

# Geïntegreerde modellering van hydrologische processen op rivierbekkenschaal

WetSpa (Water and Energy Transport in Soil, Plant and Atmosphere) is een numeriek ruimtelijk verdeeld hydrologisch simulatiemodel om hydrologische processen te voorspellen op bekkenschaal, met behulp van digitale gegevens betreffende topografie, landgebruik, bodemtype, neerslag en potentiële verdamping. Met behulp van dit model werd het voorkomen van overstromingen onderzocht in het bekken van de Alzette, Groothertogdom Luxemburg. In een eerste toepassing werd het effect van landgebruik nagegaan. Er werden drie scenario's onderzocht: urbanisatie, ontbossing en herbebossing. Analyse van de resultaten toont aan dat urbanisatie de piekafvoer kan doen toenemen met 26%, ontbossing met 5% en herbebossing een daling geeft van 3%. Deze resultaten wijzen op het belang van een ruimtelijke ordening in functie van integraal waterbeheer, alhoewel de impact op piekafvoeren misschien kleiner is dan wat tot nu toe verondersteld werd. Een tweede toepassing betreft het effect van natuurherstel van brongebieden. Het blijkt dat de eerste en tweede orde waterlopen in het Alzette-bekken 79% van het stroomgebied ontwateren. In de veronderstelling dat deze waterlopen niet verder beheerd zouden worden, zal door de vegetatie en de afkalving van de oevers de stromingsweerstand en de meandering toenemen wat kan leiden tot een reductie van de piekafvoer in de benedenloop. Het model voorspelt dat de verblijftijd met 5 uur kan toenemen wat aanleiding geeft tot een grotere afvlakking van afvoergolven en tot een meer in de tijd verspreide samenvloeiing van de afvoer van verschillende bovenlopen waardoor de piekafvoer gemiddeld met 14% zal dalen. Een derde toepassing betreft de invloed van klimaatwijzigingen. Hieruit blijkt dat er een belangrijke toename in de neerslag te verwachten is in de winter wat zal resulteren in het bijna verdubbelen van de winterafvoer. Hierdoor zal er ook een sterke toename zijn in overstromingsrisico; de voorspelde maximale piekafvoer in een periode van 100 jaar (1% kans) bedraagt nu ongeveer  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , terwijl dit in de toekomst kan oplopen tot  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  en meer.

## 1. Inleiding

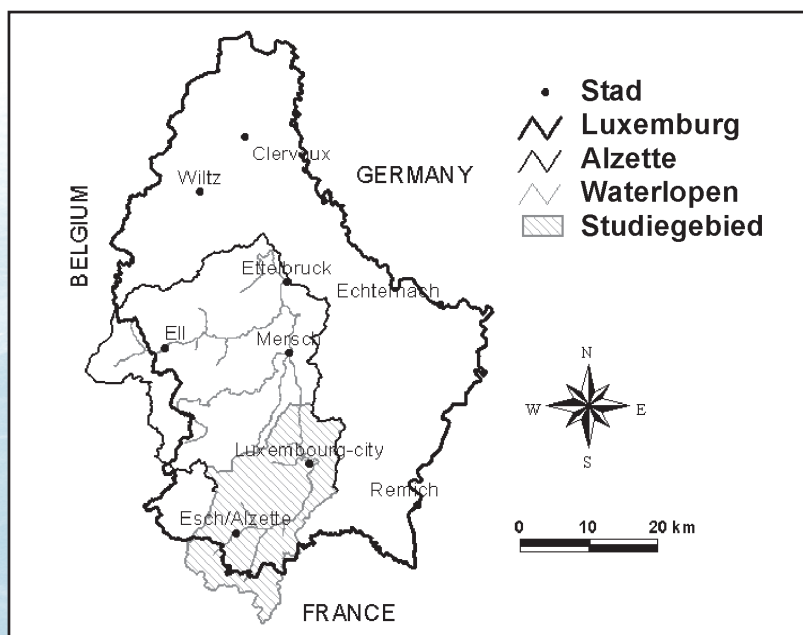
Na de desastreuze overstromingen in Europa in de jaren 1990 werd overal de vraag gesteld in wel mate klimaatverandering en landgebruik de hydrologische cyclus verstoren. In het kader van een Europees onderzoeksprogramma (IRMA-SPONGE), werd in het project FRHYMAP (Flood Risk and Hydrological Mapping), 2000-2001, het voorkomen van overstromingen onderzocht in het bekken van de Alzette, Groothertogdom Luxem-

burg. Door de vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde, Vrije Universiteit Brussel, werd hierbij het WetSpa model toegepast om ruimtelijk verdeelde afvoerprocessen te voorspellen onder invloed van landgebruik en klimaat.

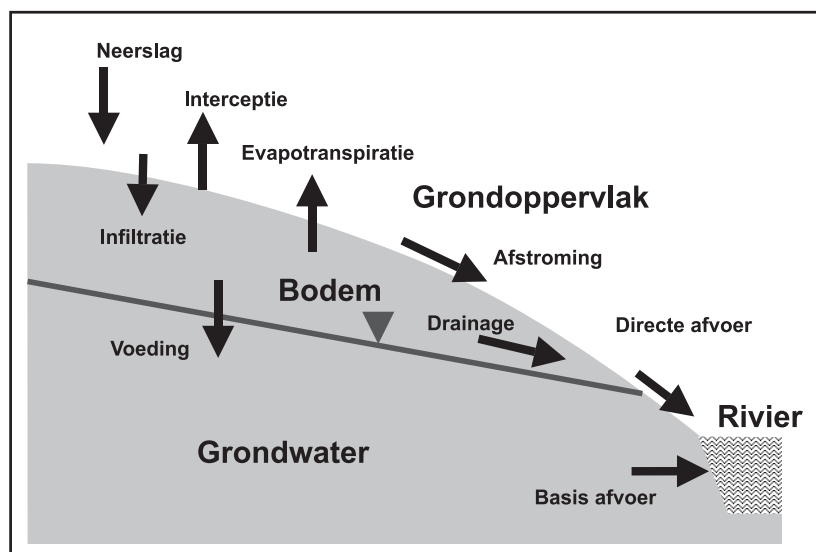
De studie werd toegespitst op het Steinsel subbekken van de Alzette. Dit subbekken (Figuur 1) heeft een oppervlakte van  $408 \text{ km}^2$ ; de topografie varieert van 225 tot 450 m en de gemiddelde helling bedraagt 7%. De bodems bestaan uit zandleem en leem op de plateaus, en kleileem en zandige kleileem in de valleien. Dit gebied is één van de meest geurbaniseerde zones in Europa, met Luxemburg stad en Esch-sur-Alzette (Figuur 1), die ongeveer 21% van het stroomgebied omvatten; daarnaast zijn er 23% landbouwgronden, 29% graslanden en 24% bossen. Het klimaat wordt gekenmerkt door een vrij uniform verdeelde neerslag van 800 tot 1000 mm per jaar, en temperaturen gaande van  $1^\circ\text{C}$  in de winter tot  $17^\circ\text{C}$  in de zomer (Pfister et al., 2002). De gemiddelde afvoer gemeten te Steinsel bedraagt  $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$  en varieert tussen 1 en  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Overstromingen komen vrij frequent voor door de verzadigde bodems en lage evapotranspiratie in de winter.

Voor de toepassing in het WetSpa model zijn er drie basiskaarten nodig in digitale vorm: een hoogtemodel, bodemtypes en landgebruik. Een hoogtemodel was beschikbaar met een hoogteresolutie van 2 m. Bodemtypes werden afgeleid van de Bodemkaart van de Europese Gemeenschap op schaal 1/100,000 en landgebruik uit satellietbeelden van 1995 (Figuur 5a). Voor de periode december 1996 tot maart 2001 zijn

Figuur 1. Basisplan met aanduiding van het studiegebied.



Figuur 2. Schematisch overzicht van de hydrologische processen gesimuleerd met het WetSpa model.



uurlijkse afvoergegevens ter beschikking in 4 stations, en uurlijkse of dagelijkse neerslaghoeveelheden in 10 stations. De potentiële evapotranspiratie is gekend voor de luchthaven van Luxemburg stad.

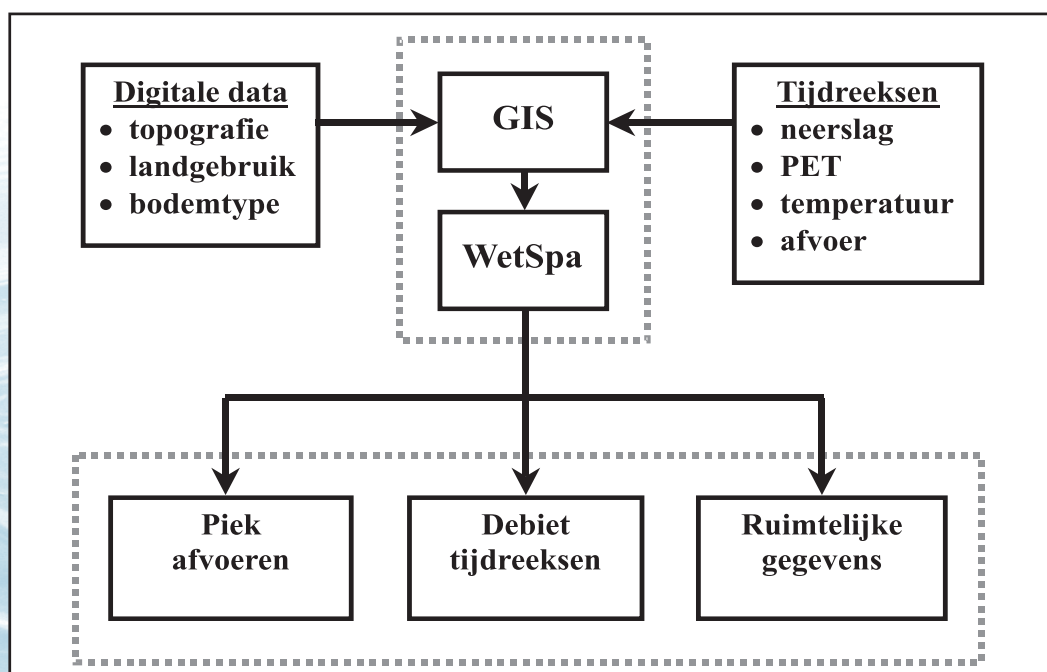
## 2. Het WetSpa model

Het Water and Energy Transport in Soil, Plant and Atmosphere (WetSpa) model is een numeriek ruimtelijk verdeeld hydrologisch simulatiemodel oorspronkelijk opgesteld door Wang et al. (1997) en aangepast door De Smedt et al. (2000, 2004), Liu et al. (2003) en Liu (2004). Hierbij wordt het stroomgebied verdeeld in een netwerk van reken-

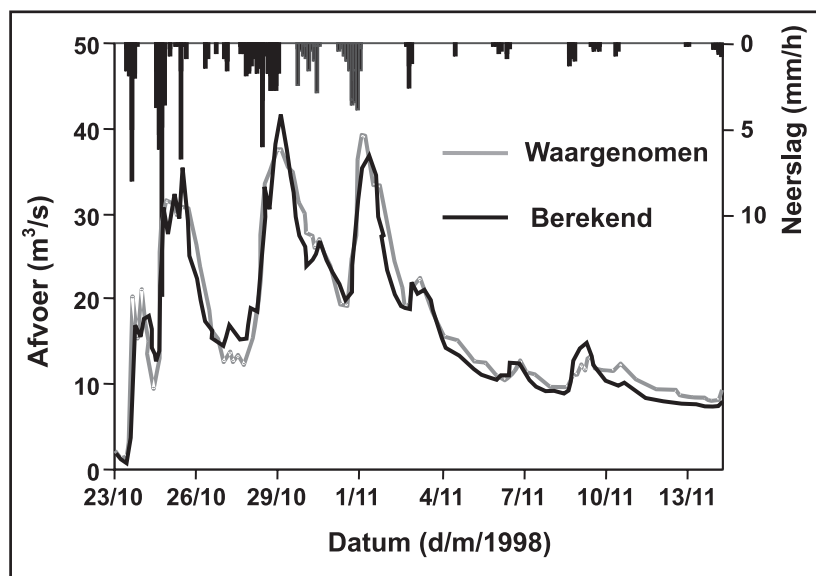
cellen met 4 lagen, zijnde het grondoppervlak met vegetatie, de wortelzone, de onverzadigde zone, en de verzadigde grondwaterzone. De hydrologische processen die in het model gesimuleerd worden zijn neerslag, interceptie, oppervlakteberging, oppervlakte-afstroming, infiltratie, evapotranspiratie, percolatie, bodemdrainage, grondwateraanvulling en grondwater-drainage. Het model laat toe om de afvoer te voorspellen in een rivierbekken alsook de ruimtelijke verdeling van hydrologische processen en variabelen. Het rekenproces is gebaseerd op geografische informatiesysteem (GIS) modules waarbij voor elke rastercel de verschillende componenten en variabelen van de hydrologische cyclus, zoals voorgesteld in Figuur 2, begroot worden. De rekenprocedures worden gegeven in Liu (2004), Liu et al. (2004a) en Liu & De Smedt (2005).

De meerderheid van de modelparameters zijn vastgelegd door middel van tabellen, die de eigenschappen van de bodem en het grondoppervlak relateren tot de basis GIS-kaarten. Met de topografie worden de richting en grootte van de afstroming bepaald. Met de bodemkaart worden de porositeit, waterhoudend vermogen, conductiviteit, en andere hydrologische karakteristieken van de bodems bepaald. De landgebruikskaart levert informatie betreffende de worteldiepte, weerstand tegen oppervlakteafstroming, interceptiecapaciteit, oppervlaktebeweging, e.d. Door combinatie van al deze gegevens worden kaarten bekomen van potentiële afvoercoëfficiënten, gemiddelde duur van de oppervlakteafstroming en de afvlakking van afvoergolven. Met behulp van deze GIS kaarten worden uurlijkse hydrogrammen gegenereerd in functie van de neerslag en potentiële verdamping (Figuur 3).

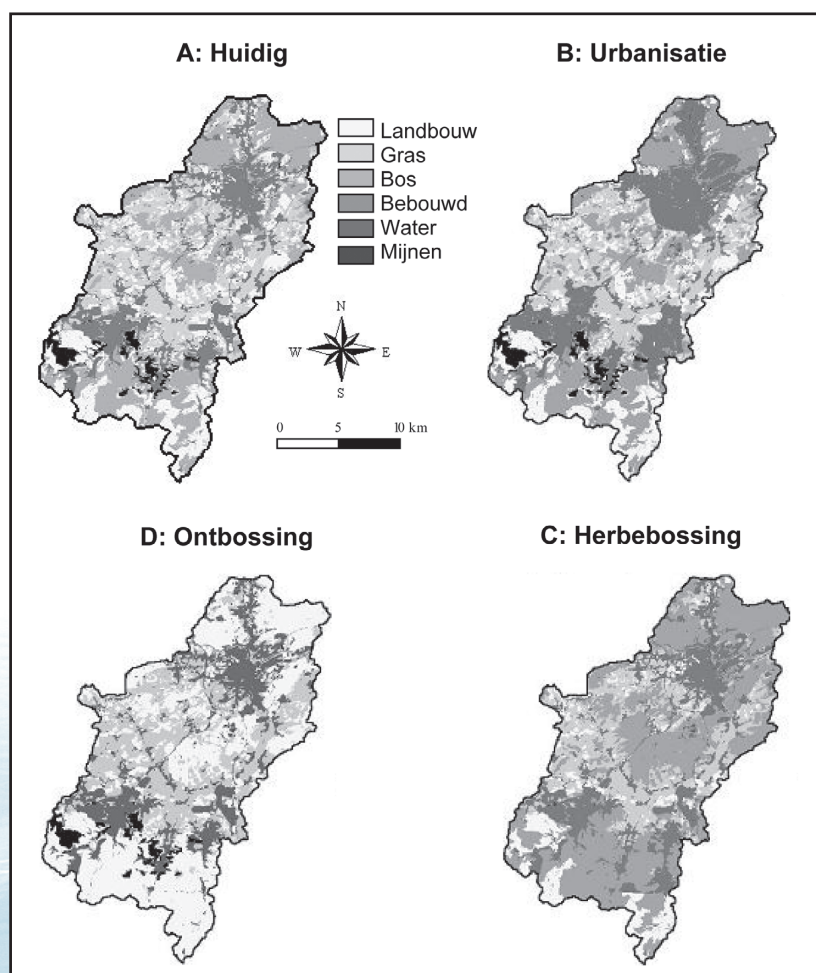
Figuur 3. Schematisch overzicht van het rekenconcept van het WetSpa model: de invoergegevens zijn digitale data en tijdreeksen die verwerkt worden met GIS modules, de output geeft piekafvoeren, tijdreeksen van debieten en ruimtelijk verdeelde hydrologisch parameters en variabelen.



Figuur 4. Typisch resultaat bekomen met het WetSpa model: waargenomen en gesimuleerde uurlijks afvoer voor enkele stormen in oktober-november 1998.



Figuur 5. Landgebruiks-scenario's: (a) landgebruik anno 1995, (b) toename in urbanisatie, (c) ontbossing en (d) herbebossing



Het WetSpa model werd gekalibreerd met gegevens opgemeten in het Stijnselbekken van december 1996 tot maart 2001 (Gebremeskel, 2004). Figuur 4 toont een typisch resultaat; het betreft de afvoer voor een bijzondere stormperiode van

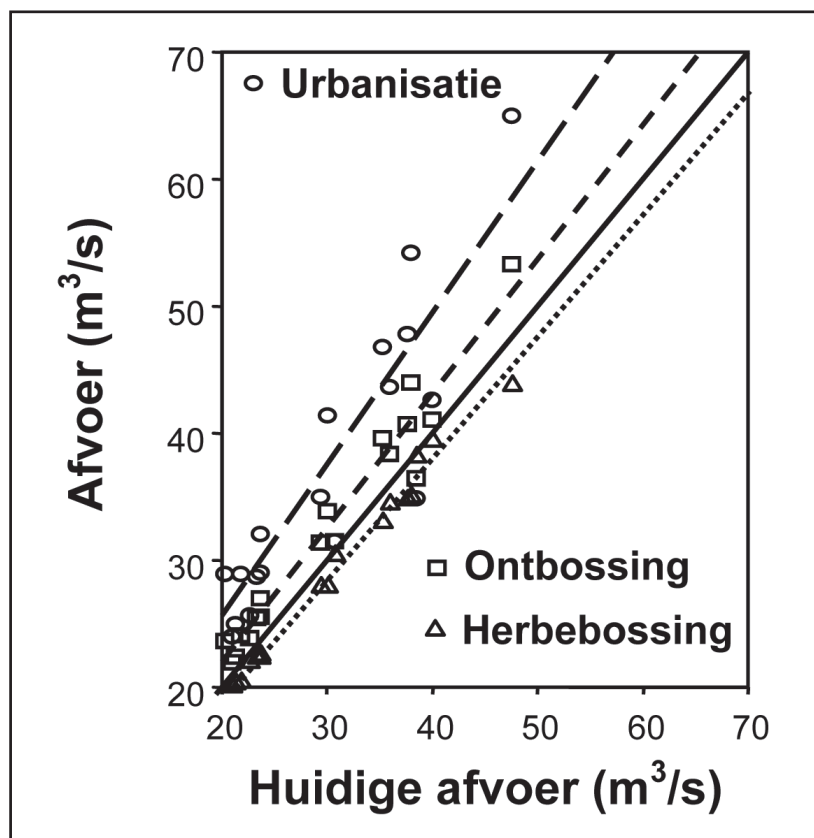
einde november tot begin december 1998, met een totale neerslag van 193 mm. Het hydrogram vertoont drie piekafvoeren met waargenomen debieten van 33, 39 en 40 m<sup>3</sup>/s; de voorspelde afvoeren bedragen respectievelijk 34, 43 en 38 m<sup>3</sup>/s. De performantie van het model kan geëvalueerd worden met behulp van criteria voorgesteld door Hoffman et al. (2004): gemiddelde procentuele modelafwijking en model efficiëntie, ofwel de Nash-Sutcliffe coëfficiënt, voor alle afvoeren ofwel afzonderlijk voor de lage afvoeren en de piekafvoeren. De resultaten tonen aan dat het model de waargenomen afvoer goed kan reproduceren voor alle meetstations in het Steinselbekken: de gemiddelde fout bedraagt minder dan 3% en de efficiëntie is 78% tot 92%.

### 3. Invloed van het landgebruik

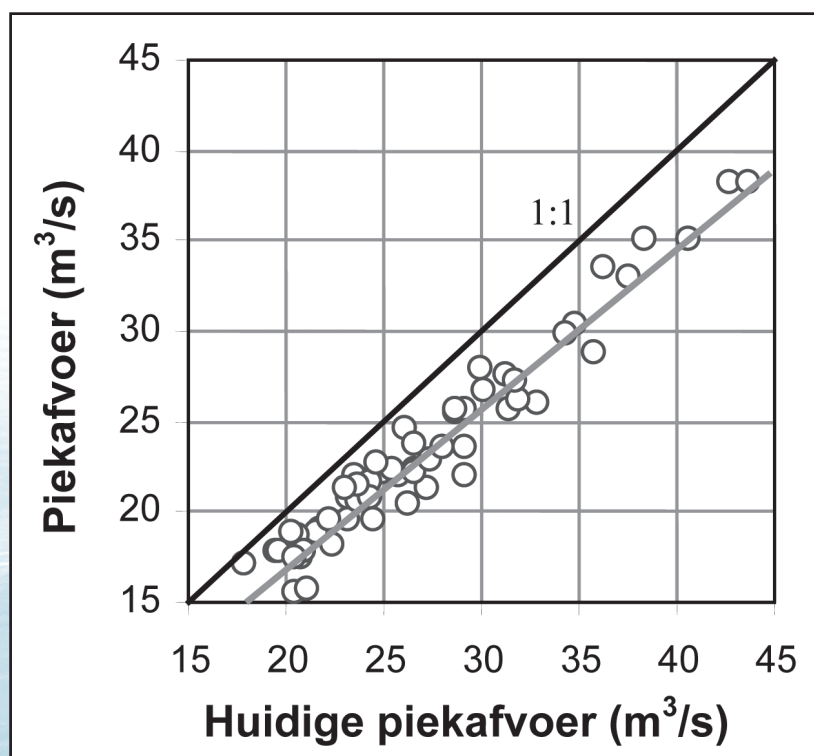
Veranderingen in het landgebruik hebben een belangrijke impact op infiltratie van neerslag in de bodem, afstroming en berging van neerslag aan het grondoppervlak. Met behulp van het WetSpa model kan de invloed van het landgebruik op rivierafvoer ingeschat worden (Gebremeskel, 2004; Liu et al. 2004b, 2006a; Gebremeskel et al., 2005a). Drie landgebruikscenario's werden onderzocht, weergegeven in Figuur 5. Figuur 5a toont het huidige landgebruik anno 1995. Figuur 5b geeft een urbanisatie-scenario waarbij de bebouwing is toegenomen ten koste van de landbouw. Figuur 5c geeft een ontbossing-scenario waarbij alle bossen omgezet werden in landbouwgebied (akkers en weiden). Figuur 7d toont een herbebossing-scenario waarbij de bossen uitgebreid worden ten koste van landbouwgebied. Het urbanisatie-scenario is gebaseerd op actuele gegevens betreffende de evolutie van het landgebruik; de andere zijn artificiële scenario's die inzicht verschaffen betreffende invloed van bossen op de hydrologische cyclus.

Met behulp van deze landgebruikgegevens werd met het WetSpa model de invloed op de rivierafvoer bepaald. Figuur 6 geeft gesimuleerde piekafvoeren voor de ganse simulatieperiode. In de figuur wordt de gesimuleerde piekafvoer voor de verschillende scenario's uitgezet t.o.v. de gesimuleerde afvoer voor de huidige toestand. Hieruit blijkt dat het urbanisatie-scenario een gemiddelde toename in piekafvoer geeft van 26%. Het ontbossing-scenario resulteert in een toename van 5%, terwijl het herbebossing-scenario de piekafvoeren slechts in zeer beperkte mate reduceert met slechts 3%. Met het model werd nagegaan welke processen verantwoordelijk zijn voor de wijziging in piekafvoer. Hieruit blijkt dat de toestand voorafgaand aan een storm erg belangrijk is en zeer variabele gevolgen heeft. De meest ongunstige toestand m.b.t. overstromingen is een grotendeels volledig verzadigde bodem, waardoor de oppervlakteafstroming maximaal wordt en berging en infiltratie minimaal. Het blijkt dat het landgebruik daarbij van ondergeschikte rol is, immers de afstroming wordt grotendeels bepaald door de ondoorlaatbaarheid van de bodem en

Figuur 6. Resultaat van de landgebruiks-scenario's: gesimuleerde piekafvoer voor elk scenario uitgezet volgens gesimuleerde piekafvoer voor het landgebruik anno 1995.



Figuur 7. Resultaat van natuurlijk herstel van brongebieden: gesimuleerde piekafvoer na natuurherstel uitgezet volgens gesimuleerde piekafvoer voor de huidige toestand.



de topografische gesteldheid, meer bepaald de helling en tijdsduur van de oppervlakte-afstroming. Daarentegen blijkt dat de verschillende landgebruikscenario's wel een grote invloed hebben op de gemiddelde afvoer en vooral op de droogweerafvoer, waarbij het herbebossing-scenario het meest gunstige is (grote basisafvoer en retentie) en het urbanisatie-scenario het meest ongunstige is (kleine basisafvoer en weinig retentie).

#### 4. Natuurherstel van waterlopen

De bovenloop en brongebieden van waterlopen hebben een belangrijke functie m.b.t. berging en transport van water. Bovendien worden de brongebieden meer beïnvloed door de vegetatie en geomorfologie dan de benedenloop. Daarom is het mogelijk zinvol om deze gebieden in hun natuurlijke staat te herstellen waardoor overstromingen in de benedenloop in belangrijke mate beperkt worden (Mohl, 2004). Een methode om dergelijke effecten te begroten met het WetSpa model werd voorgesteld door Gebremeskel (2004) en Liu et al. (2004c). Het blijkt dat de eerste en tweede orde waterlopen in het Alzettebekken 320 km<sup>2</sup> of 79% van het bekken ontwateren. De totale lengte van deze waterlopen bedraagt 425 km ofwel 76% van het totale waterlopenstelsel.

Vier eigenschappen zijn van belang bij de afvoer: de stromingsweerstand, de meandering, de helling en de waterdiepte. Indien men waterlopen in hun natuurlijke toestand laat terugkeren, dan zal door de vegetatie en de afkalving van de oevers de weerstand toenemen. Ook de meandering zal toenemen wanneer men de waterloop vrij laat om zich een weg te banen doorheen het landschap. Dit resulteert in een reductie van de helling, vermits de lengte toeneemt voor eenzelfde verval. De waterdiepte kan mogelijk toenemen door de verminderde afstroming wat de weerstand dan weer zal verlagen, maar het is meer waarschijnlijk dat de waterloop zal verbreden en er poelen ontstaan waarin het overtollige water geborgen wordt zonder toename van de waterdiepte.

Een onmiddellijk gevolg van natuurlijk herstel van waterlopen is dus een vermindering van de stroomsnelheid waardoor de totale afstromingstijd groter wordt en samenvloeiing in de benedenloop meer verspreid in de tijd. De verblijftijd van het water in de Alzette bedraagt minder dan 10 uur tot aan Steinsel, maar de stromingstijd vanaf de meest veraf gelegen brongebieden loopt op tot meer dan 35 uur. Met WetSpa werd berekend dat door het natuurlijk herstel van de brongebieden de toename in totale afstromingstijd tot 5 uur kan bedragen. Hierdoor ontstaat er een afname in piekafvoer omdat een langere stromingstijd aanleiding geeft tot meer afvlakking en tot een meer in de tijd verspreide samenvloeiing van verschillende bovenlopen. Dit effect wordt geïllustreerd in Figuur 7, waar een overzicht wordt gegeven van de gesimuleerde piek-

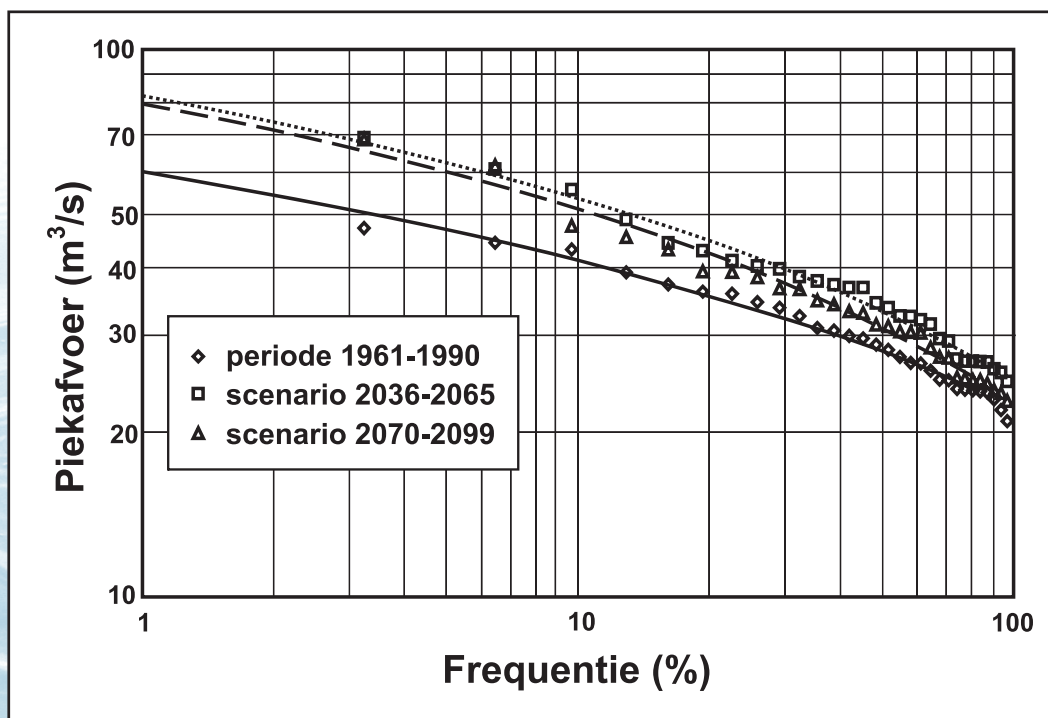
afvoer na natuurherstel in functie van de piekafvoer onder de huidige omstandigheden. Hieruit volgt dat er gemiddeld een reductie van 14% zou optreden, wat misschien minder is dan verwacht. De reden is opnieuw identiek als voor het herbebossing-scenario: stormafvoer is een extreem proces gedomineerd door algehele afstroming in het bekken, waarbij andere hydrologische eigenschappen van minder belang zijn. Daarentegen heeft natuurlijk herstel van brongebieden wel een grote impact op de gemiddelde stromingsomstandigheden.

## 5. Invloed van klimaatsverandering

Studies hebben aangetoond dat door een significante stijging van westelijke luchtcirculaties er meer stormen voorkomen in het Alzette bekken vanaf de jaren 1970 (Pfister et al., 2000; Pfister et al., 2004). De toename in neerslagintensiteit en -duur heeft uiteraard consequenties voor de rivierafvoer. Het is daarom nodig dergelijke fenomenen te onderzoeken en wat hiervan de gevolgen zullen zijn in de toekomst. Toekomstige klimaatscenario's werden overgenomen van een derde generatie mondiaal klimaatmodel ontwikkeld door de U.K. Meteorological Office, Hadley Centre (Gordon et al., 2000). De resultaten van dit model werden omgezet naar het Alzettebekken met behulp van SDSM (statistical downscaling model) van Wilby & Dettinger (2002), met behulp van correlaties tussen de klimaatsvariabelen en de dagelijks waargenomen temperatuur en neerslag op de luchthaven van Luxemburg. Daarna worden de variabelen met de hoogste correlatie gebruikt om neerslagen te voorspellen in het Alzette bekken voor de referentieperiode

1961-1990 en voor toekomstige periodes 2036-2065 en 2070-2099 (Gebremeskel, 2004; Gebremeskel et al., 2005b). De referentieperiode wordt gebruikt om na te gaan of de neerslag bepaald met het model en de hiermee gesimuleerde afvoer met WetSpa overeenkomen met de waarnemingen. Hierna worden neerslagreeksen voor de toekomstige periodes opgesteld en als input gebruikt in het WetSpa model. De toekomstige periodes werden groot genoeg gekozen om een statische analyse uit te voeren van de gesimuleerde afvoerreeksen. De resultaten tonen aan dat er in de toekomst beduidend meer neerslag zal vallen in de winter. De laatste periode 2070-2099 wordt ook gekenmerkt door hogere temperaturen waardoor de verdamping toeneemt wat de toename in neerslag zal compenseren. Uit de resultaten van WetSpa volgt dat er een toename van ongeveer 40% in de afvoer is voor 2036-2065 en 20% voor 2070-2099. De grootste toename situeert zich in de winter, waarbij de afvoeren bijna verdubbelen. Het effect op de piekafvoeren wordt voorgesteld in Figuur 8. In deze figuur worden de frequenties van de piekafvoeren weergegeven. Voor de referentieperiode bedraagt de voorspelde piekafvoer voor een terugkeerde periode van 100 jaar (1% gemiddelde voorkomingskans per jaar) ongeveer 60 m<sup>3</sup>/s, terwijl dit voor de toekomstige periodes zal oplopen tot 80 m<sup>3</sup>/s en meer. Ook voor lagere frequenties is er een significante toename in de afvoer. De kans op overstroming zal dus in belangrijke mate toenemen.

Figuur 8. Resultaat van klimaatsverandering: frequentie (gemiddelde voorkomingskans per jaar) van gesimuleerde piekafvoer voor de huidige toestand en twee toekomstige klimaatscenario's.



## 6. Conclusies

Het WetSpa model is uiterst geschikt voor de analyse van hydrologische processen in een stroomgebied. De benodigde gegevens voor het toepassen van het model beperken zich tot een GIS bestand van topografie, landgebruik en bodemtypes en tijdreeksen van neerslag en potentiële verdamping. Alle andere hydrologische variabelen zijn vervat in referentie-databestanden. Het model levert gesimuleerde afvoerreeksen en gebiedsdekkende hydrologische toestandvariabelen zoals infiltratie, oppervlakte-afstroming, afstromingstijd, verdamping, enz. Het model werd toegepast op het Alzette bekken in het Groot-hertogdom Luxemburg. In een eerste toepassing werd het effect van landgebruik nagegaan. Er werden drie scenario's onderzocht: urbanisatie, ontbossing en herbebossing. Analyse van de resultaten toont aan dat urbanisatie de piekafvoer kan doen toenemen met 26%, ontbossing met 5% en herbebossing een daling geeft van 3%. Deze resultaten wijzen op het belang van een ruimtelijke ordening in functie van integraal waterbeheer, alhoewel de impact op piekafvoeren misschien kleiner is dan wat tot nu toe verondersteld werd.

Een tweede toepassing betrof het effect van natuurherstel van brongebieden. In de veronderstelling dat waterlopen vrij gelaten worden om te ontwikkelen op natuurlijke wijze, kunnen piekafvoeren verminderd worden met 14%. Dergelijk scenario impliceert een toename van het overstromingsrisico in de opwaartse stroomgebieden die minder catastrofaal is en mogelijk zelfs ecologisch verantwoord zijn, terwijl urbane gebieden in de benedenloop gevrijwaard worden van overstromingsrisico's.

Een derde toepassing betreft de invloed van klimaatwijzigingen. Met een klimaatmodel werden de toekomstige neerslag en temperatuur voorspeld voor het Alzette bekken. Hieruit blijkt dat er een belangrijke toename in de neerslag te verwachten is, terwijl op het eind van de eeuw er ook een toename is in de verdamping. Simulatie met het WetSpa model toont aan dat hieruit een belangrijke toename zal volgen van de winterafvoer en dat de kans op overstromingen in sterke mate zal toenemen.

Het WetSpa model wordt nog verder ontwikkeld en geïntegreerd op verschillende andere rivierbekkens, zoals het Suoimuoi bekken in Vietnam (Liu et al., 2004d, 2005a), het Simiyu bekken in Tanzania (Rwatabula & De Smedt, 2005, 2006), de Hornad in Slowakije (Liu et al., 2005b, 2006b; Bahremand et al., 2005a, 2005b; Bahremand & De Smedt, 2006; Bahremand et al., 2006a, 2006b), en de Suriname rivier in Suriname (Nurmohamed et al., 2006).

## Referenties

Bahremand, A., Corluy, J., Liu, Y.B., De Smedt,

F., Poorova, J. and Velcicka, L., 2005. Stream flow simulation by WetSpa model in Hornad river basin, Slovakia. In: Van Alphen, J., van Beek, E., & Taal, M. (eds.), *Floods, from Defence to Management*, Taylor & Francis Group, London: 67-74.

Bahremand, A., F. De Smedt, J. Corluy, J., Y.B. Liu, Y.B., J. Poorova, L. Velcicka, and E. Kunikova, 2005. Application of WetSpa model for assessing landuse impacts on floods in Margecany-Hornad watershed, Slovakia. *Proceedings of 10th International Specialist Conference on Watershed and River Basin Management*, Calgary, Canada, September 12-16, 2005.

Bahremand, A., and F. De Smedt, 2006. Sensitivity and uncertainty analysis of a GIS-based flood simulation model using PEST. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 1(2): 29-37.

Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poórová, J., Velcická, L. and Kuniková, E., 2006, Application of WetSpa model for assessing landuse impacts on floods in Margecany-Hornad watershed, Slovakia, *Water Science and Technology*, 53(10): 37-45. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2006.295>

Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poórová, J., Velcická, L. and Kuniková, E., 2006. WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods by in Margecany-Hornad watershed, Slovakia. *Water Resources Management Journal: online first*. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-006-9089-0>

De Smedt, F., L. Y. Liu, and S. Gebremeskel, 2000. Hydrologic modelling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information. C. A. Brebbia (ed.), *Risk Analyses II*, WIT press, Southampton, Boston: 295-304.

De Smedt, F., Y. B. Liu, S. Gebremeskel, L. Hoffmann and L. Pfister, 2004. Application of GIS and remote sensing in flood modeling for complex terrain. *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment*, IAHS Publ. 289: 23-32.

Gebremeskel, S., 2004. Modelling the effect of climate and land-use changes on the hydrological processes: An integrated GIS and distributed modeling approach, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Gebremeskel, S., Y. B. Liu, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2005a. Assessing the hydrological effects of land-use changes using distributed modelling and GIS. *Intl. J. River Basin Management* 3(4): 265-275.

Gebremeskel, S., Y. B. Liu, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2005b. Analysing the effect of climate changes on streamflow using statistically downscaled GCM scenarios. *Intl. J. River Basin Management* 2(4): 271-280.

Gordon, C., Cooper, C., Senior, C.A., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T.C., Mitchell, J.F.B. and R.A. Wood, 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux

adjustments, *Climate Dynamics* 16, 147-168.

Hoffmann L, El Idrissi A, Pfister L, Hingray B, Guex F, Musy A, Humbert J, Drogue G. and T. Leviandier, 2004. Development of regionalized hydrological models in an area with short hydrological observation series, *River Research and Applications* 20(3), 243-254.

Liu, Y. B., S. Gebremeskel, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modelling. *Journal of Hydrology*, 283: 91-106. doi:10.1016/S0022-1694(03)00242-7

Liu, Y.B., 2004. Development and application of a GIS-based hydrological model for flood prediction and watershed management, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Liu, Y. B., F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2004a. Parameterization using ArcView GIS in medium and large watershed modeling. *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment*, IAHS Publ. 289: 50-58.

Liu, Y. B., F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2004b. Assessing land use impact on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach. *Environmental Modeling and Assessment*, 9(4): 227-235. doi:10.1007/s10666-005-0306-7

Liu, Y. B., S. Gebremeskel, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2004c. Simulation of flood reduction by natural river restoration using a distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6): 1129-1140. [www.hydrol-earth-syst-sci.net/8/1129/2004/](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/8/1129/2004/)

Liu, Y.B., Batelaan, O., Huong, N.T., Tam, V.T. and F. De Smedt, 2004d, Flood prediction in the karst Suoimuoi catchment, Vietnam. *TRANS-KARST 2004, Proceedings of the International Transdisciplinary Conference on Development and Conservation of Karst Regions*, Hanoi, Vietnam, 13-18.9.2004. Eds. O. Batelaan, M. Dusar, J. Masschelein, Vu Thanh Tam, Tran Tan Van, Nguyen Xuan Khien: 139-144.

Liu, Y. B. and F. De Smedt, 2005. Flood modelling for complex terrain using GIS and remote sensed information. *Water Resources Management*, 19: 605-624. doi: 10.1007/s11269-005-6808-x

Liu, Y.B., O. Batelaan, F. De Smedt, N.T. Huong, and V.T. Tam, 2005a. Test of a distributed modelling approach to predict flood flows in the karst Suoimuoi catchment in Vietnam. *Environmental Geology*, 48: 931-940. doi: 10.1007/s00254-005-0031-1

Liu, Y.B., Batelaan, O., De Smedt, F., Poorova, J. and L. Velcicka, 2005b. Automated calibration applied to a GIS-based flood simulation model using PEST. Van Alphen, J., van Beek, E., & Taal, M. (eds.), *Floods, from Defence to Management*, Taylor & Francis Group, London: 317-326.

Liu, Y. B., S. Gebremeskel, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister, 2006a. Predicting storm runoff from different land use classes using a GIS-

based distributed model. *Hydrological Processes* 20: 533-548. doi:10.1002/hyp.5920

Liu, Y.B., J. Corluy, A. Bahremand, F. De Smedt, J. Poorova, and L. Velcicka, 2006b. Simulation of runoff and phosphorus transport in a Carpathian catchment, Slovakia. *River Research and Applications* 22: 1009-1022. <http://dx.doi.org/10.1002/rra.953>

Mohl, A., 2004. LIFE River restoration projects in Austria, in Dragutin, G. (ed.), *River Restoration 2004, Proceedings of the 3rd European Conference on River Restoration*, Zagreb, 201-209.

Nurmohamed, R., S. Naipal and F. De Smedt, 2006. Hydrologic modeling of the Upper Suriname River basin using WetSpa and ArcView GIS. *Journal of Spatial Hydrology* 6(1): 1-17.

Pfister, L., Humbert, J. and L. Hoffmann, 2000. Recent trends in rainfall-runoff characteristics in the Alzette river basin, Luxembourg, *Climate Change* 45(2), 323-337.

Pfister L., Humbert, J., Iffly, J.F. and L. Hoffmann, 2002. Use of regionalized stormflow coefficients in view of hydro-climatological hazard mapping, *Hydrological Sciences Journal* 47, 479-491.

Pfister, L., Kwadijk, J., Musy, A., Bronstert, A. and L. Hoffmann, 2004. Climate change, land use change and runoff prediction in the Rhine-Meuse basins, *River Research and Applications* 20(3), 229-241.

Rwetabula, J. and F. De Smedt, 2005. Prediction of Simiyu river (tributary of Lake Victoria, Tanzania) discharge using WetSpa Model, GIS and remote sensed landuse data. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference of European Water Resources Association (EWRA)*, Menton, France. 4 pp.

Rwetabula, J. and F. De Smedt, 2006. Runoff and phosphorous loading estimation for Simiyu catchment (tributary of Lake Victoria), Tanzania. In Starret, S.T., Hong, J.J., Lyon, W.G. (eds.), *Environmental Science and Technology*, American Science Press, Houston, USA, Vol. 2, 6 pp. ISBN: 0-9768853-7-9

Wang, Z., Batelaan, O. and F. De Smedt, 1997. A distributed model for Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpa), *Physics and Chemistry of the Earth* 21(3), 189-193.

Wilby, R.L. and M.D. Dettinger, 2002. Streamflow changes in the Sierra Nevada, California, simulated using a statistically downscaled General Circulation Model Scenario of climate change, in McLaren, S. and Kniveton, D. (eds.), *Linking climate change to land surface change*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 6.1- 6.20.

*Florimond De Smedt en Okke Batelaan*

*Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, 1050 Brussel, 02/629.35.47, fdesmedt@vub.ac.be*