

# Cyclische verjonging van uiterwaarden

## Een hoogwater- en natuurbeheerstrategie gemodelleerd

Cyclische verjonging van uiterwaarden is een hoogwater- en natuurbeheerstrategie die erosie- en sedimentatieprocessen van natuurlijke riviersystemen simuleert. In gereguleerde rivieren ontbreken deze processen grotendeels en dreigen de uiterwaarden letterlijk dicht te groeien met oobossen. Daarbij neemt zowel de vegetatie diversiteit als de afvoercapaciteit af. Met een model is bepaald hoe frequent en over welke oppervlakte de vegetatie moet worden verjongd om zowel de hoogwaterveiligheid te behouden als de biotische diversiteit te vergroten.

De winterdijken langs de Rijn bieden bescherming tegen overstroming van het achterland. De kans dat overschrijding van de maatgevende waterstand plaatsvindt, is bepaald op 1/1250ste per jaar. Dit is de kans dat de zogenaamde ontwerpafoer wordt overschreden. De hoogte van de dijken is gebaseerd op deze afoer. Tot voor kort was de ontwerpafoer vastgesteld op een debiet van 15.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Als gevolg van de hoogwaters in 1993 en 1995 is deze bijgesteld naar 16.000 m<sup>3</sup>/s (Ministerie V&W, 2000). Zonder aanvullende maatregelen betekent dit dat de waterstanden bij de ontwerpafoer zullen stijgen. In het bovenstroomse gedeelte van de Waal stijgen de waterstanden met 20 - 30 cm. Een mogelijke oplossing is het opnieuw verhogen en verzwaren van de dijken. Maar tegenwoordig gaat de voorkeur uit naar meer duurzame oplossingen (Van Stokkom & Smits, 2002). Deze oplossingen kunnen worden gezocht in het winterbed van de rivier. Hier kunnen maatregelen worden getroffen die de afvoercapaciteit van de rivier vergroten en de waterstanden doen dalen. Deze buitendijkse maatregelen betreffen (1) het verlagen van de uiterwaarden, eventueel gepaard gaande met het aanleggen van nevengeulen, (2) het verwijderen van obstakels en hoogwater vrije terreinen en (3) het verlagen van kribben (Silva *et al.*, 2000; Van Stokkom & Smits, 2002). Tegelijkertijd kan hiermee meer ruimte ontstaan voor hoogdynamische rivierna tuur in de uiterwaarden (Van der Molen *et al.*, 2002).

De uiterwaarden van de Rijn maken onderdeel uit van de Ecologische Hoofdstructuur (Ministerie LNV, 1990). De ministeries van LNV en V&W werken nauw samen om een invulling te geven aan zowel de natuurbeschermings- als rivierkundige doelen waarbij de vergroting van de afvoercapaciteit een belangrijke rol speelt (Ministeries V&W en LNV, 2000). Veel van de natuurontwikkelingsprojecten in de uiterwaarden zijn gericht op herstel van de abiotische natuurlijke processen die de abiotische en biotische diversiteit bepalen. Een actief beheer van deze zelfregulerende natuur wordt zo veel mogelijk vermeden. Op de ontkleide en aan de landbouw onttrokken terreinen ontwikkelt zich in de eerste jaren na de ingrepen een mozaïek van vegetatietypen. Dit is opgebouwd uit soortenrijk grasland, ruigte, struwelen en zachthoutoobos met verschillende wilgensoorten en Zwarte populier (*Populus nigra*) (Jongman, 1992; Duel & Kwakernaak, 1992; Van Splunder, 1998; Peters, 2002). Het vegetatiepatroon wordt grotendeels bepaald door de lokale hydromorfologische karakteristieken. Maar ook door grote grazers die weinig verzorging behoeven zoals Koniks, Galloways en Schotse hooglanders (Vera, 2000; Cornelissen & Vulink, 2001). Zou een ongestoorde successie mogelijk zijn in de uiterwaarden, dan is te verwachten dat na meer dan 100 jaar op sommige plaatsen het zachthoutoobos wordt vervangen door hardhoutoobos. Hardhoutoobos wordt geken-

**MARTIN BAPTIST,**  
**TOINE SMITS, HARM**  
**DUEL, GUDA VAN DER**  
**LEE, GERTJAN**  
**GEERLING, ELLIS**  
**PENNING & JOS VAN**  
**ALPHEN**

**Ir. M.J. Baptist**, TU Delft, Sectie Waterbouwkunde, Postbus 5048, 2600 GA Delft, tevens WL | Delft Hydraulics, martin.baptist@wldelft.nl.  
**Drs. H. Duel, dr. G.E.M. van der Lee en ir. W.E. Penning**, WL | Delft Hydraulics, Delft.  
**Prof. dr. A.J.M. Smits** en **drs. G.W. Geerling**, Afdeling Milieukunde, KU Nijmegen.  
**Drs. J.S.L. van Alphen**, Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland, Arnhem.

Foto: **Martin Baptist**

merkt door soorten zoals Eik (*Quercus spp.*), Es (*Fraxinus excelsior*) en Iep (*Ulmus minor*) (Vera, 2000; Peters, 2002). Inmiddels zijn al vele uiterwaardprojecten langs Rijn en Maas uitgevoerd of in uitvoering waarin zowel natuur- als veiligheidsdoelen worden gerealiseerd. Voorbeelden langs de Nederrijn zijn de spoorbrug bij Oosterbeek, het stuweiland bij Driel en de dijkteruglegging Bakenhof bij Arnhem. Langs de Waal bevinden zich natuurprojecten waar nevengeulen zijn aangelegd zoals in de Gamerensche Waard, de Afferdensche en Deestse Waarden, de Klompenwaard en bij Beneden-Leeuwen. In de Maas is het proefproject Meers uitgevoerd. Monitoringsprogramma's van deze natuurprojecten laten zien dat de biotische diversiteit in het rivierenlandschap sterk toeneemt door deze ingrepen (Simons *et al.*, 2001; Raat, 2001). Vanuit natuurbeschermingsperspectief kan men deze projecten als geslaagd beschouwen. Echter, naarmate de tijd verstrijkt wordt een nieuw spanningsveld zichtbaar. De snelgroeiende zachthoutoibossen veroorzaken een opstuwning van het water bij hoge rivierafvoeren doordat ze een hoge hydraulische weerstand hebben. Tevens zanden de verlaagde delen van de uiterwaard versneld aan en bovendien vangen de struiken en bomen zand in. Beide processen verkleinen de afvoercapaciteit van het winterbed. Onder natuurlijke omstandigheden (in niet-gereguleerde riviersystemen) zorgen sedimentatie en erosie er voor dat regelmatig de vegetatiesuccessie wordt onderbroken en elders weer opnieuw begint (Hughes, 1997). Dit cyclische proces van opbouw en afbraak is een belangrijk mechanisme voor het in stand houden van de vegetatiediversiteit (Ward *et al.*, 1999; Tockner *et al.*, 2000; Hughes *et al.*, 2001). Natuurlijke cyclische verjonging is voor diverse typen riviersystemen beschreven, zoals laaglandrivieren (Salo *et al.*, 1986; Hupp, 1992; Shields *et al.*, 2000), grindrivieren (Pautou *et al.*, 1997; Piégay, 1997) en ook bergbekken (Nakamura *et al.*, 2000). In gereguleerde riviersystemen,

zoals de Rijn, zijn erosie- en sedimentatieprocessen die het gevolg zijn van meandering aan banden gelegd. Door het ontbreken van natuurlijke meandering worden uiterwaarden niet langer periodiek schoongeveegd. Hierdoor dreigt een ongestoorde groei van met name het zachthoutoibos de afvoercapaciteit van de rivier drastisch te verminderen.

Een mogelijke oplossing voor dit dilemma tussen natuur en veiligheid kan geboden worden door de erosieprocessen van natuurlijke rivieren na te bootsen in gereguleerde riviersystemen (Smits *et al.*, 2000). In theorie kan dit belangrijke voordelen bieden. De vegetatiesuccessie van de uiterwaarden wordt beheerst onderbroken zonder dat dit gevaren oplevert voor de primaire waterkeringen (wat bij een ongecontroleerde bochtverlegging door de rivier zelf wel het geval kan zijn). Dit levert meer verscheidenheid in het landschap op en herstelt tegelijkertijd de afvoercapaciteit. Bovendien wordt gesedimenteed materiaal verwijderd door het opnieuw afgraven van uiterwaarden of door opnieuw uitbaggeren van aangezande nevengeulen. Het kan ook nodig zijn om nieuwe nevengeulen te creëren (Duel *et al.*, 2001). Belangrijke vragen bij het in de praktijk brengen van deze beheersstrategie zijn:

- Met welke frequentie zou in een gereguleerde rivier de vegetatiesuccessie onderbroken moeten worden en/of sediment worden verwijderd?
- Welk oppervlak moeten deze ingrepen beslaan?

Deze vragen over de strategie van cyclische verjonging zijn verkend in een modelstudie.

## Methoden Studiegebied

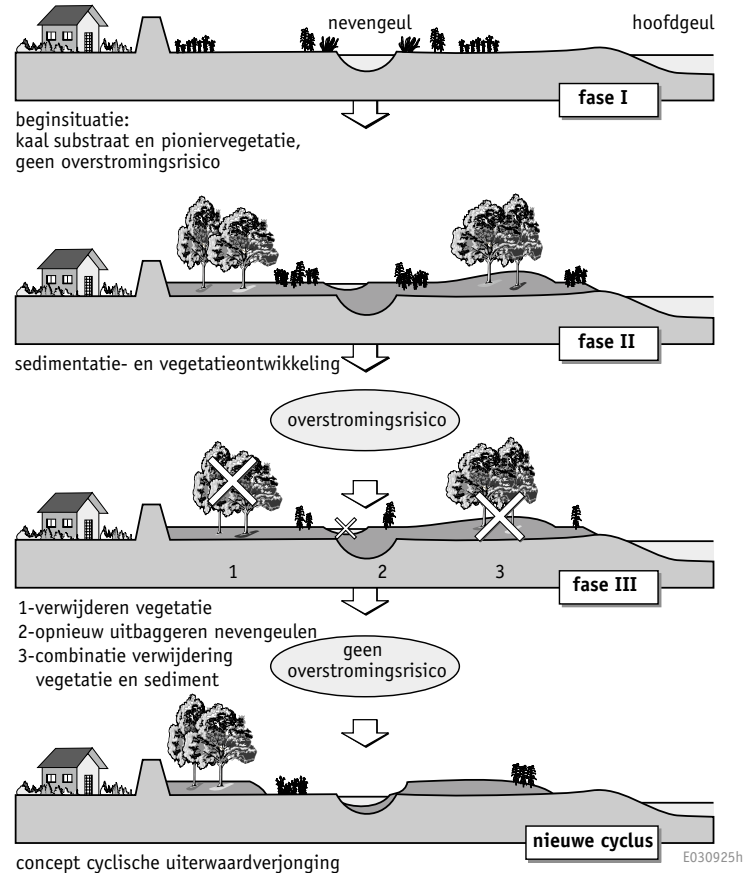
Het studiegebied omvat 50 strekkende kilometers van de Waal, stroomafwaarts vanaf het splitsingspunt bij Pannerden. Het studiegebied is geconcentreerd op de 500-1000 m brede uiterwaarden. Deze uiterwaarden zijn netto

sedimentatiegebieden (Asselman & Middelkoop, 1998). Het grootste gedeelte is momenteel in gebruik voor beweiding van vee, er zijn enkele akkers en sommige delen zijn ingericht als natuurgebied. De totale oppervlakte van het studiegebied bedraagt 9500 ha.

### Modelaanpak en simulaties

In deze studie zijn hydrologische, morfologische en ecologische processen in uiterwaarden gemodelleerd. Drie modellen zijn toegepast: een waterbewegingsmodel, een sedimentatiemodel en een vegetatiemodel. De waterstanden in de Waal zijn gemodelleerd met behulp van het DSS (Decision Support System) Large Rivers (Schielen *et al.*, 2001) waarin het één-dimensionale waterbewegingsmodel SOBEK is ingebouwd (SOBEK, 2002; Verweij, 2001). Dit DSS is ontwikkeld om de effecten van verschillende rivierkundige maatregelen op de waterstanden van de Rijn-takken te voorspellen. De successie van vegetatie en de sedimentatie van zand en slib op de uiterwaarden is gesimuleerd in twee aparte modules die invoer leveren voor het waterbewegingsmodel (Van der Lee *et al.*, 2001a).

De maatgevende hoogwaterstanden langs de Waal waarop de huidige dijken zijn gedimensioneerd zijn in deze studie als referentiewaterstanden gekozen. Om een maatgevende Rijnafvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te kunnen accommoderen zonder deze referentiewaterstanden te overschrijden zijn waterstandverlagende maatregelen nodig. De modelsimulaties starten dan ook met een reeks maatregelen, zoals die zijn beschreven in het Ruimte-voor-Rijn-takkenproject (RvR; Silva *et al.*, 2000). Voor deze studie is RvR-alternatief 2 als uitgangspunt gekozen. Dit alternatief zet in op een maximaal areaal natuurontwikkeling. Dat gebeurt zodanig dat de waterstanden ruimschoots onder de referentiewaterstanden blijven. Figuur 1 geeft de verschillende fases in het proces van cyclische uiterwaardverjonging weer. Fase I is direct na de waterstandsverlagende maat-



**Figuur 1** Natuurlijke ontwikkelingen en cyclische uiterwaardverjonging in een schematische dwarsdoorsnede. In Fase I zijn de uiterwaarden verlaagd, nieuwe nevenggeulen gegraven en bestaat de vegetatie voornamelijk uit pioniersoorten. Fase I gaat over in Fase II, waarin de afvoercapaciteit is gereduceerd als gevolg van de groei van zachthoutoobossen, het opvullen van nevenggeulen en uiterwaardsedimentatie. In Fase III worden verjongingsmaatregelen genomen, (1) verwijderen van zachthoutoobos, (2), aanleg of verdiepen van nevenggeulen en (3) uiterwaardverlaging in combinatie met verwijderen van vegetatie. Deze maatregelen worden herhaald wanneer Fase II opnieuw bereikt wordt. Naar Baptist *et al.* (in press).

**Figure 1** Natural developments and Cyclic Floodplain Rejuvenation in a schematic cross-section. In Stage I, the floodplains have been lowered, new secondary channels have been constructed and pioneer vegetation prevails. Stage I evolves to Stage II, where the conveyance capacity is reduced due to softwood forest growth, filled up secondary channels and floodplain sedimentation. In Stage III Cyclic Floodplain Rejuvenation measures are applied, (1) removal of softwood forest, (2) reconstructing secondary channels and (3) floodplain lowering, including removal of vegetation. CFR measures are repeated when Stage II has been reached again. After Baptist *et al.* (in press).



regelen. Het verschil tussen de waterstanden bij 16.000 m<sup>3</sup>/s en de referentiewaterstanden is dan groot en kan worden benut om morfologische en vegetatieontwikkelingen in de uiterwaarden toe te laten (Fase II). Op het moment dat de modelsimulaties aangeven dat de referentiewaterstand wordt overschreden in één of meer uiterwaarden worden cyclische verjongingsmaatregelen gesimuleerd zodat de afvoercapaciteit weer toeneemt (Fase III). Hierna kan een nieuwe cyclus beginnen, totdat de veiligheid opnieuw in het gedrang komt. De maatregelen van cyclische verjonging kunnen bestaan uit een combinatie van:

- verminderen van het areaal zachthoutoibos;
- verlagen van uiterwaarden;
- uitbaggeren van bestaande of aanleggen van nieuwe nevengeulen.

De exacte invulling van de maatregelen is uitgewerkt in een GIS met gedetailleerde kaarten van het studiegebied. Een iteratieve procedure werd toegepast waarbij nieuwe ontwerpen werden gemaakt en doorgerekend met het DSS net zolang totdat de waterstandverlaging voldoende was. In de studie zijn criteria opgesteld voor de typen maatregelen. Cyclische verjonging is in de eerste plaats een hoogwaterstrategie, maar is ook een natuurbeheerstrategie. De maatregelen moeten daarom voldoen aan de volgende criteria in volgorde van belangrijkheid:

1. *Hydraulische effectiviteit.* De hydraulische effectiviteit is de mate van verlaging van waterstanden. Deze effectiviteit

verschilt per maatregel, afhankelijk van het type, de grootte en de locatie binnen de uiterwaard. Maatregelen die worden uitgevoerd in een deel van een uiterwaard waarin de stroomsnelheid hoog is zijn effectiever dan in delen waarin het water bijna stil staat.

2. *Behoud van waardevolle landschapselementen.* Waardevolle vegetaties (bijv. hardhoutoibossen), geomorfologische structuren (bijv. rivierduinen) of cultuurhistorische landschapselementen (bijv. oude nederzettingen) moeten zoveel mogelijk behouden blijven.

3. *De natuurlijke mechanismen van verjonging.* Verjonging door natuurlijke processen, zoals door geulmigratie of schuring door ijs, is meestal locatiespecifiek. De kunstmatige verjonging kan daarom het best worden uitgevoerd op dit soort plekken.

4. *Landschapstructuur.* De landschapstructuur van uiterwaarden moet op grote schaal (minstens enkele duizenden hectares) worden versterkt. Belangrijke landschapselementen, zoals zandbanken, zacht- en hardhoutoibossen, rivierduinen, moerassen en natte graslanden moeten in de gewenste verhouding aanwezig zijn om de natuurlijkheid van de uiterwaarden te vergroten.

## Het sedimentatiemodel

De sedimentatie in de uiterwaarden is berekend met een kennismodel. Hiertoe zijn de uiterwaarden onderverdeeld in acht morfologische eenheden (Tabel 1). Per morfologische eenheid is een sedimentatiesnelheid gedefinieerd in millimeters per inundatiedag, behalve voor de rivierduinen. Bij deze methode neemt de sedimentatiesnelheid af naarmate de uiterwaard hoger wordt. De kennisregels in dit model zijn gebaseerd op studies door Asselman (2001), Mosselman (2001) en Asselman & Van Wijngaarden (2002). Lage sedimentatiesnelheden zijn gedefinieerd als 2 tot 7 cm per 5 jaar, in overeenstemming met veldmetingen (Asselman & Middelkoop, 1998; Middel-

**Tabel 1** Sedimentatiesnelheden voor morfologische eenheden in de Waal (naar Asselman, 2001; Mosselman, 2001).

**Table 1** Sedimentation rates for morphological floodplain units for the Waal River (after Asselman, 2001; Mosselman, 2001).

Morfologische eenheid	Samenstelling	Sedimentatiesnelheid	
		(mm / inundatie/dag)	(m / jaar)
Instroomgebied uiterwaard	zand	1.0	-
Binnenbocht	zand	1.0	-
Rivierduin	zand	-	0.15
Ingang langzaam aanzandende nevengeul	zand	0.2	-
Ingang gemiddeld aanzandende nevengeul	zand	1.0	-
Ingang snel aanzandende nevengeul	zand	2.0	-
Overige delen van nevengeulen	slib, klei	0.13	-
Overige uiterwaard	slib, klei	0.13	-



koop & Asselman, 1998). Gebieden met deze lage sedimentatiesnelheden zijn de delen van de uiterwaard die opslibben. Hoge sedimentatiesnelheden liggen tussen de 1 m per 5 jaar voor verlaagde uiterwaarden, tot 2 m per 5 jaar bij de ingangen van nevengeulen. In het model wordt iedere vijf jaar de uiterwaardhoogte opnieuw berekend aan de hand van de sedimentatiesnelheden.

## Het vegetatiemodel

Ook de vegetatieontwikkeling in de uiterwaarden is vervat in een kennismodel. Dit model berekent de veranderingen in vegetatietypen en de daaruit volgende hydraulische weerstand van het winterbed. De ontwikkeling en successie van vegetatie wordt in het model beïnvloed door vier variabelen: (1) de inundatieduur, (2) de uitgangsomstandigheden van de uiterwaard, (3) de begrazingsdichtheid en (4) de sedimentatiesnelheid (Van der Lee *et al.*, 2001b). De inundatieduur is een belangrijke factor voor het ontstaan van verschillende vegetatietypen (Dister, 1980; Jongman, 1992; Duel & Kwakernaak, 1992; Van Splunder, 1998). In het model zijn vegetatietypen onderverdeeld in homogene typen en ooibosmozaïeken. De homogene typen bevatten pioniervegetatie, graslanden, ruigtes en moerasvegetatie. Vier typen ooibosmozaïek zijn onderscheiden aan de hand van het bedekkingspercentage zacht-houtooibos (mozaïek I  $t_m$  IV): 0- 10%, 10- 25%, 25- 50% en 50- 100% bedekking. Ieder type mozaïek bevat verder 10% ruigte en het restant is soortenrijk grasland. De successiesnelheden hangen af van de inundatieduur en de uitgangsomstandigheden van de uiterwaard.

De uitgangsomstandigheden van een uiterwaard hangen af van het landgebruik voorafgaand aan natuurontwikkeling. Dit is mede bepalend voor de richting en snelheid van vegetatiesuccessie (Peters, 2002). Het model maakt onderscheid tussen voormalig grasland, voormalige akker en vergraven minerale grond (kaal substraat). De kort-

ste tijd die nodig is om een situatie met een hoge bedekking aan zacht-houtooibos te krijgen wordt gehaald bij een kaal substraat en een inundatieduur van 100 - 180 dagen per jaar. Wanneer de uiterwaard voor meer dan 180 dagen per jaar onder water staat kan alleen pioniervegetatie of ruigte overleven.

Begrazing door grote grazers als runderen en paarden leidt tot een mozaïek van zacht-houtooibos afgewisseld met grasland en ruigtes afhankelijk van de begrazingsdichtheid (Cornelissen & Vulink, 2001). In het model is een extensieve begrazingsdichtheid van 1 stuks grootvee per 3 hectare aangenomen.

Tot slot is de sedimentatie van zand op uiterwaarden van belang. Een hoge sedimentatiesnelheid kan de vegetatiesuccessie lokaal terugzetten (Peters, 2002). In het model volgt de sedimentatiesnelheid uit het gebruikte sedimentatiemodel. Wanneer de sedimentatiesnelheid hoger is dan 20 cm per jaar wordt in het model grasland of ruigte teruggezet naar kaal substraat, terwijl een zacht-houtooibos in stand blijft. Tabel 2 presenteert de beslisregels voor successie voor enkele vegetatietypen.

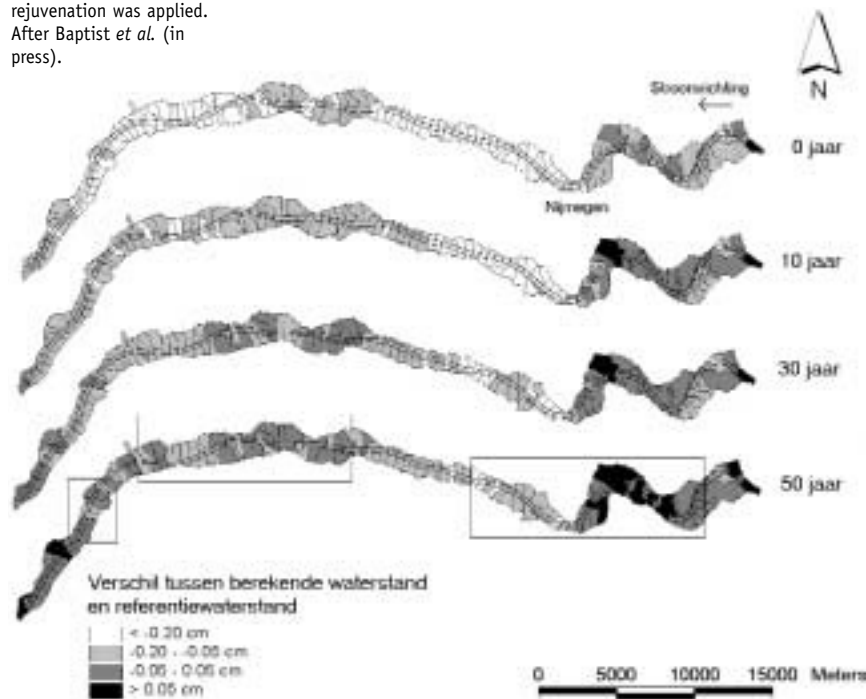
**Tabel 2** Successiereeksen voor vegetatietypen in uiterwaarden langs de Waal, voor drie verschillende klassen van inundatie en drie typen begincondities voor de uiterwaard (naar Van der Lee *et al.*, 2001b).

**Table 2** Vegetation succession in floodplains (after Van der Lee *et al.*, 2001b).

Tijd (jr) start	grasland	akker	kaal substraat
<b>Inundatie &lt;50 d/jr</b>			
5	grasland	mozaïek I	grasland
10	mozaïek I	mozaïek I	grasland
25	mozaïek I	mozaïek II	mozaïek I
50	mozaïek II	mozaïek III	mozaïek I
<b>Inundatie 50-100 d/jr</b>			
5	ruigte	mozaïek I	mozaïek I
10	mozaïek I	mozaïek II	mozaïek II
25	mozaïek I	mozaïek III	mozaïek II
50	mozaïek II	mozaïek IV	mozaïek III
<b>Inundatie 100-180 d/jr</b>			
5	ruigte	mozaïek I	mozaïek III
10	mozaïek I	mozaïek II	mozaïek IV
25	mozaïek I	mozaïek III	mozaïek IV
50	mozaïek II	mozaïek IV	mozaïek IV

**Figuur 2** Het verschil tussen de berekende waterstanden bij 16.000 m<sup>3</sup>/s en de referentiewaterstanden voor uiterwaardsegmenten van de Waal, respectievelijk 0, 10, 30 en 50 jaar na hoogwatermaatregelen. De kaders geven de gebieden aan waarin cyclische verjonging is toegepast. Naar Baptist *et al.* (in press).

**Figure 2** Difference between the computed flood level at 16.000 m<sup>3</sup>/s and the design level for floodplain sections of the Waal River, respectively 0, 10, 30 and 50 years after flood protection measures. The boxed areas indicate where cyclic floodplain rejuvenation was applied. After Baptist *et al.* (in press).



Vegetatietype	Weerstandshoogte (m)
<i>Homogene vegetatietypen</i>	
Produktiegrasland	0.2
Soortenrijk grasland	0.8
Ruigte	2.0
Kaal substraat	0.2
Pioniervegetatie	0.2
Moerasvegetatie	5.0
<i>Vegetatiemozaïeken</i>	
0-10% ooibos	1.84
10-25% ooibos	3.22
25-50% ooibos	5.52
50-100% ooibos	10.00

**Tabel 3** Hydraulische weerstand van vegetatietypen uitgedrukt als Nikuradse weerstandshoogte in meters (naar Van der Lee *et al.*, 2001b).

**Table 3** Hydraulic roughness of vegetation types, expressed as Nikuradse roughness height in metres (after Van der Lee *et al.*, 2001b).

Het patroon aan vegetatietypen wordt vervolgens omgekeerd naar een waarde voor de hydraulische weerstand van de uiterwaarden. De hydraulische weerstand is hierbij gedefinieerd als een Nikuradse-equivalente ruwheidshoogte in meters (Nikuradse, 1930). Dit is een gebruikelijke methode om de ruwheid van vegetatie in te voeren in waterbewegingsmodellen. Na iedere tijdstap van vijf jaar wordt een nieuwe weerstandsk kaart gegenereerd. Dit vormt de invoer van een nieuwe berekening met SOBEK. Tabel 3 geeft de hydraulische weerstand van verschillende vegetatietypen.

## Resultaten

### Effect op de waterstanden

De modelberekeningen laten zien dat de verhoging van de waterstanden als gevolg van sedimentatie en vegetatieontwikkeling gemiddeld 20 cm in 50 jaar bedraagt. In de eerste 10 jaar na de rivierverruimende maatregelen is de gemiddelde stijging zelfs al 10 cm. In deze periode vindt een snelle houtopslag plaats en bovendien reageert de verlaagde uiterwaard door weer snel aan te zanden. Figuur 2 toont de verschillen tussen de berekende waterstand en de referentiewaterstand voor ieder SOBEK-vak van het studiegebied, respectievelijk 0, 10, 30 en 50 jaar na de rivierverruimende maatregelen. Wanneer dit verschil in waterstand groot is, is er veel ruimte voor sedimentatie en vegetatieontwikkeling. Figuur 2 laat zien dat de meest bovenstroomse uiterwaarden al onmiddellijk na uitvoering van de rivierverruiming dicht op de referentiewaterstand zitten. Als gevolg van de opstuwning van het water door het nauwe rivierbed bij Nijmegen is de waterstands daling hier minder groot.

Gedurende de gesimuleerde 50 jaar bleek het noodzakelijk om cyclische verjonging een aantal keren toe te passen om de waterstanden weer te verlagen. Cyclische verjonging is toegepast na 10, 25 en 35 jaar in de gebieden die

zijn omkaderd in Figuur 2. Bovenstrooms van Nijmegen bleek het nodig binnen 50 jaar drie maal verjonging toe te passen, variërend van ooibosverwijdering, uiterwaardverlaging tot het opnieuw openen van nevengeulen. In de rest van het studiegebied voldeed eenmaal verjonging. Met weglating van het gebied bovenstrooms van Nijmegen bleek dat cyclische verjonging moest worden toegepast op een oppervlakte van 1400 hectare na een ontwikkelingsduur van 25 en 35 jaar om de waterstanden onder het referentieniveau te houden. Tabel 4 presenteert een overzicht van de cyclische verjongingsmaatregelen in termen van hoeveelheden verwijderd sediment en ooibos.

### Sedimentatie in de uiterwaarden

Het totale volume sediment dat wordt afgezet op de uiterwaarden in het studiegebied is gemiddeld 4 miljoen m<sup>3</sup> per 5 jaar volgens de berekeningen van het model. Dit komt overeen met een gemiddelde verhoging van de uiterwaarden met 0,8 cm per jaar. In de eerste 10 jaar na de maatregelen is de sedimentatie het grootst omdat dan de verlaagde uiterwaarden extra sedimentatie veroorzaken. De sedimentatiesnelheden zijn laag in de hoger gelegen delen van de uiterwaard en hoog in de verlaagde uiterwaarden en in de nevengeulen. Slechts 10% van de uiterwaarden is verantwoordelijk voor de accumulatie van 30-50% van de totale hoeveelheid sediment.

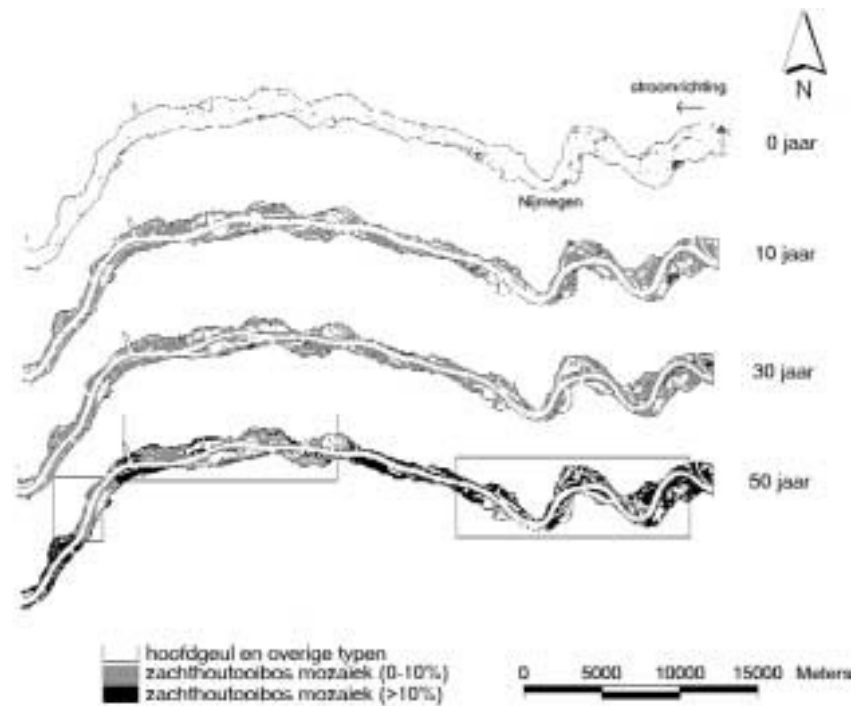
### Zachthoutooibosontwikkeling

De modelsimulaties laten zien hoe snel de uiterwaardvegetatie zich ontwikkelt naar mozaïeken van zachthoutooibos met ruigtes en soortenrijk grasland. Figuur 3 toont de bedekking van zachthoutooibos na 0, 10, 30 en 50 jaar. Vanaf 10 jaar na de maatregelen bestaan de uiterwaarden voornamelijk uit een mozaïek van zachthoutooibos met een bedekking van minder dan 10%. Na 30 jaar neemt de bedekking toe naar 10- 25%. Gebieden met een hogere

Implementatie (na n jaar)	Verwijderd sediment volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Verwijderd ooibos (ha met 100% bedekking)	Totaal oppervlakte verjongde uiterwaard (ha)
10	5	100	530
25	5	30	230
35	12	230	1230

**Tabel 4** Verwijderd sediment volume, verwijderd oppervlakte zachthoutooibos en totaal oppervlakte verjongde uiterwaard in de Waal. De oppervlakte verwijderd ooibos is omgerekend naar hectare ooibos met 100% bedekking (naar Duel *et al.*, 2001).

**Table 4** Removed sediment volume, removed area of softwood forest and total rejuvenated area for the Waal River. The area of removed softwood forest is converted to hectares of 100% forest cover (after Duel *et al.*, 2001).



**Figuur 3** Bedekkingspercentage zachthoutooibos, respectievelijk 0, 10, 30 en 50 jaar na initiële hoogwatermaatregelen. De kaders geven de gebieden aan waarin cyclische verjonging is toegepast. Naar Baptist *et al.* (in press).

**Figure 3** Floodplain forest cover, respectively 0, 10, 30 and 50 years after initial flood protection measures. Boxed areas indicate where cyclic floodplain rejuvenation was applied. After Baptist *et al.* (in press).

**Tabel 5** Vegetatieontwikkeling in stappen van 10 jaar (naar *Duel et al.*, 2001), vergeleken met de ecologische referentie volgens *Postma et al.* (1995) en *Pedroli et al.* (1996).

**Table 5** Vegetation development in steps of 10 years for the Waal River (after *Duel et al.*, 2001), compared to the historical reference after *Postma et al.* (1995) and *Pedroli et al.* (1996).

Vegetatietype	ecologische referentie (ha)	vegetatie ontwikkeling (ha)				
		10 j	20 j	30 j	40 j	50 j
oobos	> 1250	1000	1000	1100	1600	1800
moerasvegetatie	> 300	<100	<100	<100	<100	<100
droge graslanden	> 100	3100	3900	3600	3100	3200
natte graslanden	>1000	1400	1300	1200	1200	1100
droge ruigtes	> 150	400	400	500	400	500
natte ruigtes	> 500	300	200	300	200	200

dichtheid aan oobos zijn relatief schaars en ontwikkelen zich lokaal langs de rivier en langs nevengeulen.

Iedere keer wanneer cyclische verjonging is toegepast in een bepaald gebied start de successie opnieuw vanaf pioniervegetatie. In Figuur 3 zijn de gebieden waarin cyclische verjonging is toegepast omkaderd. Het effect van cyclische verjonging is zichtbaar aan het bedekkingspercentage in deze gebieden. Gerekend over de totale periode van 50 jaar neemt de oppervlakte oobos toe, ondanks de ingrepen van cyclische verjonging. Tabel 5 toont de uitvoer van het vegetatiemodel als een verdeling van vegetatietypen in stappen van 10 jaar, vergeleken met het streefbeeld volgens *Postma et al.* (1995) en *Pedroli et al.*, (1996). Hieruit blijkt dat er bij cyclische verjonging een diverse uiterwaardnatuur ontstaat, die grotendeels voldoet aan de streefwaarden. Moerasvegetatie en natte ruigtes komen echter onvoldoende tot ontwikkeling.

## Discussie

### Frequentie en omvang van cyclische verjonging

De studie laat zien dat grote oppervlakten natuur in de uiterwaarden herhaaldelijk moeten worden verjongd om de hoogwaterveiligheid te garanderen. De modelsimulaties laten zien dat de strategie van cyclische verjonging het best kan worden toegepast in riviertrajecten waar de waterstand minimaal 20 cm mag stijgen door vegetatieont-

wikkeling en sedimentatie alvorens de maatgevende waterstand wordt overschreden. Dit is wenselijk omdat dan de verjongingsfrequentie kan worden beperkt en er enige tijd een ongestoorde vegetatiesuccessie toelaatbaar is. Niet noodzakelijkerwijs wordt cyclische verjonging iedere keer toegepast op dezelfde plaats. De strategie kan zodanig worden toegepast dat bijvoorbeeld een oobos behouden kan worden door een nevengeul op de andere oever uit te graven. Het is echter wel zo dat ingrijpen op bepaalde plaatsen, bijvoorbeeld in het stroomvoerende deel van een uiterwaard, meer effect heeft dan ingrijpen op andere plaatsen, bijvoorbeeld in een stroomluwte.

Hoewel cyclische verjonging in deze modelstudie in de eerste plaats is toegepast als veiligheidsstrategie, blijkt het de diversiteit aan vegetatietypen in de uiterwaarden te vergroten. Bij cyclische verjonging als natuurbeheerstrategie zullen wellicht andere keuzes gemaakt worden. Wij menen dat in de praktijk een synergie tussen beide bereikt kan worden.

Het bleek dat cyclische verjonging na 25 en 35 jaar moest worden toegepast op 15% van de totale oppervlakte aan uiterwaarden van het studiegebied. Na 50 jaar ontwikkeling blijven de waterstanden dan nog grotendeels onder het referentieniveau. De verhoging van de waterstanden door sedimentatie en vegetatieontwikkeling is na 50 jaar minder groot, zodat het mogelijk lijkt door cyclische verjonging met een herhalingstijd van 25 tot 35 jaar in een





gebied van ongeveer 15% van de uiterwaarden van de Waal de hoogwaterstanden duurzaam te beheersen. Een uitzondering vormden de uiterwaarden bovenstrooms van Nijmegen, waar iedere 10 tot 15 jaar maatregelen noodzakelijk zijn. Hier is cyclische verjonging nu niet de meest geschikte strategie en zal eerst gezocht moeten worden naar verbreding van het rivierbed ter hoogte van de flesenhals bij Nijmegen (Van Alphen, 2002).

Een cyclische verjonging van 15% van de uiterwaarden in 25 tot 35 jaar tijd komt overeen met wat bekend is uit historische reconstructies van natuurlijke verjonging in de Midden-Waal. In de periode tussen 1780 - 1830 was slechts een klein gedeelte van de uiterwaarden langs de Midden-Waal bedijkt. Deze onbedijkte uiterwaarden kenden in deze periode een gemiddelde verjonging van 0,4% per jaar (Wolfert, 2001). Dit is omgerekend 10% in 25 jaar, of 14% in 35 jaar. De oppervlakte waarover cyclische verjonging als beheersstrategie moet worden uitgevoerd past derhalve goed bij de historische natuurlijke referentie voor de Waal.

## Modelonzekerheden

De resultaten van het waterbewegingsmodel zijn gebaseerd op een gekalibreerd SOBEK-model voor het doorrekenen van maatgevende hoogwaters. Verschillende gevoeligheids- en onzekerheidsanalyses zijn uitgevoerd met dit model (Silva *et al.*, 2000). Desalniettemin moeten de resultaten met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden. Bij modelleren ligt de nadruk op vereenvoudiging van complexe, natuurlijke processen. Kennislacunes vergroten de modelonzekerheid bovendien. De kennismodellen voor vegetatie-ontwikkeling en sedimentatie zijn gebaseerd op de huidige ervaringskennis over natuurterreinen in uiterwaarden, maar er blijft een grote onzekerheid bestaan over hun uitkomsten, omdat uiterwaardverlaging in de praktijk nog slechts zelden is toege-

past. Het beste voorbeeld is de Plaat bij Ewijk die in 1988 deels is afgegraven. Na de hoogwaters van 1993 en 1995 werd er beide keren een hoeveelheid sediment van circa 220.000 m<sup>3</sup> afgezet met een gemiddelde dikte van 10 tot 20 cm (Sorber, 1997). Lokaal werden er zandafzettingen van meer dan 50 cm dikte aangetroffen (Schoor, 1999). Deze getallen zijn in overeenstemming met de modelresultaten. De Plaat bij Ewijk liet ook een snelle groei van wilgen zien, zodanig dat na 20 jaar een dicht zachthoutooibos was ontstaan op het zuidelijke deel van de plaat (De Heij, 2001). Dit is ook in overeenstemming met de modelresultaten. Desalniettemin zijn verdere studies naar de hydraulische weerstand van vegetatie, snelheden van vegetatiesuccessie en de interacties tussen vegetatie en sedimenttransport noodzakelijk om de natuurlijke ontwikkeling van uiterwaarden en hiermee samenhangend de hoogwaterstanden beter te kunnen voorspellen.

## Cyclische verjonging in de praktijk

De studie betrof een verkenning van cyclische verjonging als hoogwater- en natuurbeheerstrategie. De resultaten zijn hoopgevend; cyclische verjonging lijkt het mogelijk te maken in gereguleerde riviersystemen zowel natuur- als veiligheidsdoelen in voldoende mate te bereiken. Verdere verkenning en onderbouwing is echter gewenst, waarbij nog vele aspecten onderzocht zullen moeten worden. Niet alleen technische zaken, maar zeker ook economische, juridische en belevingsaspecten moeten worden belicht. Cyclische verjonging brengt overlast met zich mee doordat herhaaldelijk kranen en bulldozers de uiterwaarden vergraven en het brengt ook kosten met zich mee die moeten opwegen tegen de voordelen. Verdere studie en discussies zullen moeten uitwijzen of het uiterwaardlandschap gebaat is bij cyclische verjonging.



## Conclusies

Tot 2015 zullen diverse rivierverruimende projecten uitgevoerd worden langs de grote rivieren in Nederland. Deze studie heeft laten zien dat er rekening gehouden moet worden met een stijging van de maatgevende waterstanden als gevolg van een toename van de hydraulische weerstand door vegetatieontwikkeling en als gevolg van de versnelde sedimentatie van zand en slib. Zonder aanvullende maatregelen is het noodzakelijk om regelmatig de oobosontwikkeling terug te zetten en geaccumuleerd sediment te verwijderen. De hoogwater- en natuurbeheerstrategie van cyclische verjonging kan de veiligheid tegen overstromen langs de Waal waarborgen wanneer 15% van

de totale oppervlakte aan uiterwaarden wordt verjongd met een herhalingsperiode van 25 tot 35 jaar. Door cyclische verjonging kan een diverse uiterwaardnatuur ontstaan die grotendeels voldoet aan het op de historische referentie gebaseerde streefbeeld voor de Waal.

## Dankwoord

De studie maakte onderdeel uit van het door INTERREG IIC gefinancierde IRMA-SPONGE-onderzoeksprogramma van de Europese Unie en van Delft Cluster (project 03.03.03). De studie ontving aanvullende financiering van Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland.

## Summary

### Cyclic floodplain rejuvenation: modelling a strategy for flood and nature management

Martin Baptist, Toine Smits, Harm Duel, Guda van der Lee, Gertjan Geerling, Ellis Penning en Jos van Alphen

Flood safety, vegetation succession, sedimentation, river rehabilitation

Landschap 21 (2004)

To reduce flood risks in the Netherlands, measures to increase the flood conveyance capacity of the Rhine River will be implemented. These measures will provide more room for the river and include the lowering of the floodplains and the excavation of secondary channels. Moreover, these measures provide opportunities for ecological rehabilitation of the floodplains. It is expected that floodplain sedimentation and softwood forest development in rehabilitated floodplains will gradually reduce the conveyance capacity and the biodiversity. Therefore,

a floodplain management strategy was proposed that would meet both flood protection and nature rehabilitation objectives. This strategy, Cyclic Floodplain Rejuvenation (CFR), aims at mimicking the effects of channel migration by lowering floodplains, by (re)constructing secondary channels, or by removing softwood forests. In this study, the effects of CFR measures on reducing flood levels and enhancing biodiversity along the Waal River were assessed. A one-dimensional hydraulic model was applied together with rule-based models for vegetation succession and floodplain sedimentation. The simulations demonstrated that the flood management strategy of Cyclic Floodplain Rejuvenation is able to sustain safe flood levels in the Waal River when about 15% of the total floodplain area is rejuvenated with a return period of 25 to 35 years. The rejuvenation strategy can lead to a diverse floodplain vegetation that largely complies with the historical reference for the Waal River. Cyclic Floodplain Rejuvenation may be the appropriate answer to solve the dilemma between flood protection and nature rehabilitation in highly regulated rivers.

---

## Literatuur

- Asselman, N.E.M. & M. van Wijngaarden, 2002.** Development and application of a 1D floodplain sedimentation model for the River Rhine in The Netherlands. *Journal of Hydrology* 268: 127-142.
- Asselman, N.E.M. & H. Middelkoop, 1998.** Temporal variability of contemporary floodplain sedimentation in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands. *Earth Surf.Process.Landforms*, 23: 595-609.
- Asselman, N.E.M., 2001.** Sediment processes in floodplains. Delft, WL | Delft Hydraulics. IRMA-CFR project report 8.
- Baptist, M.J., W.E. Penning, H. Duel, A.J.M. Smits, G.W. Geerting, G.E.M. van der Lee & J.S.L. van Alphen, in press.** Assessment of Cyclic Floodplain Rejuvenation on Flood Levels and Biodiversity in the Rhine River. *River Research and Applications*, special issue IRMA-projects.
- De Heij, L., 2001.** Ewijkse Plaat; Ontwikkeling van vegetatiestructuur en hydraulische ruwheid (1989-2000). Nijmegen, Universiteit Nijmegen, verslagen Milieukunde no. 202.
- Dister, E., 1980.** Geobotanische Untersuchungen in der Hessischen Rheinaue als Grundlage für die Naturschutzarbeit. PhD dissertation, Gottingen.
- Douben, N., H.E.J. Simons, M. ten Harkel, 2002.** Dynamisch rivierbeheer. Lelystad, RIZA rapport 2002.004.
- Duel, H. & C. Kwakernaak, 1992.** Rivierdynamiek in uiterwaarden; Ecologische perspectieven en consequenties voor de rivierafvoer. *Landschap* 9, 4: 255-270.
- Duel, H., M.J. Baptist & W.E. Penning, 2001.** Cyclic Floodplain Rejuvenation: a new strategy based on floodplain measures for both flood risk management and enhancement of the biodiversity of the river Rhine. NCR publication 14-2001. Delft, the Netherlands.
- Cornelissen, P. & J.T. Vulink, 2001.** Effects of cattle and horses on vegetation structure. In: Gerhen, B. & M. Görner (Eds.). *Landscape Development with Large Herbivores; New Models and Practical Experiences*. *Proceedings Natur- und Kulturlandschaft* 4, Höxter/Jena, Germany.
- Hughes, F.M.R., 1997.** Floodplain biogeomorphology. *Progress in Physical Geography*, 21, 4: 501-529.
- Hughes, F.M.R., W.M. Adams, E. Muller, C. Nilsson, K.S. Richards, N. Barsoum, H. Decamps, R. Foussadier, J. Girel, H. Guillo, A. Hayes, M. Johansson, L. Lambs, G. Pautou, J.-L. Peiry, M. Perrow, F. Vautier & M. Winfield, 2001.** The importance of different scale processes for the restoration of floodplain woodlands. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 17: 325-345.
- Hupp, C.R., 1992.** Riparian vegetation recovery patterns following stream channelization: a geomorphic perspective. *Ecology* 73: 1209-1226.
- Jongman, R., 1992.** Vegetation, river management and land use in the Dutch Rhine floodplains. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 7: 279-289.
- Middelkoop, H. & N.E.M. Asselman, 1998.** Spatial variability of floodplain sedimentation at the event scale in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands. *Earth Surf.Process.Landforms*, 23: 561-573.
- Ministerie LNV, 1990.** Natuurbeleidsplan; regeringsbeslissing. 's Gravenhage, SDU uitgeverij.
- Ministerie V&W, 2000.** Kabinetsstandpunt Ruimte voor de Rivier. Den Haag, Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Ministeries V&W en LNV, 2000.** Samenwerkingsafspraken Veiligheid & Natte natuur. Den Haag, Gemeenschappelijke uitgave van Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij.
- Mosselman, E., 2001.** Morphological development of side channels. Delft, WL | Delft Hydraulics. IRMA-CFR report 9.
- Nakamura, F., F.J. Swanson & S.M. Wondzell, 2000.** Disturbance regimes of stream and riparian ecosystems - a disturbance-cascade perspective. *Hydro. Process.*, 14: 2849-2860.
- Nikuradse, J., 1930.** Turbulente Strömung in nichtkreisförmigen Rohren, *Ing.-Arch.* 1, 306.
- Pautou, G., J.-L. Peiry, J. Girel, E. Blanchard, F. Hughes, K. Richards, T. Harris & A. El-Hames, 1997.** Space-time units in floodplains: the example of the Drac River upstream of Grenoble (French Alps). *Global Ecology and Biogeography Letters*, 6, Floodplain forests special issue: 311-319.
- Pedroli, G.B.M., R. Postma, M.J.J. Kerkhofs & J.G.M. Rademakers, 1996.** Welke natuur hoort er bij de rivier? naar een natuurstreefbeeld afgeleid van karakteristieke fenomenen van het rivierenlandschap. *Landschap*, 13: 97-111.
- Peters, B., 2002.** Successie van natuurlijke uiterwaardlandschappen. Nijmegen, Katholieke Universiteit Nijmegen, Leerstoel Natuurbeheer Stroomgebieden & Bureau Drift.
- Piégay, H., 1997.** Interactions between floodplain forests and over-bank flows: data from three piedmont rivers of southeastern France. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 6, Floodplain forests special issue: 187-196.

- Postma, R., M.J.J. Kerkhofs, G.B.M. Pedroli & J.G.M. Rademakers, 1995.** Een stroom natuur. Natuurstreefbeeld voor Rijn en Maas. Arnhem, RIZA, nota 95.060.
- Raat, A., 2001.** Ecological rehabilitation of the Dutch part of the River Rhine with special attention to fish. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 17: 131-144.
- Salo, J., R. Kalliola, I. Häkkinen, Y. Mäkinen, P. Niemelä, M. Puhakka & P. D. Coley, 1986.** River dynamics and the diversity of the Amazon lowland forest. *Nature*, 322: 254-258.
- Schielen, R.M.J., C.A. Bons, P.J.A. Gijssbers & W.C. Knol (Eds.), 2001.** DSS Large Rivers; Interactive Flood Management and Landscape planning in River Systems. Delft, NCR-publication 13-2001.
- Schoor, M., 1999.** De netto sedimentatie op de Ewijkse Plaat, berekend met de krigingmethode. Arnhem, Riza werkdoc. 99.118x.
- Shields, F.D.J., S.S. Knight & C.M. Cooper, 2000.** Cyclic perturbation of lowland river channels and ecological response. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 16: 307-325.
- Silva, W., F. Klijn & J. Dijkman, 2000.** Ruimte voor de Rijntakken; Wat het onderzoek ons heeft geleerd. Delft, WL | Delft Hydraulics & Arnhem, RIZA. WL rapport R3294, RIZA rapport 2000.026.
- Simons, J.H.E.J., C. Bakker, M.H.I. Schropp, L.H. Jans, F.R. Kok & R.E. Grift, 2001.** Man-made secondary channels along the river Rhine (the Netherlands); results of post-project monitoring. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 17: 473-491.
- Smits, A.J.M., H. Havinga & E.C.L. Marteijn, 2000.** New concepts in river and water management in the Rhine River basin: how to live with the unexpected? In: A. J. M. Smits, P. H. Nienhuis and R. S. E. W. Leuven (Eds.), *New Approaches to River Management*. Leiden, Backhuys Publishers: 267-286.
- SOBEK, 2002.** SOBEK User Manual. Delft, WL | Delft Hydraulics report R3294.
- Sorber, A.M., 1997.** Oeversedimentatie tijdens de hoogwaters van 1993/1994 en 1995. Arnhem, Riza rapport 97.015
- Tockner, K., F. Malard & J. V. Ward, 2000.** An extension of the flood pulse concept. *Hydrol. Process.*, 14: 2861-2883.
- Van Alphen, J.S.L.J., 2002.** How to eliminate a hydraulic bottleneck: Nijmegen, the first example in the Netherlands. In: Wu *et al.* (eds.): *Flood Defence 2002*: 651-658. Beijing, China.
- Van der Lee, G.E.M., M.J. Baptist, M. Ververs & G. Geerling, 2001a.** Application of the cyclic floodplain rejuvenation strategy to the Waal river. Delft, Nijmegen, WL | Delft Hydraulics, Delft University of Technology, University Nijmegen. IRMA-CFR report 15.
- Van der Lee, G.E.M., H. Duel, W.E. Penning & B. Peters, 2001b.** Modelling of vegetation succession in floodplains. Delft, WL | Delft Hydraulics, Nijmegen, University of Nijmegen, IRMA-CFR report 7.
- Van der Molen, D.T., A.D. Buijse, M. Platteeuw, N. Geilen & F. Klijn, 2002.** Over de dijken? Natte natuur in het rivierengebied. *Landschap* 19(2): 105-111.
- Van Splunder, I., 1998.** Floodplain forest recovery; softwood forest development in relation to hydrology, riverbank morphology and management. Nijmegen, University of Nijmegen, PhD thesis.
- Van Stokkom, H.T.C. & A.J.M. Smits, 2002.** Flood Defense in The Netherlands: A New Era, a New Approach. In: Wu *et al.* (eds.) *Flood Defence 2002*: 34-47. Beijing, China.
- Vera, F.M., 2000.** Grazing ecology and forest history. Strategic Policies Division, Ministry of Agriculture, The Hague, The Netherlands.
- Verwey, A., 2001.** Latest Developments in Floodplain Modelling - 1D/2D Integration. Keynote address B. In: Wallis *et al.* (eds.) *Sixth Conference on Hydraulics in Civil Engineering*: 13-24. Hobart, Tasmania, Australia.
- Ward, J.V., K. Tockner & F. Schiemer, 1999.** Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* 15: 125-139.
- Wolfert, H.P., 2001.** Geomorphological Change and River Rehabilitation; Case Studies on Lowland Fluvial Systems in the Netherlands. PhD-thesis, Alterra Scientific Contributions 6, Wageningen.