

DE ALLIER ALS MORFOLOGISCH VOORBEELD VOOR DE GRENSMAAS

DEEL II: OEVEREROSIE EN MEANDERMIGRATIE

Jurgen de Kramer ¹⁾, Antoine Wilbers ²⁾, Janrik van den Berg ²⁾ & Maarten Kleinhans ²⁾

¹⁾Dienst Landelijk Gebied Gelderland, Postbus 9079, 6800 ED Arnhem

²⁾Universiteit Utrecht, afdeling Fysische Geografie, Postbus 80115, 3508 TC Utrecht

Als voorbeeld voor natuurontwikkeling langs de Grensmaas wordt vaak de Allier gebruikt. De Allier is een grotendeels nog natuurlijke zand-grindrivier in Midden-Frankrijk die uitmondt in de Loire (figuur 1). Vooral de laatste 100 kilometer van de Allier (van Varennes-sur-Allier tot Nevers) vertoont ecologische en morfologische overeenkomsten met de Grensmaas in de situatie van enkele honderden jaren geleden, toen de invloed van de mens nog relatief bescheiden was.

Dit artikel is het tweede van een drietal artikelen waarin met name de morfologische processen in de Allier worden beschreven en vergeleken met die in de Grensmaas.

Het eerste artikel, gepubliceerd in het vorige nummer, behandelde de vraag in hoeverre beide rivieren morfologisch en hydrologisch met elkaar te vergelijken zijn (VAN DEN BERG *et al.*, 2000). In deze bijdrage wordt ingegaan op de wijze en snelheid van oevererosie en bochtverplaatsing.

Van bochtverplaatsing wordt gesproken als door oevererosie een bocht in de rivier groter wordt en/of in zijn geheel in stroomafwaartse richting beweegt.

Oevererosie greep vooral vroeger vaak diep in op het leven en de bestaansmogelijkheden van de bewoners langs de rivieren, zo ook langs de Allier. Een variant op onze uitdrukking "de één z'n dood is de ander z'n brood" van de 19e eeuwse bewoners langs de Allier was: "Celui-là perd tous ses droits d'alluvions, et sa propriété, confondue dans les sables et les grèves, va accroître celle de ses voisins" (BOUCHARDY *et al.*, 1991). Vrij vertaald betekent dit, dat degene van wie land en huis door erosie in de rivier verdwijnt, ervoor zorgt, dat er elders weer nieuw land van gevormd kan worden. Oevererosie is dan ook onlosmakelijk verbonden met de vorming van banken en de vorm van de rivier als geheel (figuur 2). Als een vrij meanderende rivier wordt vastgelegd, neemt het aantal banken af en wordt de dynamiek van bankvorming kleiner.



FIGUUR 1
Ligging van de Grensmaas en de Allier.

OEVEREROSIE EN RIVIERPATROON

In het eerste deel van deze serie artikelen werd al vermeld, dat ten zuiden (dus stroomopwaarts) van Moulins de Allier meandert en dat ten noorden van deze plaats het meanderende karakter geleidelijk overgaat in een meer vlechtend patroon. Niet alleen het rivierpatroon is anders, ook is er een groot verschil in de beweeglijkheid van de rivier. Door een ander stromingspatroon is de aard en snelheid van de oevererosie in beide delen verschillend. In het meanderende deel is de beweeglijkheid veel groter door een veel sneller proces van oevererosie. De hoofdstroming in de bochten is geconcentreerd in een smalle zone nabij de buitenbochttoever, waardoor hier de oever erodeert. In het deel met een vlechtend karakter wordt de afvoer daarentegen op de meeste plaatsen opgedeeld in verschillende min of meer gelijkwaardige, tamelijk rechte, stroomdraden, die van elkaar worden gescheiden door ondiep-



FIGUUR 2

Boom, die met kruin in stroomafwaartse richting wijst, op een grindvlakte in een binnenbocht. In de rivier zijn dood hout en een deel van het zand en grind afkomstig van aan erosie onderhevige oevers (foto: Jurgen de Kramer, 1999).

tes, banken of eilanden. Met elkaar zorgen zij voor een relatief brede geul. Waar de rivier zijn energie over de verschillende stroomdraden verdeelt, zal de erosieve kracht op de oevers dus relatief gering zijn. Daarnaast spelen bij de mate van erodeerbaarheid van oevers ook kenmerken van het materiaal waaruit de oever bestaat een rol. De weerstand tegen erosie van de oever is door het overwegend fijnere oevermateriaal in het deel met het vlechtende karakter van de Allier groter dan in het meanderende deel.

ALLIER MET VLECHTEND KARAKTER

In figuur 3 zijn twee voorbeelden gegeven van het rivierpatroon van de Allier in de huidige situatie en één voorbeeld van de Grensmaas in het begin van de 19e eeuw.

In het traject van de Allier met het vlechtende karakter ten noorden van Moulins (figuur 3a) komen veel stabiele, sterk begroeide, eilanden voor. Daarnaast komen ook veel niet of spaarzaam begroeide zand- en grindbanken voor, die soms snel van plaats kunnen wisselen. Vergelijk als voorbeeld figuur 4a met 4b. Deze banken kunnen zowel midden in de rivier als tegen eilanden of oevers liggen. De rivier als geheel, maar niet de afzon-

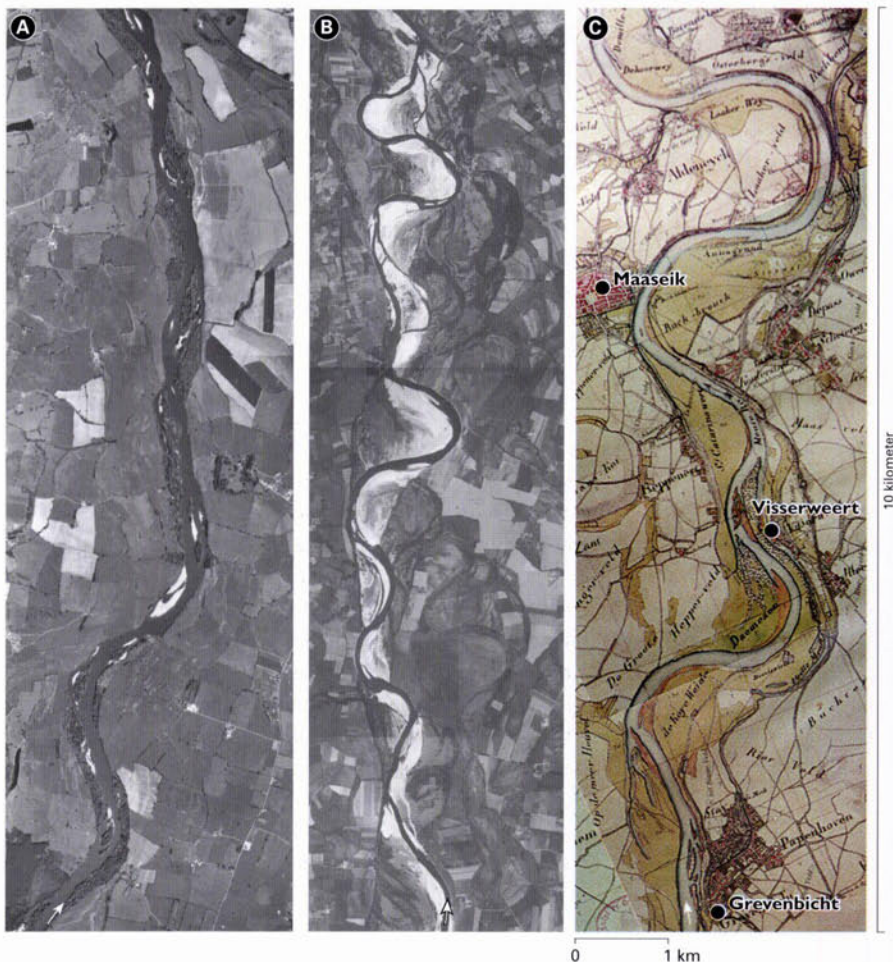
derlijke stroomdraden, kent een zeer stabiele ligging. Grote delen kennen een niet meetbare oevererosie, maar plaatselijk komen oevererosiesnelheden tot maximaal enkele meters per jaar voor. Door deze stabiele ligging en langdurige bodemvorming is de zone

met rivierbegeleidende, vaak zeer dichte, vegetatie relatief smal, en zijn de gronden tot vlak bij de oever geschikt voor landbouw. Door de chaotische aard van plaatselijke oevererosie wisselen erosie en aanwas elkaar snel, soms om het jaar, af. De aard van de aanwezige begroeiing heeft een belangrijke invloed. Vaak zijn de oevers van plaatsen die enige erosie kennen relatief licht begroeid.

MEANDERENDE ALLIER ...

Het meanderende deel van de Allier (figuur 3b) kent een brede zone van rivierbegeleidende vegetatie of in ieder geval een begroeiing waarin veel voor de rivier de Allier ken-

FIGUUR 3
Riviertrajecten in: a: deel met een vlechtend karakter (IGN, 1993); b: meanderend deel (IGN, 1960); c: Grensmaas tussen Grevenbicht tot even stroomafwaarts van Maaseik (B) in 1804/05 (TRANCHOT & VON MÜFFLING, 1803-1820).





FIGUUR 4
Grote bankdynamiek in de
vlechtende Allier, let ter oriëntatie op
het doodhout, a: 1996 en b: 1997
(foto's: Jurgen de Kramer).



merkende soorten voorkomen. De belangrijkste oorzaak is de verplaatsingssnelheid van de oever die hier veel groter is dan in het deel met het vlechtende karakter. In het meanderende deel kunnen erosiesnelheden tot circa 60 meter per jaar voorkomen. Het meanderende deel wordt gekenmerkt door de ontwikkeling van bochten en de vorming van veelal grote banken in de binnenbocht. Hier zijn, in tegenstelling tot het deel met het vlechtende karakter, de plaats en de snelheid van oevererosie en de vorming van banken min of meer verklaarbaar en soms zelfs voorspelbaar. Bochtverplaatsing wordt in een meanderende rivier vaak aangeduid als meandermigratie. De vorm van een meanderbocht wordt bepaald door de ontwikkeling van de actieve delen van de bocht zelf (waar de buitenbochtsoever het sterkst wordt geërodeerd) en door de ontwikkeling van beneden- en bovenstrooms ervan gelegen bochten. Plaatselijk zijn delen van oevers niet- of relatief moeilijk erodeerbaar door de aanwezigheid van oeververdediging, vast gesteente of oude afzettingen. Oude afzettingen van de rivier zijn meestal relatief moeilijk erodeerbaar omdat deze over het algemeen meer kleirijk materiaal bevatten. Daarnaast zijn deze door steeds voortgaande insnijding van de rivier relatief hoog komen te liggen. De

aanwezigheid van niet- of relatief moeilijk erodeerbare oevers vergroot de variatie in voorkomende bochtvormen. Ditzelfde gold voor de Grensmaas in het verleden.

... EN GRENSMAAS

Het deel van de Maas tussen Borgharen (even stroomafwaarts van Maastricht) en Linne (nabij Maasbracht), dat nu wordt aangeduid als Grensmaas, leek voordat de rivier in de 19e eeuw geheel door mensen was vastgelegd, op het meanderende deel van de Allier. Vooral wat betreft de vorm van de bochten, de plaats van oevererosie en de ligging van banken en nevengeulen. In figuur 3c is de situatie van rond 1804 tussen Grevenbicht tot even stroomafwaarts van Maaseik weergegeven. Nabij Maaseik is een tweetal grote, bijna cirkelvormige bochten te zien. Deze zijn ontstaan door een gelimiteerde bochtontwikkeling als gevolg van oeververdediging in de buitenbocht. De bochten bij Visserweert worden minder in de ontwikkeling gehin-

derd, waardoor het onbegroeide deel van de binnenbocht hier groter is. In de Allier zijn niet- of spaarzaam begroeide banken in de binnenbocht vaak groter door de overwegend hogere migratiesnelheid van de bochten. In de Grensmaas in de vroegere situatie waren erosiesnelheden in de buitenbocht maximaal circa 8 meter per jaar. De migratiesnelheden van de meanderbochten waren in de Grensmaas dus aanzienlijk kleiner dan in de Allier.

AAN OEVEREROSIE GERELATEERDE MORFOLOGIE

In het meanderende deel van de Allier en in de vroegere Grensmaas is buiten de oevers zelf een deel van de morfologie in de rivier te relateren aan oevererosie en de verplaatsing van meanderbochten. Dit in tegenstelling tot het deel met het vlechtende karakter van de Allier. Hier worden nieuwe banken niet gevormd met materiaal dat van oevererosie afkomstig is, maar met herbewerkt materiaal, afkomstig uit de bedding en geërodeerde banken.

POINTBARS EN SCROLLBARS

Het in figuur 3 b en c duidelijk aanwezige niet- of spaarzaam begroeide deel van de binnenbochten wordt meestal aangeduid met de Engelse term 'point bar'. De gestabiliseerde delen van de binnenbocht waar alleen nog maar fijn materiaal wordt afgezet en die een relatief hoge vegetatiedichtheid kennen,

worden tot de overstromingsvlakte gerekend. Figuur 5 laat een voorbeeld van een point bar zien in het meanderende deel van de Allier. Ter hoogte van het scherpste deel van de zich uitbouwende bocht ligt een sikkelvormige bank in de geul. Door ingenieurs wordt deze bank vaak ook een point bar genoemd. Wij, als riviermorphologen, houden ons aan de Engelse benaming 'scroll bar'. Scroll bars ontstaan als compensatie voor de bij oevererosie vrijkomende ruimte en vormen vaak een patroon van ruggen op de point bar. Deze ruggen worden ook wel kronkelwaardruggen genoemd. Een point bar is dus voor een belangrijk deel opgebouwd uit resten van scroll bars, naast sedimenten die later erover heen zijn afgezet. Point bars en scroll bars zijn elementen die in de Allier vrijwel alleen in het meanderende deel goed zijn

Het diepste deel ligt onder de buitenbocht-oever. Deze diepe delen worden 'pools' genoemd, de stroomop- en -afwaarts gelegen ondiepe delen 'riffles'. Riffles liggen op de overgang van twee meanderbochten en verbinden opeenvolgende scroll bars met elkaar. Over deze riffles komen bij lage afvoeren grotere stroomsnelheden voor dan in de pools. Bij een hoge afvoer is de situatie omgekeerd. Een individuele bocht bestaat uit een pool met aan weerszijden een riffle. Een samengestelde meanderbocht bestaat uit verschillende pools en riffles. De afstand tussen het midden van twee opeenvolgende pools is vrijwel constant. Dit komt omdat de (samengestelde) bocht niet op zichzelf staat, maar een samenhangend geheel vormt met stroomop- en -afwaarts gelegen bochten, waar ook verplaatsingen van pools en riffles plaatsvinden.



FIGUUR 5
Bocht in de meanderende Allier met een grote grindbank in de binnenbocht (point bar), een erosieve buitenbocht-oever, een sikkelvormige bank in de rivier (scroll bar) en een grote hoeveelheid dood hout. De rivier stroomt naar ons toe (foto: Jurgen de Kramer, 1996).

ontwikkeld. In de Allier zijn de point bars voor een groot deel niet of slechts licht begroeid. Dat geldt zeker voor de recent gevormde delen. In de Grensmaas waren de onbegroeide delen kleiner door de lagere oevererosiesnelheid.

POOLS EN RIFFLES

Tussen de scroll bar en de buitenbocht-oever is de rivierbedding, in vergelijking met delen stroomop- en -afwaarts, vaak relatief diep.



FIGUUR 6
Drooggevallen en versneden ondiepte (riffle) die schuin de geul oversteekt in de meanderende Allier (foto: Jurgen de Kramer, 1996).

bocht onder invloed staat van beperkte migratiemogelijkheden van bochten boven- of benedenstrooms. Het hoogste deel van de riffle wordt bij lage afvoeren versneden in een reeks kleine banken met daartussen relatief diepe en smalle geulen met snelstromend water (figuur 6). In de huidige Grensmaas, waar alle buitenbocht-oeveren zijn vastgelegd, komen weinig duidelijk zichtbare riffles voor. Hun ontstaan wordt beperkt door een geringe aanvoer van nieuw sediment.

RESTGEULEN

In ecologisch opzicht zijn restgeulen interessant. Restgeulen zijn verlaten delen van de rivierbedding, die nog maar beperkt in contact staan met de hoofdgeul (figuur 7). Het stilstaande water en begeleidende oevers vormen vaak de meest soortenrijke systemen. In de Allier zijn restgeulen de enige plaatsen waar veel waterplanten groeien. In de dichte aquatische en rivierbegeleidende vegetatie leven vele insecten, kikkers, vogels, reptielen en soms Beverratten. De restgeulen vormen een in ecologisch opzicht belangrijke schakel tussen de andere riviermilieus, namelijk het bos, de graslanden, de niet- of spaarzaam begroeide grindvlaktes en het stromende water (BOUCHARDY *et al.*, 1991).

Restgeulen zijn vooral in het meanderende deel te vinden. De verlaten geulen zijn vaak

Voor de Allier is de afstand tussen het midden van twee pools of twee riffles circa 570 tot 630 meter. Uit kaarten uit de eerste helft van de 19e eeuw blijkt, dat de afstand tussen twee pools in de Grensmaas groter was dan in de Allier, namelijk circa 750 tot 950 meter. In vergelijking met de Allier waren gelijkvormige bochten met een gelijk aantal pools en riffles in de Grensmaas dus groter. Bij vrije migratie van bochten waarvan de oever erodeerbaar is en de erosiebestendigheid van de buitenbocht-oever in de gehele bocht vrijwel gelijk is, zijn de riffles ondieptes in de geul die niet droogvallen. In het geval van bochten waarvan de oever voor een deel niet of relatief moeilijk erodeerbaar is, zijn de riffles meer geprononceerd. Dit geldt ook voor de riffles in bochten waarvan de oever wel erodeerbaar is, maar waar de



FIGUUR 7

Een ecologisch interessante restgeul in de meanderende Allier (foto: Jurgen de Kramer, 1999).

het resultaat van het inactief worden van (een deel van) een meanderbocht. Ook kunnen restgeulen gevormd worden in de binnenbocht als gevolg van een fase van uitbouw of verplaatsing van een bocht. De restgeul ligt dan achter de nieuw gevormde bank op de plaats waar de rivier oorspronkelijk lag, zie ook de restgeulen in de bochten bij Visserweert in de Grensmaas (figuur 3c). In het vlechtende deel zijn er meer geulen, onder andere achter eilanden langs, maar bij lage afvoeren blijven die vaak meestromen of vallen droog. Figuur 8 geeft een voorbeeld van een bij lage afvoeren droogstaande geul achter een smal en langgerekt eiland.

OEVERVORMEN EN -PROCESSEN

De helling van de wand van de oever kan variëren van verticaal tot flauw en van onbegroeid tot juist sterk begroeid, waarbij verschillende combinaties mogelijk zijn. Zo zijn steile oevers niet per definitie erosief. In het vlechtende deel van de Allier zijn veel steile en sterk begroeide oevers die geen significante erosie kennen en lijken te hebben gekend. Flauwe oevers komen in de Allier vooral voor in situaties waar sprake is van sedimentatie voor de oever.

De hoogte van de oever is in het deel met het vlechtende karakter gemiddeld bijna vier meter ten opzichte van de waterstand bij een zomerse afvoer. De meeste fluctuaties vallen in de range van 3,5 tot 4,5 meter. De fluctuaties zijn in het meanderende deel veel groter. Dit is een gevolg van voortgaande insnijding van de rivier in combinatie met het steeds weer omwerken van de afgezette sedimenten in de riviervlakte. Hierdoor zijn oevers gevormd in afzettingen van verschillende ouderdom en dus met een verschillende hoogte. Afzettingen van rond 1850 zijn gemiddeld circa 3,8 meter, van rond 1930 circa 3,0 meter en van rond 1970 circa 2,8 meter hoog. Nabij Moulins is een zeer steile en circa 12 meter hoge oever gevormd in een afzetting uit de laatste ijstijd. De hoogten van de oevers in de huidige Grensmaas vallen

voor het grootste deel in de range van 2,5 tot 4,5 meter. In de toekomst worden verschillende delen van oevers lager door de geplande afgravingen van weerden.

In figuur 9 is een voorbeeld te zien van een erosieve oever die in het meanderende deel van de Allier veel voorkomt. Ook in het deel met het vlechtende karakter komt deze oevervorm voor, maar de (vrijwel) stabiele en geheel begroeide oever zoals in figuur 10 is daar algemener.

TYPEN MASSABEWEGINGEN

De typen massabewegingen, het soort vegetatie en de lithologische opbouw van de oever bepalen, in onderling samenspel, in belangrijke mate de vorm van de oeverwand. Daarnaast spelen rivierkundige aspecten als de duur en grootte van de afgelopen hoge afvoer een rol.

ONBEGROEIDE OEVERWANDEN

In erosieve oevers die uit niet-cohesief (los) materiaal als zand en grind bestaan zoals in figuur 9 is directe opname van materiaal in de stroming belangrijk. Hierdoor wordt de bovenkant van de oeverwand, die over het algemeen uit cohesiever materiaal, als klei en silt, bestaat en waar talrijke plantenwortels in aanwezig zijn, ondergraven. Als het ondergraven blok instabiel is geworden, rolt of schuift het over de oeverwand naar beneden



FIGUUR 8

Droogstaande geul achter een eiland in de vlechtende Allier. De kijkrichting is stroomopwaarts (foto: Jurgen de Kramer, 1996).

(figuur 9). Deze bewegingen waarbij eerst een soort hefboom wordt gevormd, worden aangeduid als 'cantilever massabewegingen' (THORNE & TOVEY, 1981). Het type oever zoals in figuur 9 komt ook voor in de vorm waarbij sprake is van een tot ruim twee meter dik pakket cohesief materiaal bovenop een niet-cohesieve laag waarin ondergraving plaatsvindt. Overigens hoeft deze cohesieve laag niet alleen uit silt- en kleirijk materiaal te bestaan. Zo is een dergelijke laag vaak voor een groot deel uit zand en grind opgebouwd. Silt- en kleirijk materiaal zorgen echter wel, naast een stevige pakking van het grind, voor de cohesie. Naast cantilever massabewegingen komen in dergelijke oevers ook massabewegingen voor waarbij platen van de oeverwand in de rivier vallen zonder dat eerst een duidelijk overhangend deel is gevormd. Voldoende erosie van dergelijke

FIGUUR 9
Erosieve oever in
overwegend niet-cohesief
materiaal waarbij
ondergraven blokken over
de oeverwand schuiven
(foto: Jurgen de Kramer,
1998).



FIGUUR 10
Met bomen begroeide
stabiele oevers van de
Allier (foto: Jurgen de
Kramer, 1995).



oevers kan voor een hoge en steile wand zorgen. Waar langs de Allier nesten van Oeverwaluwen voorkomen, zijn dat dergelijke steilwanden. Zonder een jaarlijkse 'verversing' van het erosievlak door achteruitgang van de oever wordt zo'n oever voor de Oeverwaluwen minder interessant. In de toekomstige Grensmaas gaan de plaatsen waar enige rivierdynamiek wordt toegelaten juist vaak gepaard met een verlaging van de weerden, waarbij de gehele of een deel van de cohesieve bovenlaag verdwijnt. Hierdoor worden dergelijke plaatsen weinig interessant voor de aan oevererosie gebonden Oeverwaluw.

BEGROEIDE OEVERWANDEN

Directe opname van materiaal komt ook

voor bij sterk begroeide oevers, zowel in het meanderende deel, als in het deel met een vlechtend karakter. Wortels van bomen en struiken worden langzaam uitgespoeld, waardoor de bomen en struiken voorover in de rivier vallen. In de oeverwand in figuur 11 komen sporen van massabewegingen voor waar een instabiel geworden blok oeverwand over enige afstand is verplaatst over een recht glijvlak dat diep en niet parallel aan de oeverwand ligt. De reden dat in dit soort geheel begroeide oevers die een verwaarloosbare erosiesnelheid kennen toch massabewegingen voorkomen, is vaak een (tijdelijk) relatief grote diepte van de geul nabij de oever. Nabij de oever in figuur 11 is de diepte bijna twee meter. Let bij dit voorbeeld ook op de afwijkende begroeiing op de plaats

waar de oever onderuit is gezakt. Bovenaan de oever kwamen verticale scheuren voor, die een nadelige invloed op de stabiliteit van het blok kunnen hebben gehad. Nu is er op de plaats van deze scheuren nog vaag een verticaal wandje bovenaan de oever te zien. In dit geval en in veel andere gevallen wordt het massabewegingsblok samengehouden door de wortels van een boom die op dat blok staat. De oeverwand kan ook bestaan uit een groot aantal verschillende massabewegingsblokken, vaak te herkennen aan bomen en struiken die schots en scheef op de oeverwand staan. Deze diepe massabewegingen komen vooral veel voor in het deel met het vlechtende karakter. Op plaatsen in het deel met het vlechtende karakter waar de oever overwegend uit cohesief materiaal bestaat, komen, net als in het meanderende deel, ook massabewegingen voor, waarbij verticale platen voorover in de rivier vallen.

GRENSMAASOEVERS

In de huidige Grensmaas komen alle hierboven beschreven oevervormen ook voor. De oever met een schuine helling en een onder-



FIGUUR 11

Resultaat van een massabeweging met een diepliggend glijvlak waarbij de boom, rechtopstaand, tot onderaan de oever is geschoven (foto: Jurgen de Kramer, 1996).

graven toplaag komt vooral veel voor in de onverdedigde binnenbocht, waar de meeste erosie plaatsvindt. Hier zijn, anders dan veelal gebruikelijk is in een meer natuurlijke rivier, de erosiesnelheden het hoogst. Op veel plaatsen, ook waar de oevers verdedigd zijn, komen blokken oever voor, die over een diepliggend recht of gekromd glijvlak zijn scheefgesteld. Maar meestal niet zoals in het voorbeeld van figuur 11 met bomen erop, omdat bomen langs de oeverrand van de Grensmaas schaars zijn.

PARAMETERS VOOR OEVEREROSIESNELHEID

Belangrijke parameters voor de mate van oevererosie zijn in het algemeen het dal- en riviervhang, de geologische ondergrond, het debiet, de soort en dichtheid van de vegetatie, het voor fluviale processen beschikbare materiaal, de erosiebestendigheid van het oevermateriaal en de eigenschappen van de vorm van de bochten inclusief de mate van bochtkromming. In het meanderende deel van de Allier kan een belangrijk deel van de plaats en snelheid van oevererosie van de (vrijwel) vrij migrerende bochten worden begrepen aan de hand van de relatie tussen de mate van bochtkromming en de maximale erosiesnelheid van de oever in een bocht. Daarmee is zeker niet gezegd, dat de andere parameters geen invloed hebben. Zo wordt plaatselijk de snelheid van erosie vergroot door de afwezigheid van vegetatie of gelimiteerd door de aanwezigheid van vast gesteente in de oever. Daarnaast kan de richting

waarin een bocht zich ontwikkelt voor een belangrijk deel gedictieerd worden door de aanwezigheid van een geologische breuk.

BOCHTKROMMING ALS EROSIEPARAMETER

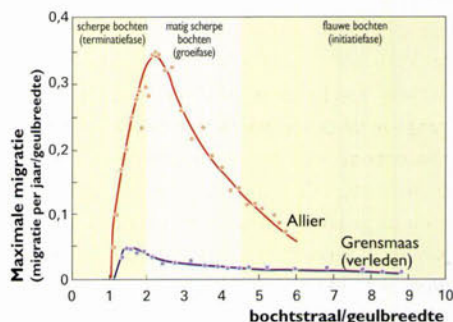
De relatie tussen de snelheid van oevererosie en de mate van bochtkromming is gebaseerd op de interactie tussen de morfologie van de geul en die van de binnenbocht, de stromingsruwheid van het beddingmateriaal en het stromingspatroon. Het resultaat is een hoofdstroming die in een bocht een spiraalvormige beweging maakt, waarbij de stroming nabij de bedding in de richting van de binnenbocht is. Deze beweging is het meest duidelijk in de pool ontwikkeld. Nabij de buitenbochttoever is de stroming in het algemeen naar beneden gericht, hetgeen de erosie bevordert. Bovendien concentreert de stroming zich in het meest gekromde deel van de meanderbocht langs de buitenbocht, waardoor hier de door de stroming opgewekte sleepkracht aan de bodem en buitenbochttoever oploopt (SHUKRY, 1950; IPPEN *et al.*, 1962; FRANCIS & ASFARI, 1971). Dit verklaart niet alleen dat de erosie van de buitenbocht daar meestal het sterkst is, maar ook het optreden van de pool op die plaats. De sleepkracht is niet in alle gevallen het grootst nabij de buitenbochttoever. Bij hele scherpe bochten ligt de zone met de grootste sleepkracht nabij de binnenbocht (CHOUDHARDY & NARASIMHAN, 1977). Hier is de erosie van de buitenbochttoever dan ook klein.

OEVEREROSIESNELHEID EN BOCHTONTWIKKELING

Uit onderzoek in Canada door Edward

Hickin en Gerald Nanson (HICKIN, 1977; NANSON & HICKIN, 1983; HICKIN & NANSON, 1984) blijkt zowel de evolutie van een individuele bocht van zwak gekromd naar scherp, als die van grote samengestelde bochten, gerelateerd te zijn aan veranderingen in bochtkromming. Dit valt ook op te maken bij vergelijking van kaarten en luchtfoto's van verschillende jaren. In een meanderbocht variëren de oevererosiesnelheden van plaats tot plaats sterk, waardoor de bocht in een bepaalde richting beweegt. Dat deze migratie van bochten niet in alle richtingen gelijk is, valt ook af te leiden uit de spitse vorm van point bars. De spitse vorm is niet alleen het gevolg van erosie door boven- en benedenstrooms gelegen bochten, maar wordt vooral veroorzaakt door de grotere erosiesnelheden in het scherpste deel van de bocht.

De mate van bochtkromming komt tot uitdrukking in de bochtstraal van het sterkst gekromde deel van de bocht. Om de relatie tussen de bochtstraal en de migratiesnelheid van verschillende rivieren goed met elkaar te kunnen vergelijken, zijn de waarden dimensieloos gemaakt door ze te delen door de breedte van de rivier. HICKIN (1977) onderscheidt drie fasen van bochtontwikkeling op grond van de grootte van de bochtstraal en de migratiesnelheid, zie figuur 12. Flauwe bochten, met een grote bochtstraal en dus rechts in de grafiek, hebben een lage migratiesnelheid. Bij het onvermijdelijk scherper



FIGUUR 12

Relatie tussen de maximale oevererosiesnelheid per jaar en de mate van bochtkromming voor de Allier en de Grensmaas. De snelheid en de bochtstraal zijn gedeeld door de breedte van de rivier om een vergelijking mogelijk te maken.

worden van de bocht, naar links in de grafiek gaand, neemt de migratiesnelheid toe. Op een gegeven moment is de bocht zo scherp geworden, dat de stroming de bocht niet goed meer kan volgen, waardoor de zone met de grootste sleepkracht in de richting van de binnenbocht verschuift. Er ontstaat dan een instabiel stromingspatroon met veel wervels, waarin veel stromingsenergie verloren gaat. Daardoor is een groot deel van de stromingsenergie niet meer beschikbaar voor oevererosie. De migratiesnelheid van zeer scherpe bochten neemt hierdoor snel af. De flanken van een dergelijke inactief geworden bocht vormen weer de uitgangssituatie voor een nieuwe generatie bochten. Het resultaat is dat een enkelvoudige bocht een samengestelde bocht is geworden, die uit verschillende zich actief ontwikkelende bochten bestaat. Of het resultaat is dat een reeds samengestelde bocht groter is geworden. Een samengestelde bocht bevat in tegen-

stelling tot een enkelvoudige bocht meer dan één pool en één riffle. Een samengestelde bocht is ook altijd groter dan een enkelvoudige.

De gegevens in figuur 12 zijn gemiddelde waarden van de migratiesnelheden voor bochtsituaties in de Allier in de periode van 1946 tot 1996 en voor situaties in de Grensmaas in vooral de 18e en 19e eeuw. De migratie van bochten is beschreven door gebruik te maken van de mate van kromming van de binnenbocht, waar de actieve scroll bar is gelegen. Bochten kunnen worden geclassificeerd in flauw, matig scherp of scherp. Globaal is de vorm van de grafiek voor de Allier en de Grensmaas gelijk. Ook de bochtstraal waarbij de grootste migratiesnelheden voorkomen, en de bochtstraal waarbij geen migratie meer plaatsvindt zijn vrijwel gelijk. De maximale erosiesnelheden zijn echter in de Allier vooral bij de bochten in de groeifase aanzienlijk groter dan die in de Grensmaas. Opvallend is ook de snelle toename van de migratiesnelheid met het scherper worden van de bocht in de groeifase, het deel van de grafiek aan de rechterzijde van de top. De grafiek heeft hier de vorm van een machtsfunctie waarvan de macht voor de Allier en de Grensmaas vergelijkbaar is. Voor de Allier en de Grensmaas is de macht gelijk aan circa -1,37 respectievelijk circa -1,31. De vorm van de grafiek komt dus meer overeen dan op het eerste gezicht lijkt.

een denkbeeldig punt op de bocht-as. Dit punt ligt op een afstand vanaf de buitenbocht-oever, die gelijk is aan de breedte van de rivier en de straal van de bocht, zie de definitieschets (figuur 13b). Hoeken stroomafwaarts van de bocht-as worden als positief beschouwd. Uit de grafiek blijkt dat flauwe bochten vooral stroomopwaarts van, en rond de bocht-as de grootste erosiesnelheden kennen. Met het scherper worden van de bochten vindt een stroomafwaartse verschuiving plaats van de zone waar de erosie maximaal is. Bij scherpe bochten komt meestal zelfs de bovenstroomse grens, en daarmee het gehele gebied met de maximale erosie, stroomafwaarts van de bocht-as te liggen. Bij de situatie van de Grensmaas in het verleden is een hiermee goed vergelijkbaar beeld gevonden. De reden dat de zone stroomafwaarts komt te liggen is de volgende. Aan het begin van de bocht is de waterspiegel horizontaal. In de bocht zelf wordt door de scherpe kromming water tegen de buitenbochttoever opgestuwd, waardoor een dwarsverhang in de waterspiegel ontstaat. Hierdoor wordt daar de sleepkracht aan de bedding en oever vergroot. Door een naijlingseffect is die niet het grootst rond de bocht-as, maar in de tweede helft van de bocht. Hier is in de binnenbocht door dezelfde oorzaak de sleepkracht juist kleiner, waardoor sedimentatie en uitbouw van de binnenbocht plaatsvindt (NEDECO, 1959).

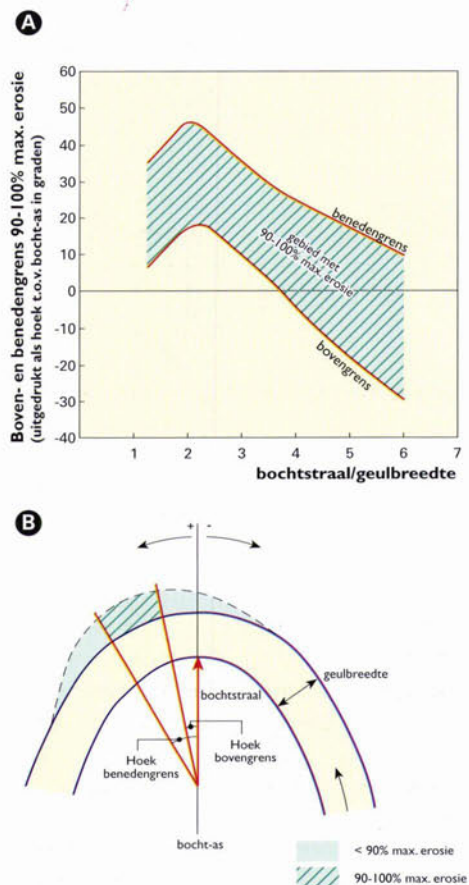
Met het scherper worden van de bochten vindt er naast een verandering in de plaats van de oevererosie, ook een verandering van de lengte van de zone met de meeste buitenbochterosie plaats. Is de lengte waar 90 tot 100 procent van de maximale oevererosie plaatsvindt voor flauwe bochten in de Allier circa 180 tot 600 meter, voor matig scherpe en scherpe bochten is die circa 60 tot 270 meter.

PLAATS EN LENGTE VAN ZONE MET MEESTE EROSIE

De bochtstraal bepaalt niet alleen de snelheid maar ook de plaats waar de erosie van de buitenbochttoever het grootst is (CHEN & SHEN, 1983). Hier is gekozen om deze plaats te beschrijven ten opzichte van de ligging van de bocht-as, aan het begin van een beschouwde periode van migratie. De plaats waar de erosie van de buitenbochttoever maximaal is, is hier gedefinieerd als de plaats waar de erosiesnelheid gelijk is aan 90 tot 100 procent van de maximale erosiesnelheid in de bocht. In de grafiek in figuur 13a staan de grenzen van deze zone. De gegevens in de grafiek zijn gemiddelde waarden voor situaties in de Allier. Om de waarden van verschillende bochtsituaties onderling te kunnen vergelijken, is de bochtstraal gedeeld door de lokale rivierbreedte. De grenzen zijn uitgedrukt als hoek (in graden) ten opzichte van

AFSNIJDINGEN VAN (DELEN VAN) MEANDERS

In het meanderende deel van de Allier en in de situatie van de Grensmaas in het verleden kwamen verschillende vormen van afsnijdingen voor waarbij één of meer bochten, of slechts een deel van een bocht inactief werd(en). Vaak vormden afsnijdingen weer de uitgangssituatie voor een nieuwe fase van bochtontwikkeling. In figuur 14 wordt een aantal vormen van afsnijdingen geïllustreerd



FIGUUR 13

Boven- en benedenstroomse grens (in graden) ten opzichte van de bocht-as van de zone met 90 tot 100% van de maximale erosiesnelheid van de buitenbocht in relatie tot de bochtstraal, a: grafiek en b: definitieschets.

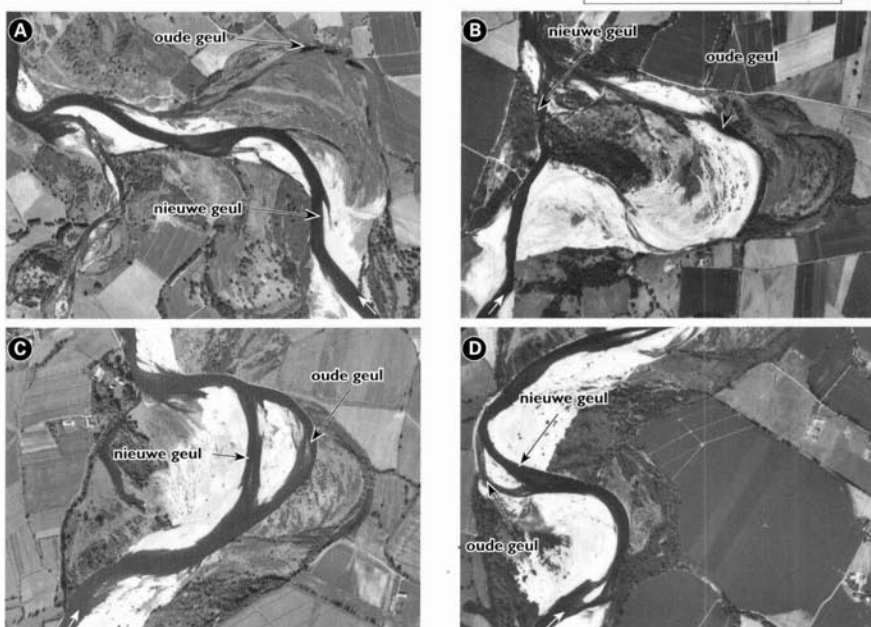
FIGUUR 14

Afsnijdingen van (delen van) meanderbochten die in de tekst worden besproken (foto's: IGN, 1992 en 1995).

met voorbeelden in de Allier. In de Grensmaas kwamen deze in het verleden ook voor. Een bochtafsnijding betekent een verkorting van de rivierloop waardoor plaatselijk het verhang toeneemt. Door een versterkte erosie van de bedding stroomopwaarts en sedimentatie stroomafwaarts van de afsnijding neemt het verhang vervolgens weer af. In figuur 14a is een voorbeeld van een afsnijding van een grote min of meer cirkelvormige bocht te zien, waarvan de ontwikkeling sterk bepaald is geweest door plaatselijk niet of relatief moeilijk te eroderen delen in de oever van de bocht zelf en van die direct stroomop- of -afwaarts ervan. In figuur 14b is een voorbeeld te zien van een kleinere, 'smallere' bocht waarvan de oever over het algemeen redelijk gelijkmatig te eroderen was. In de bocht in figuur 14c is het sterkst gekromde deel van de bocht inactief geworden. De bocht zelf bestaat nog en zal zich weer (vrijwel) in dezelfde richting verder ontwikkelen. De bank in figuur 14d is ontstaan door een combinatie van beperkte mogelijkheden voor bochtontwikkeling en de ontwikkeling in stroomafwaartse richting van een bovenstrooms gelegen bocht. Hierdoor wordt de in de ontwikkeling gelimiteerde bocht als het ware in elkaar gedrukt. De ontstane vrijwel haakse bocht wordt dan tenietgedaan door een kleine afsnijding.

DYNAMIEK VAN BANKEN IN DE RIVIER

In een meanderende rivier waar bochten kunnen migreren, schept oevererosie ruimte en levert materiaal voor de vorming van banken die in de rivier zijn gelegen. Door de migratie en vervorming van bochten verplaatsen pools en riffles zich en ontstaan er nieuwe scroll bars. Bochtverplaatsing leidt dus tot verplaatsing en nieuwvorming van banken in de rivier. Het is daar welhaast een voorwaarde voor. Waar oevererosie door oeververdediging wordt beperkt, neemt, zeker waar dat over een groot traject het geval is, het aantal banken in de rivier af en verdwijnt de dynamiek ervan grotendeels.



FIGUUR 15
Vastgelegde meanderbocht (IGN, 1992).

Zo komen op oude kaarten van de Grensmaas voor 1850 nog relatief veel banken voor, in tegenstelling tot de huidige situatie.

VERDWIJNEN VAN GRADIËNTEN ZONDER OEVEREROSIE

Op plaatsen waar de migratie over kortere afstanden wordt gehinderd, is de aanvoer van materiaal voor de vorming van banken wel gewaarborgd, maar ontbreekt het vooral aan ruimte voor de vorming van grote banken. Een goed voorbeeld is de in figuur 15 weergegeven meanderbocht die sterk in zijn ontwikkeling wordt gehinderd. De buitenbochttoever ligt al minstens sinds 1940 vast. Een zwaar uitgevoerde oeververdediging beschermt een boerderij en agrarisch land. De buitenbochttoever van de direct stroomop- en -afwaarts gelegen bochten ligt tegen een heuvel. De rivier legt hier vast gesteente bloot. Door de natuurlijke of artificiële verdediging van de buitenbochttoevers is de vorm van de point bars in de binnenbochten uiterst stabiel. Wel worden op beperkte schaal kleinere banken gevormd in de hoofdgeul door versnijding van riffles. De oorspronkelijk brede zone die een gradiënt (overgang) vormde van de sterker begroeide oude afzettingen naar de meer recent gevormde en niet- of spaarzaam begroeide afzettingen in de binnenbocht, is hier in de loop van de tijd veel smaller geworden of zelfs



verdwenen. Een deel van de overstromingsvlakte in de binnenbocht is al omgezet in landbouwgrond. Het overige deel wordt gebruikt voor extensieve veeteelt. De vegetatie heeft een uniforme, half-open structuur gekregen. Hoge bomen komen tot vlak nabij de geul voor.

Daarnaast is de topografische gradiënt van de binnenbocht naar de geul scherper geworden. Bij vrij migrerende bochten loopt de binnenbocht geleidelijk af in de richting van de geul. Bij de vastgelegde bocht is, door voortgaande insnijding van de Allier en sedimentatie in de binnenbocht, de overgang van de stabiele point bar naar de geul kort en steil

geworden. Dit is ook in de binnenbochten van de huidige Grensmaas het geval.

BANKEN EN VEGETATIE IN TOEKOMSTIGE GRENSMAAS

Aangezien verplaatsing van meanderbochten ook in de toekomstige Grensmaas niet getolereerd wordt, zal de grootschalige vorming en dynamiek van banken in deze rivier beperkt blijven. Door de kunstmatige verruiming van het zomerbed zullen, op voorwaarde dat de aanvoer van sediment voldoende is, wel banken gevormd worden en sedimentatie achter en in vegetatie plaatsvinden. Doordat de rivierbochten zich niet verplaatsen, zullen eenmaal gevormde banken zich echter grotendeels stabiliseren of met de oever samensmelten. Vanuit ecologisch standpunt is dat jammer, omdat daarmee het gewenste beeld van een gevarieerd landschap van pioniervegetatie via allerlei successiestadia naar oobossen niet spontaan zal kunnen blijven ontstaan. Om de gewenste natuurdoeltypen die met deze successiestadia overeenkomen en de gradiënten ertussen in stand te houden, is dan ook gericht beheer nodig.

CONCLUSIES

De relatie tussen oevererosie, bankvorming en bochtontwikkeling is sterk in het meanderende deel van de Allier en in de Grensmaas in vroeger tijden. Een deel van de grootte en de plaats van buitenbochterosie is te verklaren aan de hand van de mate van kromming van de actieve delen van een meanderbocht. In het deel van de Allier met het vlechtende karakter is de oevererosie vooral klein en chaotisch van aard. De vorm van de oeverwand en de daarin voorkomende verschuivingen is een resultante van de aard van het oevermateriaal, de hoeveelheid en het soort begroeiing en de grootte van de erosieve krachten.

In de toekomstige Grensmaas zal weliswaar op een aantal plaatsen de oeververdediging worden weggehaald, maar natuurlijke processen van verplaatsing van meanderbochten zullen niet getolereerd worden. Dat betekent dat de grootschalige vorming en dynamiek van banken in de rivier beperkt zullen blijven. Hierdoor is op basis van bovenstaand

onderzoek niet te verwachten dat het gevarieerde beeld van allerlei successiestadia van vegetatie zoals dat in de Allier aanwezig is, zich op een natuurlijke wijze in de toekomstige Grensmaas zal kunnen ontwikkelen. Ook al blijven de mogelijkheden voor oevererosie gelimiteerd, het is toch van belang met een beperkte erosie van de bedding en oever rekening te houden. Immers, de grens tussen Nederland en België is aan de ligging van het diepste deel van de geul gekoppeld. Daarnaast kan er door oevererosie weer meer land door de rivier naar de, in dit geval denkbeeldige, 'voisins' (buren) worden verplaatst.

RÉSUMÉ

L'ALLIER...UN EXEMPLE MORPHOLOGIQUE POUR LA MEUSE MITOYENNE

2^E PARTIE : L'ÉROSION DES BERGES ET LE DÉPLACEMENT DES MÉANDRES

Il est souvent fait référence à la rivière française, l'Allier, lorsqu'il s'agit d'illustrer par un exemple concret le développement naturel le long de la Meuse mitoyenne, ce tronçon du fleuve qui constitue la frontière entre la Belgique et les Pays-Bas.

Dans cet article, nous abordons la manière et la vitesse à laquelle l'érosion des berges et le déplacement des méandres ont lieu. L'érosion des berges est minime et de type chaotique dans la partie de l'Allier constituée d'entrelacements. La relation entre l'érosion des berges, la formation de bancs et le développement de courbes est forte si l'on considère la partie plus sinueuse de l'Allier et lorsque l'on remonte jusqu'à la Meuse mitoyenne telle qu'elle se présentait autrefois. Ce tronçon de l'Allier présente des vitesses d'érosion de berges élevées, allant jusqu'à 60 mètres par an. Sur la Meuse mitoyenne, les vitesses d'érosion maximales atteignent jusqu'à 8 mètres par an. Le paramètre qui détermine le mieux la vitesse du déplacement de la courbe d'un cours d'eau est le degré de courbure de cette dernière. L'érosion des berges est, dans le cas d'une rivière sinueuse, indissociablement liée à la formation des bancs de sable et de gravier. Lorsqu'une rivière sinueuse voit son cours fixé, comme c'est le cas pour la Meuse mitoyenne,

le nombre de bancs formés et la dynamique de formation de ceux-ci s'en trouvent réduits. Dans le futur il est vrai que, en de nombreux endroits de la Meuse mitoyenne, le renforcement des berges sera enlevé mais les processus naturels de déplacement des courbes ne seront pas tolérés.

De ce fait, la formation et la dynamique des bancs dans le fleuve resteront limités. On ne s'attend donc pas non plus à ce que le schéma diversifié avec toutes sortes de stades de succession de la végétation tel qu'on le rencontre sur l'Allier, puisse se développer de façon naturelle sur la Meuse mitoyenne de demain.

LITERATUUR

- BERG, J.H. VAN DEN, J. DE KRAMER, M. KLEINHANS & A.W.E. WILBERS, 2000. De Allier als morfologisch voorbeeld voor de Grensmaas. Deel I: Vergelijkbaarheid en rivierpatroon. *Natuurhistorisch Maandblad* 89: 118-122.
- BOUCHARDY, C., A. FEL, L. TIXIER, A. COURTILLÉ, L. BREUILLÉ, J.-P. RIDEAU & D. CROZES, 1991. Rivières et Vallées de France: L'Allier. Toulouse.
- CHEN, G. & W. SHEN, 1983. River curvature-width ratio effect on shear stress. *River Meandering*. In: C.M. Charles, *Proceedings of the Conference Rivers '83*. ASCE, New York: 687-699.
- CHOUDHARY, U.K. & D. NARASIMHAN, 1977. Flow in 180° open channel rigid boundary bends. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, volume 103, no. 6, technical note: 651-657.
- FRANCIS, J.R.D. & A.F. ASFARI, 1971. Longitudinal velocity distribution in wide, curved, open channels. *Journal of Hydraulic Research*, volume 9, no. 1: 73-90.
- HICKIN, E.J., 1977. Hydraulic factors controlling channel migration. *Research in Fluvial Systems*. In: R. Davidson-Amott & W. Nickling, *Proceedings of the 5th Guelph Symposium on Geomorphology*, Geobooks, Norwich: 59-66.
- HICKIN, E.J. & G.C. NANSON, 1984. Lateral migration rates of river bends. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, volume 110, no. 11: 1557-1567.
- IPPEN, A.T. & P.A. DRINKER, 1962. Boundary shear stress in curved trapezoidal channels. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulic Division*, 88 (HY5): 143-179.
- NANSON, G.C. & E.J. HICKIN, 1983. Channel migration and incision on the Beaton River. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, volume 109, no. 3: 327-337.
- NEDECO, 1959. River studies and recommendation on improvement of Niger and Benue. North Holland Publishing Company, Amsterdam.
- SHUKRY, A., 1950. Flow around bends in an open flume. *Transactions, ASCE*, volume 115: 751-779.
- THORNE, C.R. & N.K. TOVEY, 1981. Stability of composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms*, volume 6: 469-484.
- TRANCHOT, J.J. & F.C. FREIHERR VON MÜFFLING, 1803-1820. Kartenaufnahme der Rheinlande durch Tranchot und Von Müffling 1803-1820. Facsimile heruitgave 1967-1971, Publikationen der Gesellschaft für Rheinische Geschichtskunde XII 2. Abteilung, Neue Folge. Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn.