processen en structuren die bepalend zijn voor de afvoer van water met daarin opgeloste stoffen en particulier materiaal.

Het voorgaande vormt de achtergrond en motivatie van een lopend FWO-onderzoek (G.0306.04 - inmiddels verlengd tot 2010). De hoofddoelstelling van dit project is om te onderzoeken hoe de diverse fysische, chemische en biologische processen en hun interacties invloed hebben op uitwisseling van water, opgeloste stoffen en particulier materiaal in twee kenmerkende rivierecosystemen: beken met hun oeverzones (de Aa in de Kleine

Nete vallei) en overstromingsgebieden in verbinding met de rivier (het Demerbroek tussen Zichem en Testelt). In het kader van dit onderzoek worden metingen uitgevoerd (veldcampagnes, monitoring en experimenten) en vindt er modelontwikkeling plaats. De uitgevoerde metingen kennen een tweeledig karakter. Enerzijds worden daarmee data gegenereerd om de modellen te calibreren en valideren. Anderzijds worden de uitgevoerde metingen en experimenten gebruikt om procesbeschrijvingen te formuleren en te ijken.

Modelintegratie

De ontwikkeling van geïntegreerde numerieke ecosysteemmodellen is essentieel in dit project (Amoros et al. 1996). In dit artikel wordt de aanpak geschetst van de geïntegreerde modelontwikkeling dat tot de realisatie van algemene dynamische ecosysteemmodellen voor stromende wateren moet leiden (i.e. een beek- of riviertraject, overstromingsgebied, of koppeling van beide).

De interactie tussen verschillende compartimenten en processen van het watersysteem dienen hiertoe te worden gekoppeld, zodat cascade- en terugkoppelingsprocessen kunnen worden beschreven, die het transport en de retentie van materiaal bepalen.

Als voorbeeld kan de rol van waterplanten in de Vlaamse laaglandbeken gelden. Door de verhoogde weerstand tegen stroming, ten gevolge van de ontwikkeling van macrofyten, ontstaat veelal een heterogeniteit in stromingspatronen met lagere snelheden in de macrofyten-patches en hogere in de "vrije" bedding. Daardoor vindt sterkere sedimentatie van aangevoerde (organische) partikels plaats tussen de macrofyten. Deze

verhoogde toename van organisch materiaal in de waterbodems waar de waterplanten staan, leidt tot een verschuiving van mineralisatie processen. Naast de aerobe afbraak zullen andere microbiële afbraakprocessen aan belang winnen, omdat er niet genoeg zuurstof naar de waterbodem kan worden aangevoerd. Denitrificatie, waarbij nitraat als electronenacceptor wordt gebruikt, is een belangrijk mineralisatieproces en doet nitraat verdwijnen uit het watersysteem. Dit is een illustratie van een cascade effect.

Tegelijkertijd komen er nutriënten vrij in de bodem uit het afgebroken organisch materiaal, waardoor de waterplanten massaler kunnen gaan groeien. Hier is sprake van een stimulerend terugkoppelingsproces. Immers verhoogde groei leidt tot een nog hogere retentie van particulier materiaal, etc.

Een ander ecologisch belangrijk cascade effect is het feit dat waterplanten als "ecosystem engineers" een belangrijk (deel)habitat vormen voor organismen, met name macroinvertebraten. Deels vormt het een schuilplek tegen predatoren, of is het juist de fourageerplek voor bijvoorbeeld vissen.

Een moeilijkheid in de ontwikkeling van geïntegreerde modellen, die bovenstaande processen kunnen simuleren, is het feit dat de verschillende disciplines, zoals hydraulica, grondwatermodellering, waterkwaliteits- en ecologische modellering, elk hun eigen software omgevingen kennen met voor hen de meest ideale structuur en eigen analyse tools. Er dient een modelleeromgeving gevonden te worden die in staat is om de verschillende procesbeschrijvingen, numerieke oplossingsmethoden en dergelijke te koppelen.

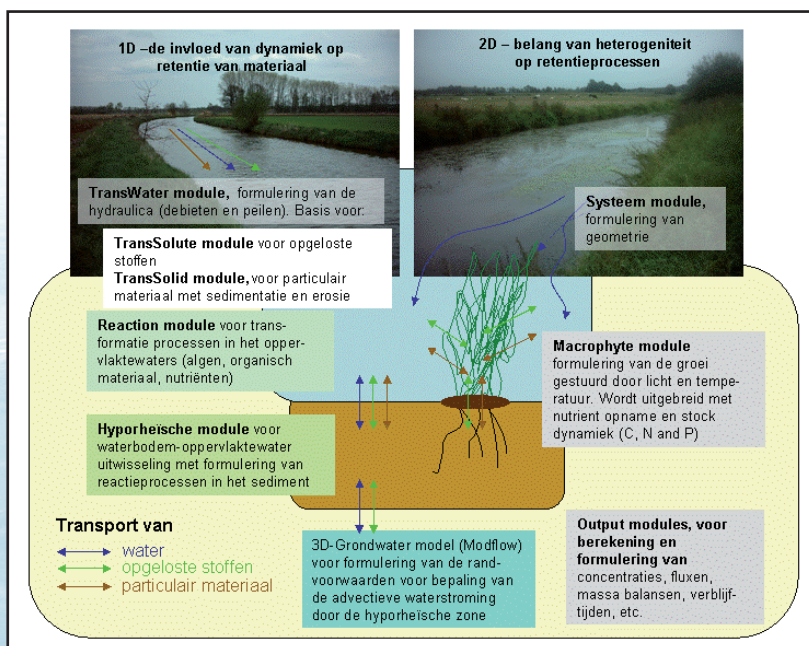
Voor de realisatie van de modellering in bovengenoemd project is gekozen voor 'FEMME' ('a Flexible Environment for Mathematically Modelling the Environment', (Soetaert et al. 2002). Dit

is een gebruikersvriendelijke fortran-omgeving ontwikkeld aan het Nederlands Instituut voor Ecologisch Onderzoek, Centrum voor Estuariene en Mariene Ecologie te Yerseke (NIOO-CEME), waarin vele basisvoorzieningen voor modelstudies beschikbaar zijn. Hier moet men denken aan uitgebreide opties voor runspecificaties (zoeken naar steady state, dynamische runs met forcing), meerdere integratieroutines, koppeling van data aan modeluitkomsten, calibratie met meerdere zoekmethodes naar het minimum, gevoeligheidsanalyse en andere (<http://www.nioo.knaw.nl/cemo/femme/>). Dit stelt de gebruiker in staat om zich direct op de formulering van de systeemstructuur en procesbeschrijvingen van het gewenste model te richten. Tevens is het modulair van opbouw, zodat een model gemakkelijk uitgebreid of juist weer vereenvoudigd kan worden.

Figuur 1 geeft een schets van het model voor de Aa. Het bestaat uit meerdere modules:

- o **Systeem:** Hierin wordt de formulering voor de geometrie (breedte, verhang bedding, waterpeilen en volumes) beschreven. Ook wordt hier bepaald in hoeveel compartimenten of cellen het traject van de beek of rivier wordt verdeeld.
- o **TransWater:** In deze module wordt de hydraulica van het watersysteem geformuleerd. Er zijn meerdere opties lopend van constant debiet en volume tot volledige dynamische Saint-Venant beschrijvingen op basis van de Manning coëfficiënt. De Manning-waarde kan indien gewenst een functie zijn de van macrofyten biomassa (gebaseerd op veldmetingen).
- o **TransSolute:** Hierin wordt het transport en dispersie van opgeloste stoffen beschreven.
- o **TransSolid:** Hierin wordt het transport en sedimentatie en erosieprocessen beschreven. Deze routine is conceptueel van aard en is nog niet onderbouwd met data.
- o **Macrophytes:** In deze module wordt de groei van waterplanten door het jaar gesimuleerd met lichtintensiteit en temperatuur als sturende variabelen.
- o **Reaction:** Hierin kunnen reacties die in het oppervlaktewater optreden (algengroei, nitrificatie) worden beschreven.
- o **Hyporheic zone:** Dit is een waterbodem-model dat in verticale resolutie het transport (diffusief en advectief) en de reactiviteit van componenten kan beschrijven. Het vormt een verbinding tussen het (ondiepe) grondwater en het oppervlaktewater. Mineralisatieprocessen in de bodem kunnen hier worden gesimuleerd, samen met resulterende fluxen over het grensvlak van de waterbodem van nitraat, ammonium, tracers of andere componenten.
- o **Output of Analyse modules:** De bovenvermelde modules beschrijven de systeemdynamiek. Op basis van de onderzoeksvraag (Wat is de retentie en verwijdering van stikstof?) kunnen afgeleide variabelen (Massabalansen van stikstof voor een modelsimulatie, met berekening van bijvoorbeeld de totale verwijdering.) worden geformuleerd.

Figuur 1. Overzicht van het modulair opgebouwd beekmodel voor de Aa.



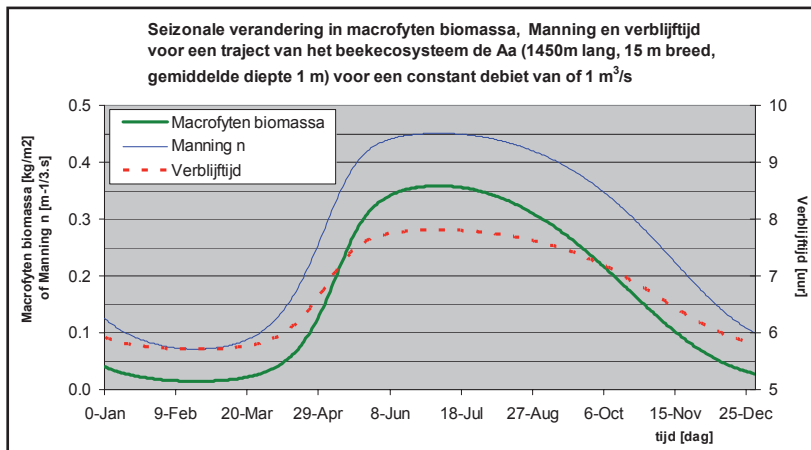
Aanpassing, uitbreiding of toevoegen van nieuwe modules is mogelijk.

In de volgende twee paragrafen worden enkele voorbeelden gegeven van de koppeling tussen de disciplines van de oppervlaktewaterhydraulica, grondwaterstroming, waterkwaliteit en ecologie.

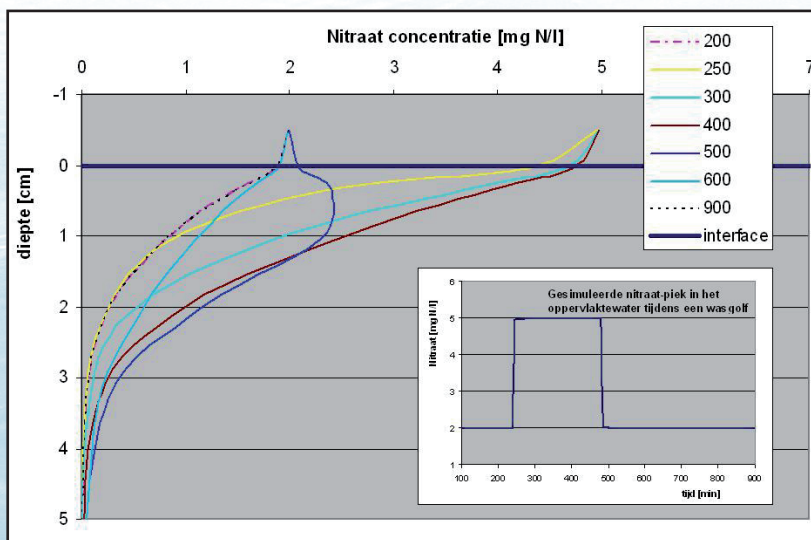
De interactie tussen stroming en waterplanten

Waterplanten verhogen de weerstand tegen stroming met opstuwing tot gevolg. Hoe sterk wordt de retentie of verblijftijd van het water hierdoor bepaald? Op basis van veldmetingen is een empirische relatie bepaald tussen manning-coëfficiënt en de macrofyten biomassa. Tevens is de module voor macrofytengroei opgesteld en gecalibreerd met velddata. In figuur 2 wordt de verandering van de verblijftijd doorheen het jaar getoond voor een constant debiet van 1 m³/s in een 1450m lang traject van de Aa. In de winterperiode met nagenoeg geen waterplanten ligt deze net onder de 6 uur. In de zomer, wanneer er een hoge biomassa aanwezig is in de rivier, is de retentietijd

Figuur 2. Verblijftijd van water als resultante van biomassagroei van waterplanten en daarmee gepaard gaande verhoging van de Manningweerstand.



Figuur 3. Dynamiek van nitraat in de waterbodem als resultante van een concentratiepiek in het langstromende oppervlaktewater. Op een aantal tijden (in minuten) in de wasgolf worden de gradiënten in het sediment getoond.



verhoogd naar ongeveer 7 uur en 45 minuten (zie voor een uitgebreide illustratie het WSK8 artikel: Stromingsweerstand in rivieren door de aanwezigheid van macrofyten – De Doncker et al.).

De interactie tussen oppervlaktewater en de waterbodem

Uitwisseling tussen waterbodem en oppervlaktewater wordt bepaald door diffusief en advectief transport. Voor deze module (gebaseerd op Soetaert, et al. 1996) ontbreekt een goede dataset voor de Aa om bijvoorbeeld nutriëntenuitwisselingen en reacties te simuleren en analyseren. Figuur 3 toont voor een hypothetische puls van nitraat (bijvoorbeeld tijdens een wasgolf) de dynamiek van gradiënten in de waterbodem, als resultante van diffusie, concentratie in het oppervlaktewater en een denitrificatiesnelheid in de waterbodem. De advectieve stroming in de waterbodem (kwel of infiltratie) wordt bepaald door het drukverschil tussen het grondwater en het oppervlaktewaterpeil. Verandering van de waterpeilen in de waterloop, bijvoorbeeld tussen zomer en winter of door wasgolven doorheen de waterloop, doen deze transportterm veranderen en dus ook de uitwisseling van water en daarin opgeloste stoffen. Retentie van materiaal kan dus optreden door opslag in de waterbodem, gevolgd door een latere teruggave van materiaal aan het oppervlaktewater (de zogeheten “transient storage”).

Deze module is in ontwikkeling. Op basis van temperatuurmodellering in de waterbodem wordt de advectieve term (kwel- of infiltratiesnelheid) bepaald. Samen met metingen van het drukverschil tussen oppervlaktewater en het ondiepe grondwater kan de kwelnelheid dynamisch worden beschreven, als functie van waterpeil en grondwaterdruk. De rol van de waterbodem onder invloed van temporale veranderingen (zowel doorheen een seizoen of tijdens een wasgolf) op de retentie en eventuele verwijdering of productie van nutriënten in de waterloop kan zo worden bestudeerd (zie voor een uitgebreide illustratie het WSK7 artikel: Ontwikkeling van een geïntegreerd grondwater-oppervlaktewater interactiemodel op basis van temperatuurprofielen in de rivierbodem – Anibas et al.).

Besluit

De geschetste geïntegreerde 1D-modelontwikkeling is zo opgezet dat het transport van materiaal in een watersysteem, als resultante van interne processen en heterogeniteit, samen met dynamische randvoorwaarden kan worden gesimuleerd. Het is algemeen van karakter en kan op grond van de onderzoeks-, beheers- of beleidsvraag worden aangepast en ontwikkeld. De huidige kernpunten vormen de rol van waterplanten en de uitwisseling tussen oppervlaktewater en de waterbodem op retentie en verwijdering van materiaal. Het gedrag van water en opgeloste stoffen (met name stikstof) wordt verder geïmplementeerd en gecalibreerd

met verzamelde meetgegevens. Een andere, maar ook zeer belangrijke, toepassing is juist het gebruik van modules als analyse methode van veldmetingen of experimenten (bijvoorbeeld het waterbodembodem-model voor schatting van kwel of infiltratie). Deze informatie kan dan gebruikt worden voor verdere ontwikkeling van systeemprocessen of compartimenten in het geïntegreerde model voor rivierecosystemen.

Referenties

Amoros, C., J. Gibert and M. T. Greenwood (1996). Interactions between units of the fluvial hydrosystem. *Fluvial Hydrosystems*. G. E. Petts and C. Amoros: 184-210.

Anibas et al. (2007). Ontwikkeling van een geïntegreerd grondwater-oppervlaktewater interactiemodel op basis van temperatuurprofielen in de waterbodembodem. Congres Watersysteemkennis, studiedag WSK7 'De interactie tussen bodem, grondwater en ecosysteem', Universiteit Antwerpen.

Billen, G., C. Lancelot and M. Meybeck (1991). N, P, and Si Retention along the Aquatic Continuum from Land to Ocean. *Ocean Margin Processes in Global Change*. R. F. C. Mantoura, J.-M. Martin and R. Wollast, John Wiley & Sons Ltd: 19-44.

De Doncker et al. (2007). Stromingsweerstand in rivieren door de aanwezigheid van macrofyten. Congres Watersysteemkennis, studiedag WSK8 'Modellen voor integraal waterbeheer', Universiteit Antwerpen.

Fisher, S., G. , N. Grimm, B. , E. Martí, Martí, R. Holmes, M. and Jones, Jr., Jeremy B. (1998). "Material Spiraling in Stream Corridors: A Telescoping Ecosystem Model." *Ecosystems* **1**(1): 19-34.

McClain, M., E. , E. Boyer, W. , C. L. Dent, S. Gergel, E. , N. Grimm, B. , P. Groffman, M. , S. Hart, C., J. Harvey, W. , C. Johnston, A., E. Mayorga, W. McDowell, H. and G. Pinay (2003). "Biogeochemical Hot Spots and Hot Moments at the Interface of Terrestrial and Aquatic Ecosystems." *Ecosystems* **6**(4): 301-312.

Soetaert, K., de. Clippele, Vanni and P. M. J. Herman (2002). "FEMME, a flexible environment for mathematically modelling the environment." *Ecological Modelling* **151**: 177-193.

Ir. K. Buis
wetenschappelijk medewerker

Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer
Departement Biologie, Universiteit Antwerpen
Universiteitsplein 1, B-2610 Wilrijk (Antwerpen)
tel. +32(0)3 8202295, fax. +32(0)3 8202271
http://www.ua.ac.be/ecobe

*K. Buis¹, C. Anibas², K. Bal¹, R. Banasiak³,
L. DeDoncker³, N. De Smet^{1,4}, M. Gerard¹,
S. van Belleghem¹, O. Batelaan², P. Troch³,
R. Verhoeven³ en P. Meire¹*

¹ *Universiteit Antwerpen, Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer*

² *Vrije Universiteit Brussel, Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde*

³ *Universiteit Gent, Laboratorium voor Hydraulica, Vakgroep Civiele Techniek*

⁴ *Vlaamse Instelling voor Technologische Onderzoek, Land & Water Management*