

---

# Effecten van landgebruiksveranderingen op gemiddelde en extreme afvoer in het Rijnstroomgebied

Ruud Hurkmans<sup>1</sup>, Wilco Terink<sup>1</sup>, Remko Uijlenhoet<sup>1</sup>,  
Eddy Moors<sup>2</sup>, Peter Troch<sup>3</sup> en Peter Verburg<sup>4</sup>

---

## 1. Inleiding

Het is de verwachting dat door klimaatverandering het hydrologische regime in het Rijnstroomgebied gaat verschuiven van een gecombineerd regenval-sneeuwsmelt regime naar een regime dat meer gedomineerd wordt door regenval (Kleinn e.a., 2005). Zoals ook besproken in een eerder artikel in *Stromingen* (De Wit e.a., 2008), wordt dit veroorzaakt door meer extreme neerslaggebeurtenissen in de winter en minder neerslag in de zomer. Daarnaast wordt de afvoer resulterend uit sneeuwsmelt gereduceerd door temperatuurstijgingen (IPCC, 2007). Recentelijk heeft veel onderzoek plaatsgevonden om de invloed van klimaatverandering te kwantificeren. Dit kan op verschillende manieren: bijvoorbeeld kan op basis van gemeten data een extreme-waardenverdeling worden geëxtrapoleerd, me.a. belangrijkste nadeel dat de vaak relatief korte meetreeks grote steekproefonzekerheid veroorzaakt. Uit de gemeten tijdreeks kan door resampling een langere reeks gegenereerd worden om dit probleem te verhelpen (Beersma e.a., 2001). Een dergelijke aanpak blijft echter gebaseerd op de statistische kenmerken van het huidige klimaat, terwijl die juist waarschijnlijk veranderen.

Een andere mogelijkheid is daarom het doorrekenen van klimaatscenario's zoals die worden gegenereerd met klimaatmodellen. Eventueel kunnen deze scenario's zijn neergeschaald naar een hogere ruimtelijke resolutie met regionale atmosferische modellen, zoals in bijvoorbeeld Kleinn e.a. (2005) of Jacob (2001). Als hydrologisch model wordt vaak een relatief eenvoudig waterbalansmodel gebruikt, zoals STREAM (Aerts e.a., 1999) of HBV (Lindström e.a., 1997; Te Linde e.a., 2008). Dit soort modellen is vaak goed in staat historische afvoeren te simuleren omdat ze relatief eenvoudig te calibreren zijn. Het is echter zeer de vraag of de resulterende calibratieparameters nog geldig zijn onder een veranderd hydrologisch regime. Bovendien gebruiken deze modellen vaak een enkel op temperatuur gebaseerde parametertoekenning voor verdamping, zoals Thorntwaite-Mather, terwijl die erg belangrijk is voor de verdeling van neerslag tussen verdamping en afvoer. Een landoppervlaktemodel is ontworpen om randvoorwaarden

---

1 Hydrology & Quantitative Water Management, Wageningen Universiteit

2 Earth System Science & Climate Change, Wageningen Universiteit

3 Hydrology & Water Resources, University of Arizona, Tucson, AZ, Verenigde Staten

4 Land Dynamics, Wageningen Universiteit

te leveren voor klimaatmodellen en lost de gekoppelde water- en energiebalans op om tot een potentiële verdamping te komen. Deze meer fysische benadering kan leiden tot accuratere schattingen van toekomstige afvoer. Bovendien worden ook andere atmosferische variabelen, zoals straling, luchtvochtigheid en wind meegenomen in de berekening van verdamping. Een nadeel van landoppervlaktemodellen is dat, ne.a. in bovengenoemde waterbalansmodellen, (ondiep) grondwater als een reservoir wordt gesimuleerd en er in het model geen regionale grondwaterstroming plaatsvindt. Ook de invloed van grondwater op bodemvocht door capillaire opstijging wordt niet expliciet gemodelleerd. Op deze grote ruimtelijke schaal is het echter erg rekenintensief om deze processen wel te expliciet modelleren. Pas recentelijk vindt onderzoek hiernaar plaats (bijvoorbeeld Miguez-Macho e.a., 2008). Het landoppervlaktemodel dat in deze studie is gebruikt, namelijk het Variable Infiltration Capacity (VIC) model (Liang e.a., 1994), maakt echter wel gebruik van statistische parameters voor de invloed van verzadigde bodems (zie “Model en data”).

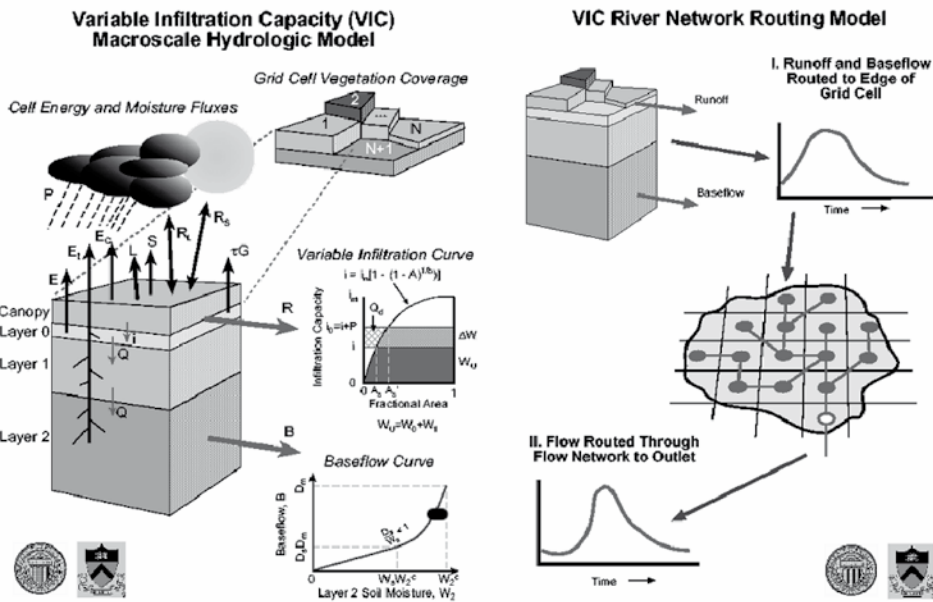
Een ander voordeel van landoppervlaktemodellen is dat landgebruik op een meer fysisch gebaseerde manier wordt gesimuleerd. Voor elk landgebruikstype kunnen dus fysisch interpreteerbare en meetbare parameters toegekend worden. In VIC zijn dit onder meer vegetatie weerstanden (voor de Penman-Monteith vergelijking), albedo, ruwheidslengtes en bladoppervlakte-indices. In de hiervoor genoemde waterbalansmodellen wordt landgebruik vaak enkel meegenomen door de referentieverdamping (bijvoorbeeld uit Makkink) te vermenigvuldigen met een factor die soms (bijvoorbeeld in STREAM) ook nog onderhevig is aan calibratie. Gebruik van een land-oppervlaktemodel maakt het dus mogelijk om de effecten van veranderingen in landgebruik op de afvoer beter te onderzoeken. Landgebruiksveranderingen hebben namelijk, naast klimaatverandering, ook effecten op de afvoer: urbanisatie leidt via een verhoging van het ondoorlatend oppervlak tot meer directe afstroming (Verburg e.a., 2005), terwijl bijvoorbeeld bebossing leidt tot meer verdamping en infiltratiecapaciteit (Clark, 1987). Bradshaw e.a. (2007) toonde ook aan dat ontbossing een verhoging van het overstromingsrisico kan veroorzaken. In deze studie worden daarom landgebruikskaarten voor 2030, die zijn geconstrueerd in het Eururalis-project (Verburg e.a., 2006a, 2008), gebruikt om de effecten van toekomstige landgebruiksveranderingen op het afvoerregime te onderzoeken.

## 2. Model en data

Het VIC model is een bodem-vegetatie-atmosfeer-uitwisselingsmodel dat is ontworpen voor klimaatmodellen (Liang e.a., 1994). De belangrijkste fluxen en bergingscomponenten zijn schematisch weergegeven in figuur 1. Het model bevat drie bodemlagen waarvan de onderste als een niet-lineair reservoir dient voor afstroming via grondwater. Drainage tussen de lagen is alleen verticaal door gravitatie en het bodemvochtgehalte in de bovenste laag bepaalt de infiltratiecapaciteit via een exponentiële curve. Deze variabele infiltratiecapaciteit geeft het model zijn naam en vormt zo een parameter voor de variatie van topografie (verzadigd versus onverzadigd oppervlak) binnen een pixel. Daarnaast wordt elke pixel onderverdeeld in zogenaamde tegels op basis van de fractionele oppervlaktebedekking van landgebruikstypen en hoogtezones. Een apart algoritme (Lohmann e.a., 1996) converteert de directe- en grondwateruitstroming naar afvoer bij bepaalde punten in het stroomgebied. Hierbij wordt aangenomen dat uitstroming uit elke pixel direct in het oppervlaktewatersysteem belandt. Het model kan op

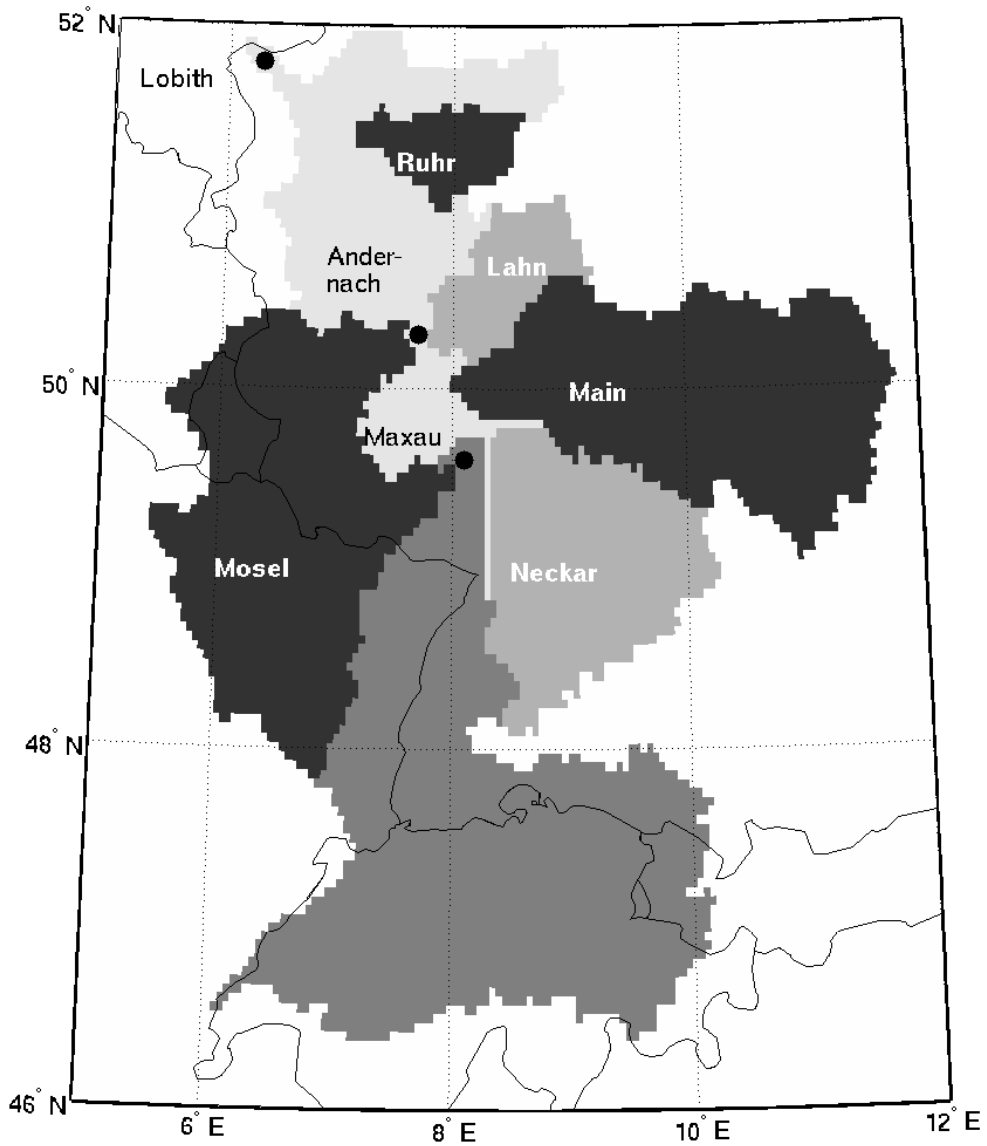
twee manieren gebruikt worden: enerzijds in de energiebalansmodus, waarbij de energiebalans iteratief wordt opgelost en de energiestromen met behulp van de resulterende oppervlaktetemperatuur worden uitgerekend; anderzijds in de waterbalansmodus, hierbij wordt de oppervlaktetemperatuur gelijkgesteld aan de luchttemperatuur. Doordat er geen iteraties plaatsvinden is de waterbalansmodus veel minder rekenintensief dan de energiebalansmodus. Voor meer informatie over VIC, zie: <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/VIChome.html>.

VIC is toegepast op het Rijnstroomgebied met een ruimtelijke resolutie van 0,05 graden (ongeveer 5 km), zoals beschreven in Hurkmans e.a. (2008a). Het stroomgebied is onderverdeeld in vijf substroomgebieden, die zijn weergegeven in figuur 2 en tabel 1. Bij elk van deze substroomgebieden is de afvoer bij het bijbehorende meetstation (tabel 1) geanalyseerd. Daarnaast is afvoer geanalyseerd op drie locaties langs de hoofdtk: Maxau, Andernach en Lobith (figuur 2). Karakteristieken van het gehele Rijnstroomgebied zijn ook weergegeven in tabel 1. Gemeten data van meetstations op deze locaties is gebruikt om het model te calibreren, maar omdat in deze studie verder geen gebruik is gemaakt van gemeten afvoeren maar van een gemodelleerde referentiesituatie wordt de modelcalibratie niet verder beschreven. Voor de calibratieprocedure wordt verwezen naar Hurkmans e.a. (2008a), met dit verschil dat de calibratie nu voor elk voornoemd substroomgebied apart is uitgevoerd in plaats van uniform over het gehele stroomgebied.



**Figuur 1:** Schematisatie van het VIC model (links) en het bijbehorende afvoer algoritme (rechts).  
Bron: <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/VIChome.html>.

Als atmosferische data is een gedeelte van de operationele analyse dataset van ECMWF (<http://www.ecmwf.int>) gebruikt. Deze is door een regionaal atmosferisch model (REMO;



**Figuur 2:** Het Rijnstroomgebied, zoals opgenomen in het VIC model; de vijf substroomgebieden die in dit artikel gebruikt worden (Ruhr, Lahn, Mosel, Main en Neckar) zijn getoond, alsmede de locatie van drie meetstations aan de hoofdtrak van de Rijn (Maxau, Andernach en Lobith). Karakteristieken van de substroomgebieden en het gehele stroomgebied worden getoond in tabel 1.

Jacob (2001)) neergeschaald tot een ruimtelijke resolutie van 0,088 graden (ongeveer 10 km). De neergeschaalde dataset is aangeleverd door het Max Planck Institut für Meteorologie in Hamburg, Duitsland. Als invoer voor VIC zijn uit deze dataset de variabelen neerslag, temperatuur, luchtdruk, dampdruk, windsnelheid en neerwaartse kort- en

langgolvlige straling gebruikt. Deze gegevens zijn beschikbaar voor de periode 1993 tot en met 2003 met een tijdstap van drie uur, hetgeen ook de tijdstap is waarmee het model draait. Voor alle hierna beschreven simulaties wordt de periode van 1994 tot en met 2003 gebruikt, terwijl data voor 1993 zijn gebruikt om het model te initialiseren. Bodemgegevens zijn overgenomen van de globale FAO-database (Reynolds e.a., 2000), terwijl de huidige landgebruikskaart van het PELCOM project (Mücher e.a., 2001) is gebruikt. Landgebruiksveranderingsscenario's zijn overgenomen uit het Eururalis-project (Verburg e.a., 2006a). Uit de complete dataset zijn vier landgebruikskaarten voor het jaar 2030 geselecteerd, die elk overeenkomen met een CO<sub>2</sub> emissiescenario zoals die zijn gedefinieerd in IPCC (2000). Deze emissiescenario's zijn, in volgorde van oplopende CO<sub>2</sub> emissie: B1, B2, A1 en A2. In IPCC (2000) is de totstandkoming ervan in detail beschreven. De vier scenario's vertonen allemaal een vrij sterke urbanisatie. Deze is sterker voor de scenario's met de hoogste economische groei (A1). Het oppervlak aan landbouwgrond neemt in vrijwel alle scenario's af. Deze ontwikkeling is het minst sterk in het A2 scenario; in de andere scenario's vindt meer natuurontwikkeling plaats waardoor de fractie "semi-natuurlijk" groter is. Landgebruik voor het Rijnstroomgebied in de huidige situatie (PELCOM) en de vier Eururalis-scenario's zijn weergegeven in tabel 2. Omdat het Eururalis-project is uitgevoerd voor de EU, zijn geen data beschikbaar voor Zwitserland. Daarom wordt in de rest van dit artikel aangenomen dat in Zwitserland het landgebruik onveranderd blijft. Door het Alpiene karakter van grote delen van Zwitserland zullen deze veranderingen waarschijnlijk relatief klein zijn ten opzichte van de veranderingen in lagere delen van het stroomgebied.

**Tabel 1:** Karakteristieken van verschillende substroomgebieden in het Rijnstroomgebied. Van elk substroomgebied zijn getoond: het bijbehorende afvoermeststation, oppervlak, gemiddelde afvoer ( $Q_{gem}$ ), de hoogst gemeten afvoer in de bestudeerde periode ( $Q_{max}$ ) en het jaarlijks gemiddelde maximum ( $Q_{mam}$ ). Alle waarden zijn gemiddeld over de periode 1993-2003.

Substroomgebied	Meetstation	Oppervlak (km <sup>2</sup> )	$Q_{gem}$ (m <sup>3</sup> s <sup>-2</sup> )	$Q$ (m <sup>3</sup> s <sup>-2</sup> )	$Q$ (m <sup>3</sup> s <sup>-2</sup> )
Lahn	Kalkofen	5.304	48	587	394
Main	Raunheim	24.764	187	1991	1177
Mosel	Cochem	27.088	364	4009	2650
Neckar	Rockenau	12.710	154	2105	1396
Ruhr	Hattingen	4.118	75	867	611
Rijn	Lobith	185.000	2395	11775	8340

**Tabel 2:** Landgebruikstypes in de huidige situatie en in 4 landgebruiksveranderingsscenarios als fractie van het totale oppervlak in het gehele stroomgebied en de substroomgebieden, die zijn weergegeven in figuur 2.

	Rijn stroomgebied							
	Bos	Gras	Gras	Stedelijk	Water	(Semi-)natuurlijk	Sneeuw/ijs	Kaal
Huidig	0,42	0,40	0,11	0,05	0,01	0,00	0,01	0,01
Eur. A1	0,40	0,25	0,12	0,11	0,01	0,09	0,01	0,01
Eur. A2	0,38	0,33	0,13	0,09	0,01	0,03	0,01	0,01
Eur. B1	0,41	0,24	0,12	0,09	0,01	0,11	0,01	0,01
Eur. B2	0,41	0,26	0,13	0,08	0,01	0,09	0,01	0,01

<b>Ruhr substroomgebied</b>								
	<b>Bos</b>	<b>Gras</b>	<b>Gras</b>	<b>Stedelijk</b>	<b>Water</b>	<b>(Semi-)natuurlijk</b>	<b>Sneeuw/ijs</b>	<b>Kaal</b>
Huidig	0,58	0,26	0,09	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00
Eur. A1	0,53	0,06	0,11	0,15	0,01	0,13	0,00	0,00
Eur. A2	0,52	0,12	0,16	0,13	0,01	0,06	0,00	0,00
Eur. B1	0,53	0,08	0,11	0,13	0,01	0,15	0,00	0,00
Eur. B2	0,55	0,07	0,12	0,12	0,01	0,13	0,00	0,00
<b>Lahn substroomgebied</b>								
	<b>Bos</b>	<b>Gras</b>	<b>Gras</b>	<b>Stedelijk</b>	<b>Water</b>	<b>(Semi-)natuurlijk</b>	<b>Sneeuw/ijs</b>	<b>Kaal</b>
Huidig	0,42	0,50	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Eur. A1	0,45	0,18	0,16	0,10	0,00	0,12	0,00	0,00
Eur. A2	0,43	0,30	0,17	0,07	0,00	0,02	0,00	0,00
Eur. B1	0,45	0,18	0,16	0,07	0,00	0,13	0,00	0,00
Eur. B2	0,45	0,22	0,17	0,08	0,00	0,09	0,00	0,00
<b>Mosel substroomgebied</b>								
	<b>Bos</b>	<b>Gras</b>	<b>Gras</b>	<b>Stedelijk</b>	<b>Water</b>	<b>(Semi-)natuurlijk</b>	<b>Sneeuw/ijs</b>	<b>Kaal</b>
Huidig	0,42	0,38	0,17	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Eur. A1	0,40	0,21	0,18	0,09	0,01	0,11	0,00	0,00
Eur. A2	0,35	0,33	0,20	0,07	0,01	0,03	0,00	0,00
Eur. B1	0,40	0,20	0,18	0,07	0,01	0,14	0,00	0,00
Eur. B2	0,41	0,22	0,19	0,07	0,01	0,10	0,00	0,00
<b>Main substroomgebied</b>								
	<b>Bos</b>	<b>Gras</b>	<b>Gras</b>	<b>Stedelijk</b>	<b>Water</b>	<b>(Semi-)natuurlijk</b>	<b>Sneeuw/ijs</b>	<b>Kaal</b>
Huidig	0,40	0,52	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Eur. A1	0,38	0,34	0,08	0,10	0,00	0,10	0,00	0,00
Eur. A2	0,36	0,43	0,10	0,08	0,00	0,02	0,00	0,00
Eur. B1	0,39	0,32	0,09	0,08	0,00	0,12	0,00	0,00
Eur. B2	0,39	0,35	0,09	0,08	0,00	0,09	0,00	0,00
<b>Neckar substroomgebied</b>								
	<b>Bos</b>	<b>Gras</b>	<b>Gras</b>	<b>Stedelijk</b>	<b>Water</b>	<b>(Semi-)natuurlijk</b>	<b>Sneeuw/ijs</b>	<b>Kaal</b>
Huidig	0,44	0,37	0,13	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Eur. A1	0,38	0,31	0,08	0,15	0,00	0,07	0,00	0,00
Eur. A2	0,36	0,39	0,11	0,12	0,00	0,02	0,00	0,00
Eur. B1	0,38	0,30	0,10	0,12	0,00	0,10	0,00	0,00
Eur. B2	0,38	0,32	0,11	0,12	0,00	0,07	0,00	0,00
<b>Rijn bovenstrooms van Maxau</b>								
	<b>Bos</b>	<b>Gras</b>	<b>Gras</b>	<b>Stedelijk</b>	<b>Water</b>	<b>(Semi-)natuurlijk</b>	<b>Sneeuw/ijs</b>	<b>Kaal</b>
Huidig	0,51	0,28	0,11	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
Eur. A1	0,48	0,23	0,10	0,05	0,03	0,06	0,02	0,03
Eur. A2	0,46	0,27	0,11	0,04	0,03	0,04	0,02	0,03
Eur. B1	0,48	0,23	0,10	0,04	0,03	0,07	0,02	0,03
Eur. B2	0,48	0,24	0,10	0,04	0,03	0,06	0,02	0,03

Voorafgaand aan het simuleren van de landgebruiksveranderingen, is met behulp van een enkele gridcel in VIC de simulatie van verdamping voor verschillende landgebruikstypes getest. Hieruit bleek dat enkele vereenvoudigingen in het VIC-model gevolgen hebben voor de simulatie van verdamping. Het belangrijkste probleem bestond uit het feit dat een oppervlak alleen óf via de vegetatie óf via de bodem kan verdampen. Dit gebeurt echter meestal simultaan en zeker bij akkerland, waar in de winter de bodem vrijwel onbedekt is, speelt dit een grote rol. Door in het model een “kale grond”-fractie te implementeren, die hier exponentieel afhangt van de bladoppervlakte-index, zoals in bijvoorbeeld Teuling e.a. (2007), kan ook begroeid oppervlak via bodemverdamping verdampen. Daarnaast bleek dat in het originele model in stedelijk gebied de grondwaterafvoer altijd maximaal is doordat het grondwater reservoir altijd maximaal gevuld blijft door het gebrek aan transpiratie uit diepere bodemlagen. Door de verzadigde doorlaatbaarheid van de middelste laag te reduceren kan de verhouding tussen directe afvoer en grondwaterafvoer geregeld worden. Dit biedt ook potenties voor het simuleren van lokale beheersmaatregelen in stedelijk gebied, zoals extra berging en ontkoppeling van neerslagafvoer en het rioleringssysteem. In dit artikel wordt het meest extreme geval aangenomen voor stedelijk gebied, namelijk dat het hele oppervlak ondoorlaatbaar is en de grondwaterafvoer nul. De jaarlijkse gemiddelde fluxen van de verdampings- en afvoercomponenten voor zowel de oorspronkelijke als de gewijzigde code zijn te vinden in tabel 3. Een uitgebreidere beschrijving van de simulaties voor een enkele pixel en de wijzigingen in het VIC-model staan beschreven in Hurkmans e.a. (2008b).

**Tabel 3:** Gemiddelde jaarlijkse waarden voor totale verdamping ( $E_{tot}$ ), directe afvoer (D), grondwaterafvoer (G), interceptieverdamping ( $E_{int}$ ), transpiratie (T) en bodemevaporatie ( $E_{bod}$ ) voor 6 landgebruikstypen voor zowel het originele (O) als het gewijzigde model (N). De jaarlijkse gemiddelde neerslag is 750 mm.

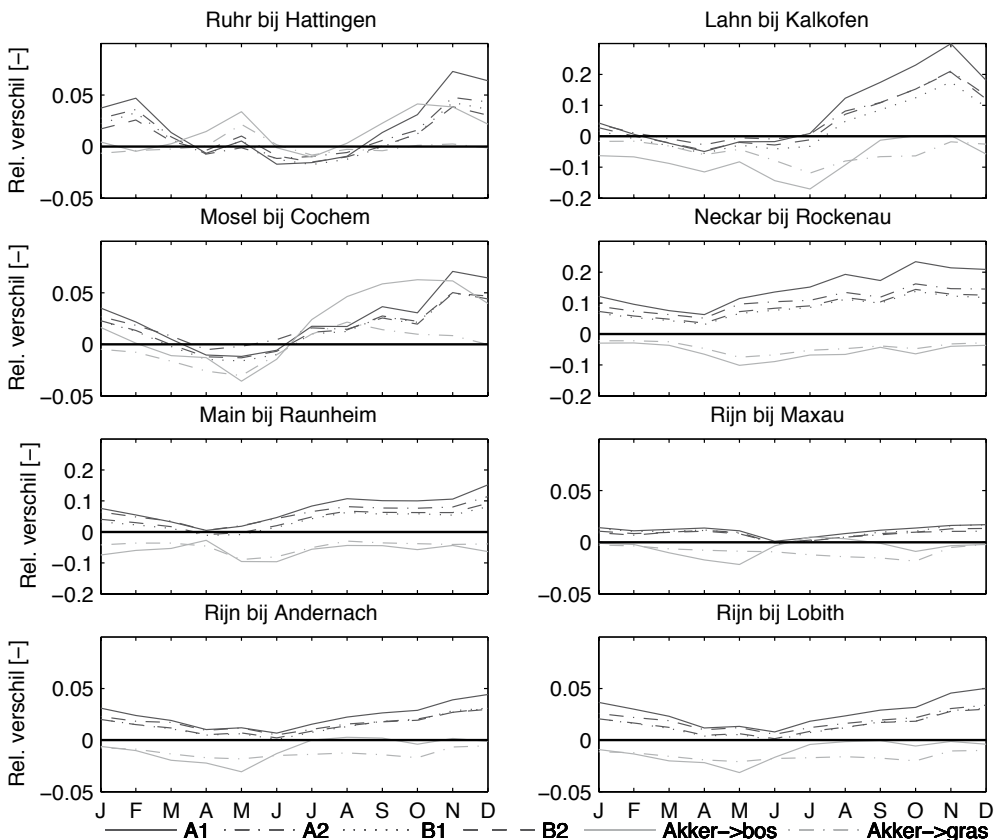
Type	$E_{tot}$		D		G		$E_{int}$		T		$E_{bod}$	
	N	O	N	O	N	O	N	O	N	O	N	O
Naald	629	608	67	73	60	75	141	141	434	466	52	0
Loof	663	628	57	67	34	60	136	136	422	491	103	0
Gemengd	640	616	63	71	52	69	139	139	431	475	68	0
Gras	639	614	63	70	53	71	135	135	429	480	75	0
Akker	608	518	79	118	70	124	69	69	378	450	162	0
Stad	341	314	409	252	0	183	0	0	-2	314	343	0

Er waren geen data beschikbaar om de gesimuleerde verdampingsfluxen exact te verifiëren, echter Verstraeten e.a. (2005) geven getallen voor de jaarlijkse waarden voor alle verdampingscomponenten in verschillende bossen en akkerlanden in België. Deze getallen worden als realistisch beschouwd en gebruikt als leidraad. Uit tabel 3 blijkt dat de verdampingscomponenten in de gewijzigde code realistischer worden gesimuleerd en dat de totale jaarlijkse verdamping is toegenomen vergeleken met de originele code. Dit is ook in overeenstemming met Hurkmans e.a. (2008a): hier werd de verdamping van een VIC pixel, dezelfde pixel die werd gebruikt voor bovenstaande simulaties, vergeleken met een lysimeter op die locatie. In deze studie werd een onderschatting van de jaarlijkse totale verdamping door VIC gevonden, die vooral in het winter seizoen tot stand kwam, als het belang van de bodemevaporatie relatief het grootst is. De verdamping van gras

is erg hoog vergeleken met die van bos en akkerland. Zoals te zien is in tabel 3 wordt dit vooral veroorzaakt door interceptieverdamping. In het VIC model is die een functie van bladoppervlakte-index en de weerstanden in de Penman-Monteith-vergelijking. In deze studie zijn standaardwaarden gebruikt voor deze parameters, maar het zou waarschijnlijk beter zijn om parameterwaarden specifiek voor dit gebied te gebruiken.

### 3. Effecten van landgebruiksveranderingen

De gewijzigde versie van het VIC-model is vervolgens gebruikt voor het simuleren van het gehele Rijnstroomgebied. Figuur 3 geeft de relatieve veranderingen in de afvoer op acht locaties in het stroomgebied (figuur 2) voor zes scenario's ten opzichte van de referentiesituatie. Vier van deze scenario's zijn de Eururalis-scenario's voor elk van vier CO<sub>2</sub> emissiescenario's die al eerder beschreven zijn. De andere twee zijn extremere, hypothetische scenario's, waarbij al het akkerland in het stroomgebied óf vervangen is door bos óf door grasland. Deze dienen als gevoeligheidsanalyse.

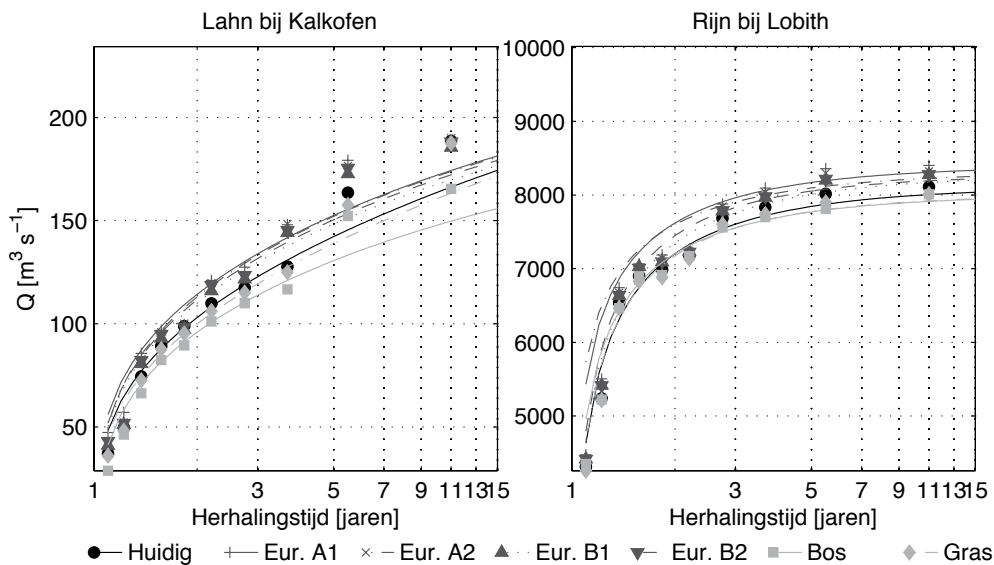


**Figuur 3:** Klimatologie van het relatieve verschil ((scenario-referentie)/referentie) in afvoer tussen zes landgebruiksveranderingsscenario's en de referentiesituatie, voor acht locaties in het Rijnstroomgebied. Positieve waarden duiden op een verhoging ten opzichte van de referentie.

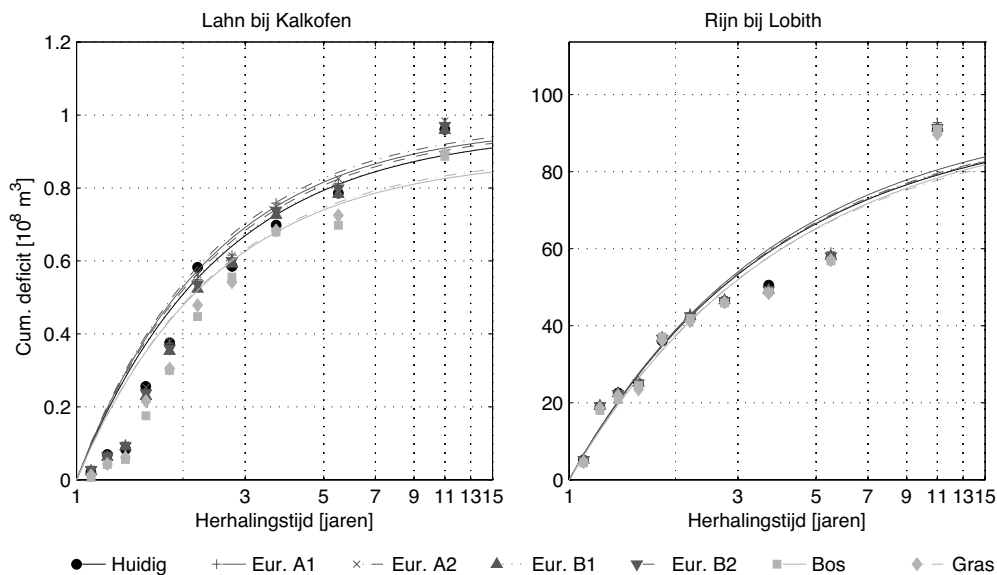


Uit figuur 3 blijkt dat over het gehele stroomgebied gezien de verschillen tussen de scenario's relatief klein zijn (minder dan 5%). Dit wordt voor de Eururalis-scenario's vooral veroorzaakt doordat twee typen landgebruiksveranderingen domineren (tabel 2): urbanisatie aan de ene kant en een omzetting van akkerland in natuurgebied, bos en grasland aan de andere kant. De toename van urbanisatie in de scenario's kan worden veroorzaakt door bevolkingsgroei of een toename van het landoppervlak per persoon, bijvoorbeeld door veranderende gezinssamenstelling. De afname van landbouwgrond is in alle scenario's behalve A2 een doorzettende trend in heel Europa. Met name in de marginale gebieden voor landbouw, zoals de bergen, is concurrentie met de wereldmarkt moeilijk. De verdwijning van productie in deze gebieden wordt gecompenseerd door intensivering, schaalvergroting en import. Over het hele stroomgebied compenseren de effecten van urbanisatie en omzetting van landbouwgrond elkaar, maar op kleinere schaal, als een van de twee dominant is, bijvoorbeeld in de Lahn of de Neckar, kunnen ze significant zijn. Zo is de toename van de gemiddelde afvoer in november in de Lahn ongeveer 35%. Voor het bovenstroomse deel van de Rijn, bij meetstation Maxau, zijn de verschillen extreem klein, binnen ongeveer twee procent. Een groot gedeelte van de afvoer bij Maxau komt namelijk uit Zwitserland: over het algemeen rond de 75% met een piek tot 97% in de vroege zomer door sneeuwsmelt. Voor dit gebied is aangenomen dat er geen veranderingen optreden (er zijn geen data beschikbaar voor Zwitserland), vandaar de kleine verschillen in afvoer. Doordat dit gebied erg bergachtig is zullen de veranderingen in landgebruik waarschijnlijk inderdaad relatief klein zijn ten opzichte van de rest van het stroomgebied. Bovendien is het oppervlak aan akkerland bovenstrooms van Maxau relatief klein, dus ook bij de hypothetische scenario's zijn de veranderingen relatief klein. Omdat de verschillen tussen de verschillende substroomgebieden relatief klein zijn, richten we ons voor de verdere analyses vooral op een relatief klein substroomgebied dat erg gevoelig is voor landgebruiksveranderingen, namelijk de Lahn met meetstation Kalkofen, en het gehele stroomgebied, met meetstation Lobith.

Gemiddelde afvoer is slechts beperkt relevant vanuit waterbeheerdersstandpunt. Daarom is ook gekeken naar de verandering in de verdeling van extreme waarden voor alle landgebruiksveranderingsscenario's. Figuur 4 geeft de jaarlijkse maxima in dagelijkse afvoer, afgezet tegen hun herhalingsperiode. Voor de vergelijking is ook een Generalized Extreme Value (GEV) verdeling door de datapunten geplot. Omdat de gesimuleerde reeks relatief kort is (slechts 10 jaar) zijn de verdelingen niet geëxtrapoleerd. De GEV-verdelingen laten vrijwel hetzelfde beeld zien als de gemiddelde afvoeren in figuur 3. De verschillen bij Lobith zijn minimaal, waarbij de vier Eururalis-scenario's een minimale verhoging laten zien en de hypothetische scenario's een kleine verlaging. Alle verschillen bedragen echter hooguit enkele procenten. Voor de Lahn bij Kalkofen kan hetzelfde gezegd worden, alleen heeft daar bebossing een veel groter effect: de grootste piekafvoer wordt met ongeveer 15% verlaagd bij bebossing. De Eururalis-scenario's hebben vooral effect bij gematigde herhalingsperiodes; bij de echt extreme pieken speelt, met uitzondering van extreme bebossing, landgebruik vrijwel geen rol meer. Omzetting van akkerland in grasland heeft op de extreme afvoeren vrijwel geen effect, hoewel dit bij Lobith tot een sterkere daling van piekafvoeren leidt dan bebossing.



**Figuur 4:** Jaarlijkse maximum afvoer versus herhalingstijd voor de referentiesituatie en zes landgebruiksveranderingsscenario's. Een Generalized Extreme Value-verdeling is door de datapunten gefit. Data worden getoond voor het gehele stroomgebied en het Lahn substroomgebied.



**Figuur 5:** Als figuur 4, maar dan voor extreme droge perioden. Als criterium voor de droogte is het jaarlijkse maximum van cumulatieve tekorten (deficits) ten opzichte van het 30%-percentiel van de afvoer gebruikt. Een Generalized Paretoverdeling is door de datapunten gefit. Data worden getoond voor het gehele stroomgebied en het Lahn substroomgebied.

Eenzelfde analyse is ook gedaan voor extreme droogteperiodes. Een droogte is hier voor gedefinieerd als een cumulatieve onderschrijding van het 30%-percentiel van de afvoer, zie ook Fleig e.a. (2006). De jaarlijkse maxima van deze cumulatieve tekorten zijn wederom tegen de herhalingstijden geplot in figuur 5. Nu is een 'Generalized Pareto' verdeling door de datapunten geplot, omdat deze geschikter is voor dit soort data dan een 'Generalized Extreme Value' verdeling (Fleig e.a., 2006). Bij Lobith zijn de verschillen nu nog kleiner dan in het geval van de piekafvoeren. Voor de Lahn zijn de veranderingen, n.e.a. bij de piekafvoeren, het grootst bij de gematigde gebeurtenissen en ook veel groter dan bij Lobith. Interessant is dat alle scenario's de onderschrijding ietwat verminderen, maar de extremere Eururalis-scenario's (A1 en A2) de droogte iets verergeren bij de gebeurtenissen met de hoogste herhalingstijden. Dit heeft te maken met het feit dat vooral directe afstroming in deze scenario's toeneemt door urbanisatie, terwijl grondwaterafvoer juist afneemt. In droge tijden leidt dit dientengevolge tot een verdere afname van rivierafvoer.

#### **4. Samenvatting en conclusies**

In dit onderzoek is een landoppervlaktemodel (het Variable Infiltration Capacity of VIC-model) gebruikt om de effecten van landgebruiksveranderingen op gemiddelde en extreme afvoeren in het Rijnstroomgebied en verscheidene substroomgebieden daarvan te onderzoeken. Het voordeel van een landoppervlaktemodel ten opzichte van eenvoudiger waterbalansmodellen is dat vooral de berekening van verdamping voor verschillende landgebruikstypen meer fysisch gebaseerd is. Dit maakt het model minder afhankelijk van calibratieparameters en robuuster in zijn toepassingen. De meer fysische basis maakt het model geschikt voor het simuleren van de effecten van landgebruiksveranderingen op afvoer in de Rijn.

Desalniettemin zijn enkele concepten in VIC voor verbetering vatbaar gebleken tijdens simulaties van een enkele pixel voor verschillende landgebruikstypen. Zo kan een oppervlak óf alleen via bodemevaporatie óf alleen via de vegetatie verdampen terwijl, zeker in schaars begroeide gebieden, vaak beide plaatsvinden. Het VIC-model is daarom aangepast om deze twee vormen van verdamping tegelijk te kunnen simuleren. Dit leidde tot een realistischere simulatie van de beide verdampingscomponenten en de jaarlijkse gang van de totale verdamping. Ook is een onderschatting van de totale verdamping, gebleken uit lysimeter-onderzoek dat is beschreven in Hurkmans e.a. (2008a), grotendeels opgelost.

Het gewijzigde model is vervolgens gebruikt om de effecten op afvoer van zes landgebruiksveranderingsscenario's te simuleren. Vier daarvan zijn realistische scenario's, zoals de situatie in 2030 zou kunnen zijn volgens het Eururalis-project. Daarnaast zijn twee hypothetische scenario's onderzocht, waarbij akkerland is omgezet in bos of grasland, om de gevoeligheid van afvoer voor landgebruik te testen. Op verschillende locaties in het gebied, corresponderend met substroomgebieden van verschillende grootte, zijn de veranderingen in afvoer onderzocht. Over het gehele stroomgebied bleken veranderingen in zowel gemiddelde als extreme afvoer erg beperkt te zijn (typisch

minder dan 5%), omdat tegenovergestelde effecten zoals urbanisatie en bebossing elkaar compenseren. Op lokale schaal daarentegen kunnen veranderingen aanzienlijk zijn. De vier Eururialis-scenario's verhoogden de gemiddelde afvoeren en de piekafvoeren in vrijwel alle gevallen, terwijl door vermindering van grondwaterafvoer de afvoer tijdens extreme droogtes verder verlaagd werd. Omzetting van akkerland in bos en grasland heeft ook vooral lokaal invloed, maar dit is uiteraard sterk afhankelijk van het huidige landgebruik. In vervolgonderzoek zouden daarom meer verschillende landgebruiksveranderingsscenario's in verschillende substroomgebieden onderzocht kunnen worden. Een effectieve combinatie daarvan zou in staat kunnen zijn de totale piek bij Lobith te verlagen door de piekafvoeren uit de substroomgebieden af te vlakken, te vertragen of juist te versnellen.

## 5. Dankbetuiging

Dit onderzoek word gefinancierd door het EU FP6-project NeWater en het Nederlandse BSIK-project ACER. Daniela Jacob en Eva Starke van het Max Planck Institut für Meteorologie worden bedankt voor het leveren van de atmosferische data en Hendrik Buiteveld van Rijkswaterstaat Waterdienst voor het beschikbaar stellen van afvoergegevens.

## 6. Referenties

- Aerts, J.C.J.H., M. Kriek, en M. Schepel (1999)** *STREAM (Spatial Tools for River Basins and Environment and Analysis of Management Options): "set up and requirements"*; in: *Phys. Chem. Earth*, 24, 591–595, doi:S1464-1909(99)00049-0.
- Beersma, J.J., T.A. Buishand en R. Wojcik (2001)** *Rainfall generator for the Rhine basin: Multi-site simulation of daily weather variables by nearest-neighbour resampling*; in: P. Krahe en D. Herpertz (red) *Generation of hydrometeorological reference conditions for the assessment of flood hazard in large river basins, Lelystad, the Netherlands*, pag 69–77.
- Bradshaw, C.J.A., N.S. Sodhi, K.S.-H. Peh, en B. W. Brook (2007)** *Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world*; in: *Global Change Biology*, 13, 1–17, doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01446.x.
- Clark, C. (1987)** *Deforestation and floods*; in: *Environmental Conservation*, 14 (1), 67–69.
- Fleig, A.K., L.M. Tallaksen, H. Hisdal, en S. Demuth (2006)** *A global evaluation of streamflow drought characteristics*; in: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 535–552.
- Hurkmans, R.T.W.L., H. de Moel, J.C.J.H. Aerts, en P.A. Troch (2008a)** *Water balance versus land surface model in the simulation of Rhine river discharges*; *Water Resour. Res.*, 44, W01418, doi:10.1029/2007WR006168.
- Hurkmans, R.T.W.L., W. Terink, R. Uijlenhoet, E.J. Moors, P.A. Troch, en P.H. Verburg (2008b)** *Effects of land use changes on streamflow generation in the Rhine basin*; *Ingediend bij Water Resour. Res.*
- IPCC (2000)** *Special report on emissions scenarios - a special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Tech. rep.*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

- IPCC (2007)** *Fourth assessment report: Climate change 2007: Climate change impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policy makers; Tech. Rep. IPCC WGII Fourth Assessment report, Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Jacob, D. (2001)** *A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin; in: Meteorol. Atmos. Phys., 77, 61–73.*
- Kleinn, J., C. Frei, J. Gurtz, D. Luthi, P. L. Vidale, en C. Schär (2005)** *Hydrologic simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model; in: J. Geophys. Res., 110 (D04102), doi: 10.1029/2004JD005143.*
- Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, en S. J. Burges (1994)** *A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models; in: J. Geophys. Res., 99 (D7), 14,415–14,458.*
- Linde, A.H. te, J.C.J.H. Aerts, R.T.W.L. Hurkmans, en M. Eberle (2008)** *Comparing model performance of two rainfall-runoff models in the Rhine basin using different atmospheric forcing data sets; in: Hydrol. Earth Syst. Sci., 12, 943–957.*
- Lindström, G., B. Johansson, M. Gardelin, en S. Bergström (1997)** *Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model; in: J. Hydrol., 201, S0022-1694(97)00041-3.*
- Lohmann, D., R. Nolte-Holube, en E. Raschke (1996)** *A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parameterization schemes; in: Tellus, 48A, 708–721.*
- Miguez-Macho, G., H. Li, en Y. Fan (2008)** *Simulated water table and soil moisture climatology over North America; in: Bull. Amer. Meteor. Soc., 89, 663–672, doi:10.1175/BAMS-89-5-663.*
- Mücher, S., K. Steinnocher, J.-L. Champeaux, S. Griguolo, K. Wester, C. Heunks, en V. van Katwijk (2001)** *Establishment of a 1-km Pan-European Land Cover database for environmental monitoring; in: ISPRS, 33.*
- Reynolds, C.A., T.J. Jackson, en W.J. Rawls (2000)** *Estimating water-holding capacities by linking the Food and Agriculture Organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions; in: Water Resour. Res., 36 (12), 3653–3662.*
- Teuling, A.J., F. Hupet, R. Uijlenhoet, en P.A. Troch (2007)** *Climate variability effects on spatial moisture dynamics; in: Geophys. Res. Lett., 34, L06406, doi:10.1029/2006GL029080.*
- Verburg, P.H., en H.J. Westhoek (2005)** *Sealing: hoeveel bodem verdwijnt er onder de stad? Toekomstverkenning van de uitbreiding van bebouwd oppervlak in Europa; in: Bodem, 6, 221–223.*
- Verburg, P.H., C.J.E. Schulp, N. Witte, en A. Veldkamp (2006)** *Downscaling of land use change scenarios to assess the dynamics of European landscapes; in: Agric. Ecosyst. and Environ., 114, 39–56, doi:10.1016/j.agree.2005.11.024.*
- Verburg, P.H., B. Eickhout, en H. van Meijl (2008)** *A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use; in: The Annals of Regional Science, 42, 57–77.*
- Verstraeten, W.W., B. Muys, J. Feyen, F. Veroustraete, M. Minnaert, L. Meiresonne, en A.D. Schrijver (2005)** *Comparative analysis of the actual evapotranspiration of Flemish forest and cropland, using the soil water balance model WAVE; in: Hydrol. Earth Syst. Sci., 9, 225–2241.*
- Wit, M. de, H. Buiteveld, W. van Deursen en F. Keller, en J. Bessembinder (2008)** *Klimaatverandering en de afvoer van Rijn en Maas; in: Stromingen, 14 (1), 13–24.*

