

Deltares-rapport**2008-U-R0705/A****Sturende factoren erosie, transport en sedimentatie
in stroomgebieden Rijn en Maas****Bodem- en
Grondwatersystemen**
Princetonlaan 6
Postbus 85467
3508 AL Utrechtwww.deltares.nlT +31 30 256 47 50
F +31 30 256 48 55
info@deltares.nl

Datum	1 juli 2008
Auteur(s)	drs. Suzanne van der Meulen dr. Jan Joziasse dr. ir. Gerard van Meurs drs. Geeralt van den Ham ing. Erik Vastenburger
Opdrachtgever	Delft Cluster
Projectnummer	092.79299/01.02
Aantal pagina's	47
Goedgekeurd door	Huub Rijnaarts

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Deltares.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan Deltares, dan wel de betreffende terzake tussen partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het Deltares-rapport aan directe belanghebbenden is toegestaan.

2008 Deltares

Inhoudsopgave

1	Samenvatting.....	4
2	Inleiding.....	6
2.1	Leeswijzer.....	6
3	Beschrijving stroomgebieden Maas en Rijn.....	7
3.1	Het stroomgebied van de Maas.....	7
3.2	Het stroomgebied van de Rijn.....	9
4	Erosie	13
4.1	Erosie van hellingen (landbodem)	13
4.2	Erosie van de rivierbodem en de oevers	16
4.3	Erosie binnen de stroomgebieden van de Maas en de Rijn.....	17
5	Transport van sediment	19
5.1	Aanvoer van sediment vanaf de hellingen naar de rivier.....	19
5.2	Transport door de rivier	20
5.3	Modellen voor de berekening van de sedimentconcentratie	26
5.4	Transport van gesuspendeerd materiaal in de Maas en de Rijn	27
5.5	Hoeveelheid transport en water- en sedimentkwaliteit	28
6	Sedimentatie	29
6.1	Rivierafvoer bepaalt sedimentatie.....	29
6.2	Omvang sedimentatie	29
6.3	Locatie sedimentatie	30
6.4	Modellen voor de berekening van de sedimentatie.....	31
6.5	Sedimentatie in het stroomgebied van de Maas en de Rijn	31
7	Effecten van klimaatveranderingen en socio-economische veranderingen op erosie, transport en sedimentatie.....	33
7.1	Klimaatverandering	33
7.2	Socio-economische veranderingen	35
7.3	Effecten van klimaatveranderingen	37
7.4	Effecten van veranderingen in klimaat en landgebruik op erosie	39
7.5	Effecten van veranderingen in klimaat en landgebruik op transport	39
7.6	Effecten van veranderingen in klimaat en landgebruik op sedimentatie	40
8	Conclusie.....	41
8.1	Sturende factoren van erosie, transport en sedimentatie.....	41
8.2	Effecten van klimaatverandering en socio-economische veranderingen op erosie, transport en sedimentatie	42
8.3	Aanbevelingen	43
9	Literatuur	44

Begrippenlijst

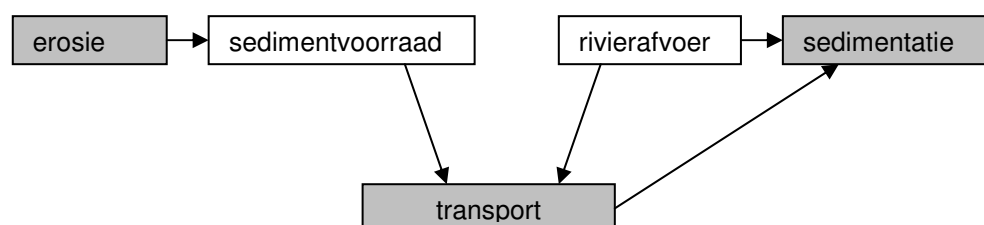
Baseflow:	Het deel van de rivierafvoer dat afkomstig is van grondwater.
Erodibiliteit	De weerstand tegen of de gevoeligheid van de bodem voor erosie.
Erosiviteit	Eroderende kracht van het eroderende proces.
Gesuspendeerd materiaal	Het materiaal groter dan 0,45 μm ; kan bestaan uit mineralen of organische stof.
Plastische limiet	Het vochtgehalte waarboven de bodem plastisch is.
Schuifsterkte voor erosie	Maat voor de cohesie van de bodem en de weerstand tegen schuifkrachten van zwaartekracht, stromende vloeistoffen en mechanische krachten.
Slib	Klei- en siltfractie.
Zwevend stof	In het water zwevende fijne deeltjes; zie gesuspendeerd materiaal.

1 Samenvatting

Het Delft Cluster-project Waterkwaliteit & Calamiteiten brengt de toekomstige ontwikkeling van de water- en slibkwaliteit in beeld onder invloed van extreme gebeurtenissen (gerelateerd aan bijvoorbeeld klimaatsverandering en verandering in landgebruik) en door de mens veroorzaakte calamiteiten (zoals lozingsongelukken). Dit rapport is het resultaat van de literatuurstudie naar erosie, transport en sedimentatie en is onderdeel van Work Package 3 (WP 3). WP 3 betreft effecten van hoogwater en ingrepen in het watersysteem op de dynamiek van sediment en zwevend stof en de potenties van uiterwaarden. Met name wanneer het zwevend stof verontreinigd is, kan sedimentatie hiervan nadelige gevolgen hebben voor de kwaliteit van het ontvangende oppervlaktewater of de bodem. Voor een goed begrip van de optredende processen is het van belang inzicht te hebben in de sturende factoren van erosie, transport en sedimentatieprocessen.

De hoeveelheid erosie op de hellingen of in de rivierbedding bepaalt de sedimentvoorraad die getransporteerd kan worden door de rivier. Hoeveel van deze voorraad daadwerkelijk getransporteerd wordt, is afhankelijk van de rivierafvoer en van sedimentatie van het materiaal voordat het de rivier bereikt. Zodra het debiet van de rivier beneden een drempelwaarde komt, kan sediment niet verder worden getransporteerd en bezinkt het. In figuur 1 worden de relaties tussen de drie genoemde processen schematisch weergegeven.

Erosie van de landbodem is afhankelijk van de eroderende kracht van wind en regen of afstromend water, de erodibiliteit van de bodem, topografie en landgebruik. Binnen het stroomgebied van de Maas vindt erosie op de hellingen voornamelijk plaats in de Ardennen en het heuvellandschap in Zuid-Limburg. Erosie van het rivierbed vindt plaats in delen van de rivier waar de stroomsnelheid groot is. In het stroomgebied van de Rijn vindt de meeste erosie plaats in de Alpen. In de laaggelegen, vlakke gedeelten van de stroomgebieden is erosie van de rivieroever het belangrijkste erosieproces. Erosie van de oevers kan beïnvloed worden door de taluds te beschermen tegen de erosiviteit van water of wind, of door het vergroten van de weerstand van de bodem tegen erosie. Erosie en transport van sediment in de rivier vinden plaats tijdens hoge afvoer en sedimentatie vindt plaats bij lage afvoer van de rivier. Gradiënt, breedte en topografie van het riviersysteem zijn bepalend voor de stroomsnelheid. Tijdens hoogwater neemt de hoeveelheid beschikbaar sediment af, waardoor tijdens de volgende hoge afvoer minder sediment beschikbaar is voor transport.



Figuur 1: De relatie tussen erosie, transport van (gesuspendeerd) materiaal en sedimentatie

De hoeveelheid materiaal die per oppervlakte-eenheid wordt, is afhankelijk van de duur van het sedimentatieproces, de overstromingsfrequentie (in het geval van sedimentatie op overstromingsgebied), de waterdiepte, de stroomsnelheid en de hoeveelheid beschikbaar sediment die door transport wordt aangeleverd. De locatie waar sedimentatie plaatsvindt, is afhankelijk van de stroombaan en de topografie. Daarnaast bepalen waterdebiet (stroomsnelheid) en de textuur van het sediment hoever bepaalde fracties getransporteerd worden en dus waar het materiaal wordt afgezet.

Veranderingen in klimaat en landgebruik, alsmede veranderingen in watergebruik kunnen de sturende factoren van erosie, transport en sedimentatie beïnvloeden. Zo zal extreme neerslag effect hebben erosie en op de afvoer van rivieren. Veranderingen in landgebruik en droogte of vernatting hebben effect op de erodibiliteit van de bodem en de aanvoer van regenwater naar de rivier.

2 Inleiding

Het Delft Cluster-project Waterkwaliteit & Calamiteiten brengt de toekomstige ontwikkeling van de water- en slibkwaliteit in beeld onder invloed van extreme gebeurtenissen (gerelateerd aan bijvoorbeeld klimaatsverandering en verandering in landgebruik) en door de mens veroorzaakte calamiteiten (zoals lozingsongelukken). Het project kent vier Work Packages (WP's), die ingedeeld zijn in diverse projectactiviteiten. Dit rapport is het resultaat van de literatuurstudie naar erodeerbaarheid, transport en sedimentatie en is onderdeel van Work Package 3. Dit Work Package betreft effecten van hoogwater en ingrepen in het watersysteem op de dynamiek van sediment en zwevend stof en de potenties van uiterwaarden.

Situaties met hoge afvoeren leiden tot erosie en afzetting van slib. WP 3 gaat in op de effecten hiervan op de voor de gewenste gebruiksfuncties benodigde bodem- en grondwaterkwaliteit, met inbegrip van de mogelijkheden voor vegetatieontwikkeling, van het buitendijkse gebied van Rijn en Maas. Hierbij wordt ook het verwachte herverontreinigingsniveau onderzocht, mede in verband met de risico's van de mobilisatie van oude verontreinigingen vanuit het buitenland. Tevens vindt kennisontwikkeling plaats ten aanzien van deze effecten in relatie tot de uitvoering van ingrepen in het kader van Ruimte voor de Rivier en de veranderingen daardoor op de langere termijn in het slibgedrag en de slibkwaliteit.

Dit rapport omvat een literatuurstudie naar de factoren die bepalend zijn voor erosie, transport en sedimentatie in de rivierstroomgebieden van de Rijn en de Maas. Kennis van deze factoren kan worden gebruikt om processen van erosie, transport en sedimentatie beter te begrijpen en eventueel maatregelen te nemen die op deze processen inspelen. Vooral de dynamiek van gesuspendeerd materiaal is van belang voor de kwaliteit van de bodem van de uiterwaarden en de waterkwaliteit. Dit literatuuronderzoek is daarom vooral gericht op het transport en de afzetting van gesuspendeerd materiaal.

Veranderingen in weersomstandigheden als gevolg van klimaatveranderingen en menselijk ingrijpen kunnen effect hebben op erosie, transport en sedimentatie. Inzicht in de sturende factoren is daarom ook belangrijk voor het voorspellen van effecten van veranderingen in klimaat en land- en riviergebruik.

2.1 Leeswijzer

In hoofdstuk 3 wordt een algemene beschrijving gegeven van de stroomgebieden van de Maas en de Rijn en het landgebruik in deze gebieden. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de sturende factoren van erosie besproken. In hoofdstuk 5 worden de sturende factoren van transport van sediment beschreven en in hoofdstuk 6 wordt het sedimentatieproces behandeld. In de hoofdstukken over erosie, transport en sedimentatie wordt steeds eerst de algemene theorie behandeld en vervolgens wordt specifieke informatie voor de stroomgebieden van de Maas en de Rijn gegeven. In hoofdstuk 7 worden de effecten van veranderingen in klimaat en landgebruik besproken en in hoofdstuk 8 worden de belangrijkste conclusies uit dit rapport samengevat en worden aanbevelingen voor vervolgonderzoek gegeven.

3 Beschrijving stroomgebieden Maas en Rijn

3.1 Het stroomgebied van de Maas

3.1.1 Algemene kenmerken

Figuur 2 toont de ligging van het stroomgebied van de Maas en belangrijke zijrivieren. De belangrijkste deelstroomgebieden zijn die van de zijrivieren Chiers, Semois, Lesse, Samber, Ourthe, Rur, Schwalm, Niers, Dommel en Mark (Internationale Maascommissie, 2005).

In het boek *Twee Rivieren* (RIZA, red. Middelkoop, 1998), worden de stroomgebieden van de Maas en de Rijn beschreven. De regenrivier de Maas is 935 kilometer lang en ontspringt in Frankrijk, ongeveer 200 kilometer ten noordoosten van Dijon op een hoogte van 409 meter boven zeeniveau. Vanuit Frankrijk, Luxemburg en België bereikt de Maas bij Eijsden onder Maastricht Nederland, waarna de rivier bij het Haringvliet uitmondt in zee. Het stroomgebied van de Maas beslaat in totaal een oppervlakte van ongeveer 35.000 km².

Het hele jaar door wordt de Maas gevoed door regenwater en omdat het stroomgebied van de Maas relatief klein is, is de kans groot dat er tegelijkertijd in het gehele stroomgebied veel neerslag valt (RIZA, red. Middelkoop, 1998). De hoeveelheid neerslag is redelijk geleidelijk verdeeld over het jaar (Tu et al., 2005c in RIZA, red. Middelkoop, 1998). Het stroomgebied herbergt geen grote watervoorraden in de vorm van gletsjers of sneeuw.

De maximale afvoer van de Maas in Nederland bedraagt circa 3.000 m³/s en de minimale afvoer bedraagt minder dan 10 m³/s (Liefveld et al., 2001). De gemiddelde afvoer van de Maas bij Eijsden bedraagt 230 m³/s. Bij de monding van de rivier bedraagt de afvoer circa 350 m³/s. Hoge afvoeren vinden plaats in de winter en lage afvoeren in de zomer. In de Ardennen bestaat het stroomgebied uit een heuvelachtig gebied met een rotsige, slecht doorlatende ondergrond. Hierdoor stroomt neerslag snel af en leidt intensieve regenval in de Ardennen binnen een dag tot hoge Maasstanden in Limburg. De invloed van het getij strekt tot aan Lith (RIZA, red. Middelkoop, 1998); in de Karakterisering van het stroomgebied (red. Busch, 2004) wordt Heusden genoemd (meer stroomafwaarts).

3.1.2 Ingrepen in het riviersysteem

In het Maasstroomgebied wordt aan 32% van de waterlichamen oppervlaktewater onttrokken, voornamelijk voor drinkwater, maar ook voor industriële doeleinden (red. Busch, 2004). Tijdens droge perioden kan dit leiden tot het droogvallen van beken of verlaging van de watervoering. Op rijkswateren hebben deze onttrekkingen weinig invloed.

Afvoerregulering en sturing van waterstromen vindt vooral plaats in het benedenstroomse gedeelte van het stroomgebied van de Maas. Er worden in het kader van het rivierbeheer diverse hydromorfologische ingrepen toegepast, waarvan de

belangrijkste in het Maasstroomgebied normalisatie (waarbij breedte en diepte van de rivier over een bepaalde afstand gelijk wordt gemaakt), kanalisatie en het aanbrengen van harde oeververdediging zijn. Deze ingrepen verhinderen in rivieren en beken dat de geul zich onder invloed van erosie en sedimentatie verlegt. Naast sloten en kanalen zijn ook veel natuurlijke wateren gekanaliseerd of genormaliseerd. Een groot deel van de midden- en benedenlopen van beken en een kleiner deel van de bovenlopen is gekanaliseerd of genormaliseerd. Belgische kanalen gebruiken vooral bij lage afvoer een aanzienlijk deel van het beschikbare water. In het kustwater van de Noordzee zijn zeekerende dammen, sluizen, spuien en de landaanwinning van de Maasvlakte de belangrijkste hydromorfologische ingrepen. Stroomopwaarts van Mook is de Maas niet bedijkt.

Tussen Maastricht en Maasbracht is de Maas ('Grensmaas') ongestuwd over grindbanken en is snelstromend. Scheepvaart ontbreekt hier; deze wordt geleid over het parallel aan de Grensmaas aangelegde Julianakanaal. Stuwen en (zeekerende) dammen reguleren de waterstand in 40% van alle waterlichamen van het stroomgebied. De helft van de stuwen bevindt zich in stromende wateren. Stuwen beïnvloeden het verhang en de stroomsnelheid. Vooral in de gebieden Goeree-Overflakkee, Mark-Vliet, de Aa en de Dommel wordt gebiedsvreemd water uit Rijkswateren binnengelaten ten behoeve van het peilbeheer, doorspoeling en beregening. De gestuwde Maas loopt van Maasbracht tot Lith; verder stroomafwaarts kent de rivier vrije afstroom.

Naar aanleiding van de hoogwaters van 1993 en 1995 en ten behoeve van de scheepvaart, natuurontwikkeling in de uiterwaarden en de winning van grind en zand zijn in Nederland maatregelen voor de Maas opgesteld: de Maaswerken. Het hoofddoel is het verhogen van de bescherming tegen hoogwater. Binnen het traject van de Grensmaas wordt 50 ton grind gewonnen en wordt 1.100 hectare natuur ontwikkeld. In een aantal steden worden kades verhoogd. Langs de Zandmaas worden hoogwatergeulen gegraven bij Lomm, Well en Aijen en wordt circa 550 hectare natuur ontwikkeld. Daarnaast wordt het zomerbed met 1,5 tot 3 meter verlaagd waardoor het waterpeil daalt en hierdoor verdroging optreedt in de omgeving. Om deze verdroging te compenseren wordt het peil opgezet waardoor juist weer vernatting optreedt, vooral achter de stuw (informatie uit interview met Hans Ruijter, projectdirecteur Maaswerken in H2O 22-2007).

3.1.3 *Landgebruik*

Van de totale oppervlakte van het stroomgebied van de Maas, bestaat circa 50% uit landbouwgebied. Het grootste gedeelte hiervan bevindt zich in Nederland, Frankrijk en Wallonië. De hoogste veedichtheid (aantal stuks vee per hectare agrarisch gebied) wordt aangetroffen in Nederland en Vlaanderen. In het Nederlandse deel van het Maasstroomgebied wordt het grootste deel van het oppervlak (61%) in beslag genomen door landbouw, gevolgd door natuur (15%) en wonen (8%). Water neemt 6% in beslag (red. Busch, 2004).

Het gebruik van de uiterwaarden van de grote rivieren in Nederland wordt samengevat in tabel 1. De uiterwaarden van de Maas in Nederland worden vooral gebruikt voor agrarische doeleinden (53-64%) en daarvan is circa 30-50% ingericht met akkers. Daarnaast komt hier vooral productiegrasland voor. Natuur neemt circa 19-30% van de ruimte in beslag en water 8-17%; 5-11% van het oppervlak wordt in beslag genomen door (productie)bos.

3.2 Het stroomgebied van de Rijn

3.2.1 Algemene kenmerken

Figuur 3 toont de ligging van het stroomgebied van de Rijn en de belangrijke zijrivieren. De Rijn is circa 1.320 kilometer lang (RIZA, red. Middelkoop, 1998) en het gehele stroomgebied beslaat een oppervlakte van 185.000 km². De rivier ontspringt in Zwitserland en loopt via Frankrijk en Duitsland richting Nederland.

In Zwitserland is de Alpenrijn (Alpenrhein) een bruisende bergrivier, die vanaf Basel (Oberrhein) rustiger wordt. De rivier is hier gesplitst in vele vertakkingen en langs de oevers is natte natuur aanwezig. Vanaf Bingen stroomt de Mittellrhein door een smal en diep dal. Het vlakkere gedeelte van de Rijn begint bij Bonn (Niederrhein/Nederrijn). In Nederland splitsen de Waal en de IJssel zich af. De IJssel mondt via het IJsselmeer uit in de Waddenzee; de Waal (benedenstrooms Merwede) en de Rijn (benedenstrooms Lek) monden uit in de Noordzee. Voor de Kader Richtlijn Water is het stroomgebied verdeeld in negen werkgebieden. Het Nederlandse gedeelte van het stroomgebied valt binnen het werkgebied 'Rijndelta', dat voor een klein gedeelte in Duitsland ligt (ICBR, 2005).

De waterstanden in de benedenloop van de IJssel worden beïnvloed door de waterstand in het IJsselmeer en door opstuwing door wind (RIZA, red. Middelkoop, 1998). De benedenlopen van de Lek en de Waal (Merwede) ondervinden invloed van waterbewegingen en waterstanden van de Noordzee. Zo kan stormvloed leiden tot extreem hoge waterstanden in de rivieren. De Waal voert 2/3 van de totale afvoer van de Rijn af, de Lek 2/9 en de IJssel 1/9 (Asselman, 1997), zie §3.2.2. De afvoer van de Rijn wordt boven Basel bepaald door regen en smeltwater van sneeuw en gletsjers. Het smeltwater zorgt in de vroege zomermaanden in de bovenloop voor een afvoerpiek en een gedempte piek in de Rijndelta. In de zomer is ruim 70% van het Rijnwater bij Lobith afkomstig uit het Alpengebied. Als gevolg van verdamping is 's zomers de aanvoer vanuit de rest van het stroomgebied relatief klein. In de winter voert de Rijn vooral regenwater af en is ter hoogte van Lobith de bijdrage van water uit het Alpengebied circa 30%. Bij Lobith vindt de hoogste afvoer van de Rijn plaats in de winter. Doordat de Rijn een gecombineerde regen- en smeltwater rivier is, kent de Rijn een relatief regelmatig afvoerpatroon.

De gemiddelde stroomsnelheid varieert in Nederland van 0,5 tot 1,5 m/s, met pieken van meer dan 2,0 m/s. Bij de monding van de Rijn bedraagt het gemiddelde debiet 2.300 m³/s.

3.2.2 Menselijk ingrijpen in het riviersysteem

In Nederland splitst de Nederrijn zich bij Pannerden in de Waal en het Pannerdens Kanaal. Het kanaal splitst zich nabij Arnhem in de Nederrijn en de IJssel. Een stuw reguleert de verdeling van water over deze twee waterlopen. De Waal is een brede rivier met uiterwaarden die door klei- en zandwinning grotendeels vergraven zijn en vaak overstromen. De IJssel is smal en kent alleen onvergraven brede uiterwaarden van soms

kilometers breed. Beide rivieren stromen vrij af. De Neder-Rijn is over bijna de gehele lengte gestuwd.

3.2.3 Landgebruik

In het stroomgebied van de Rijn wordt, net als bij de Maas, het grootste gedeelte van het oppervlak gebruikt voor de landbouw (50%), gevolgd door bos en natuur (35%) en bebouwd gebied (7,5%). Watergebieden nemen 6,8% van de ruimte in beslag en 0,2% van het stroomgebied bestaat uit wetlands (ICBR, 2005). Het grootste gedeelte van het landbouwoppervlak bevindt zich in Duitsland, Nederland en Frankrijk in de werkgebieden Main, Moezel/Saar en Rijndelta. De bos- en natuurgebieden zijn vooral aanwezig in Duitsland, Zwitserland en Frankrijk, in de werkgebieden Main, Hoogrijn en Moezel/Saar. Het grootste gedeelte van het bebouwde oppervlak bevindt zich in Duitsland en Nederland in de werkgebieden Bovenrijn, Neder-Rijn en Rijndelta. Binnen het gebied van de Rijndelta is 55% van het oppervlak ingericht voor agrarisch gebruik en bestaat 30% uit watergebied. Bebouwing neemt evenveel ruimte in als bossen en natuurgebieden, beide 7%, en 1% bestaat uit wetlands.

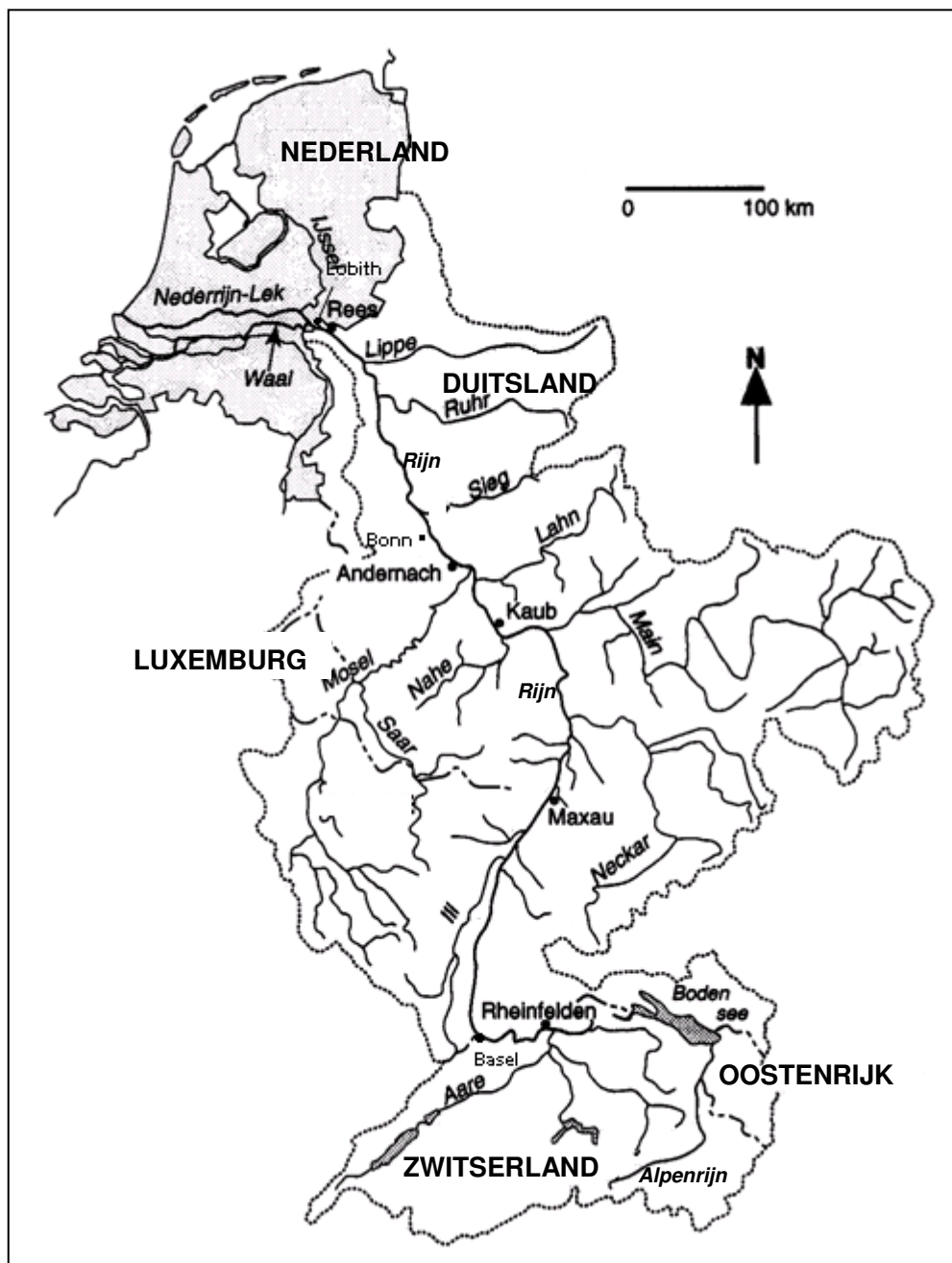
Uit tabel 1 blijkt dat de uiterwaarden van de Rijntakken voor een vergelijkbaar deel als de uiterwaarden van de Maas gebruikt worden voor natuur (16-29%) en water (11-19%). Het percentage van de uiterwaarden dat voor agrarische doeleinden wordt gebruikt ligt iets hoger (65-73%; grotendeels productiegrasland) dan bij de uiterwaarden van de Maas en er is meer bebouwing (5 %). Bos en productiebos beslaan samen 2-4% van de uiterwaarden.

Tabel 1: Landgebruik van de uiterwaarden in Nederland (uit RIZA, red. Middelkoop, 1998).

Ruimtegebruik	Rijntakken			Maastrajecten		
	Bovenrijn- Waal	Pannerdens Kanaal- Nederrijn- Lek	IJssel	Grensmaas	Gestuwde Maas	Getijdenmaas
Bos (natuur)	4	1	1	5	5	3
Ruigte/moeras	5	2	1	6	3	2
Grasland (natuur)	1	5	3	5	4	5
Water	19	11	11	14	8	17
Productiebos	0	1	1	5	4	1
Akker	4	4	8	30	31	14
Productiegrasland	61	69	72	23	33	50
Bebouwing	5	5	3	11	12	4
Overig	1	1	1	1	1	2
Totaal natuur	29	20	16	30	19	28
Totaal niet-natuur	71	80	84	70	81	72



Figuur 2: Het stroomgebied van de Maas (gebaseerd op Internationale Maascommissie, 2005).



Figuur 3: Het stroomgebied van de Rijn. Gebaseerd op Asselman (1997).

4 Erosie

De twee belangrijkste bronnen van gesuspendeerd sediment zijn de rivierbodem en -oever enerzijds en erosie op de hellingen in de stroomopwaarts gelegen delen van een stroomgebied anderzijds.

Aan land vindt erosie plaats door verwerking, oppervlakteafstroming van water of als gevolg van regenval of wind. Erosie als gevolg van oppervlakteafstroming kan plaatsvinden door ondiepe, wijdverbreide afstroming (overland flow, leidend tot sheet erosie), als gevolg van geconcentreerde afstroming in stroomgeulen.

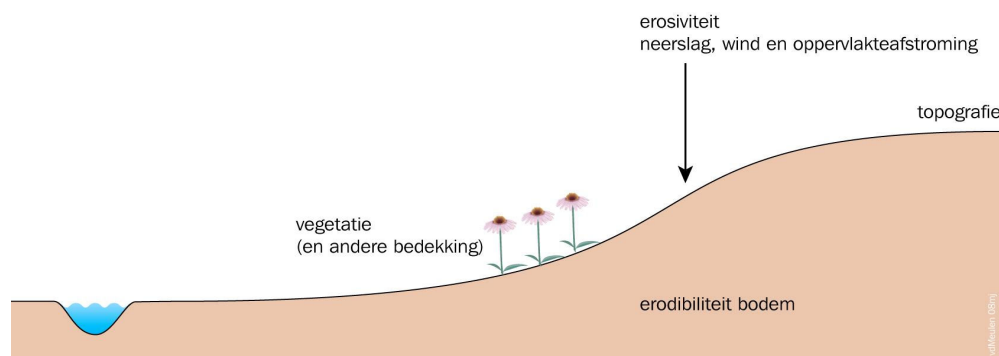
Oppervlakteafstroming vindt plaats wanneer de neerslagintensiteit groter is dan de infiltratiecapaciteit van de bodem (zogenaamde Hortonian oppervlakteafstroming) of wanneer neerslag aanhoudt nadat de bodem verzadigd is (verzadigde oppervlakteafstroming) (Morgan, 1995). Naast erosie door regen, wind, of stromend water, kunnen aardverschuivingen ook bijdragen aan het transport van bodemmateriaal naar de rivier (Richter, 1982).

Erosie van de rivierbedding is het gevolg van de waterstroming. Bij oevererosie is vooral golfinslag van belang.

4.1 Erosie van hellingen (landbodem)

Erosie van de (cohesieve) landbodem wordt bepaald door vier factoren (Morgan, 1995):

1. erosiviteit van het eroderende proces;
2. erodibiliteit van de bodem;
3. topografie: hellingshoek, lengte van de helling, oppervlakteruwheid;
4. aard van de vegetatie of andere bodembedekking.



Figuur 4: Factoren die erosie beïnvloeden.

In noordwest Europa wordt neerslag als belangrijkste factor voor de omvang van erosie beschouwd (Asselman, 1997). Voor erosie door neerslag wordt de relatie tussen erosie en de bovengenoemde factoren beschreven met de Universal Soil Loss Equation (USLE), oorspronkelijk opgesteld door Wischmeier en Smith (1978). De vergelijking luidt als volgt:

$$A = R * K * LS * C * P$$

A = jaarlijks bodemverlies per oppervlakte-eenheid (t/ha);

R = neerslag erosiviteitsfactor (kJ/m² * mm/h);

K = bodem erodibiliteitsfactor $((t/ha)/(kJ/m^2 * mm/h))$;

L = hellingslengte factor;

S = hellingshoekfactor (LS = topografische factor);

C = gewasfactor;

P = erosie-beschermingsmaatregelen factor (bv. al dan niet gebruik van terrasaanleg).

In de USLE is de factor sneeuw niet meegenomen. Smeltende sneeuw heeft minder ernstige erosie tot gevolg dan regen, maar op stroomgebiedniveau kan sneeuwsmelt en regen op besneeuwd oppervlak toch belangrijk zijn. Jaarlijks bodemverlies blijkt in de meeste studies echter redelijk goed te correleren met erosiviteit van regen (Dikau, 1986; Wetzel 1992; Schutt, 1993 in Asselman).

De USLE is verder ontwikkeld tot de Revised USLE (RUSLE), waarin herzieningen zijn aangebracht voor de waarde van de parameter R (erosiviteit) in de Verenigde Staten, voor een seizoensvariabele factor K (erodibiliteitsindex), aanpassingen van de LS factor en een nieuwe procedure voor de berekening van C (gewasmanagement). Aangepaste versies van RUSLE worden ook gebruikt in Europese modellen.

4.1.1 *Erosiviteit*

De erosiviteit van regen wordt hoofdzakelijk bepaald door intensiteit en duur. Door impact van regendruppels worden aggregaten afgebroken en worden bodemdeeltjes losgeslagen. Naast intensiteit en duur van de neerslag, zijn ook de massa, diameter en valsnelheid van de regendruppels (of hagelstenen en sneeuwvlokken) van invloed op de erosiviteit. De erosiviteit van wind wordt bepaald door windsnelheid en duur van een storm.

Het bodemoppervlak kan worden beschermd tegen de erosieve kracht van water (maar ook van wind) door bedekking met bijvoorbeeld stenen (keien) of vegetatie. Bodembedekking kan echter ook infiltratie van water belemmeren waardoor elders geconcentreerde afstroming leidt tot een toename van erosie.

4.1.2 *Erodibiliteit van de bodem*

Erodibiliteit van de bodem is de weerstand tegen of de gevoeligheid van de bodem voor erosie. Erodibiliteit is afhankelijk van textuur, aggregaatstabiliteit, infiltratiecapaciteit, bodemvochtgehalte, schuifsterkte voor erosie en chemische en organische samenstelling van de grond (Morgan, 1995). Deze factoren kunnen worden beïnvloed door het landgebruik aan te passen.

Grove deeltjes worden moeilijk losgemaakt van de bodem doordat ze relatief zwaar zijn; fijne deeltjes zijn relatief resistent tegen erosie vanwege cohesieve krachten. Bodems bestaand uit silt en fijn zand zijn het minste bestand tegen erosie. Verschillende auteurs hebben bepaald bij welke (relatieve) hoeveelheid silt en klei in een bodem de bodem het meest gevoelig is voor erosie. Hierbij worden uiteenlopende gehalten aan silt en klei genoemd in de literatuur. De kleifraction speelt een belangrijke rol in de erodibiliteit van de bodem vanwege structuurvorming en klei bindt organische stof. Aggregaatstabiliteit wordt mede bepaald door het type klei. Kleimineralen met een open structuur, zoals illiet en smectiet, zijn onderhevig aan zwellen en krimpen. Daardoor zijn deze aggregaten minder stabiel dan bijvoorbeeld aggregaten van kaolinit.

De sterkte van de aggregaten is bepalend voor de resistentie van de bodem. Bij een lage aggregaatstabiliteit kunnen aggregaten uit elkaar vallen bij snelle vernatting, waardoor de macroporositeit afneemt. Dit leidt tot een verminderde infiltratiecapaciteit. Hierdoor kan korstvorming aan het oppervlak plaatsvinden, waardoor de infiltratiecapaciteit verder afneemt (Morgan, 1995).

Naast poriegrootte en stabiliteit van de poriën, bepaalt het bodemvochtgehalte voor een belangrijk deel de infiltratiecapaciteit. Aan het begin van het infiltratieproces kan door een droge bodem meer water worden opgenomen dan in een vochtige bodem omdat het sorptievermogen hoog is. De hydraulische doorlatendheid van de bodem is echter laag in een droge bodem, omdat alleen poriën die vocht bevatten kunnen bijdragen aan de stroming van water (Koorevaar et al., 1983). Als een droge bodem nat wordt door neerslag of irrigatie, wordt tijdens vernatting lucht in de bodem ingesloten (hysterese). Hierdoor wordt de infiltratiecapaciteit verlaagd. Opname van bodemvocht en transpiratie door vegetatie bepalen mede de hoeveelheid oppervlakteafstroming.

Biologische activiteit van macro- en mesoschaal organismen zoals termieten en wormen kan significant bijdragen aan het verhogen van de infiltratiecapaciteit omdat deze organismen macroporiën creëren (Léonard en Rajot, 2001).

De schuifsterkte van de bodem voor erosie is een maat voor de weerstand tegen schuifkrachten van zwaartekracht, stromende vloeistoffen en mechanische krachten.

In kleihoudende bodems bepaalt vooral cohesie de schuifsterkte van de bodem. Wanneer het bodemvochtgehalte toeneemt, wordt de schuifsterkte lager waardoor de bodem plastischer wordt. Dit gedrag van de bodem verandert wanneer de plastische limiet wordt bereikt. Een verdere toename van het bodemvochtgehalte leidt ertoe dat de bodem gaat wegglijden door haar eigen gewicht (Morgan, 1995).

Vegetatie of andere bodembedekking dienen enerzijds ter afscherming van de bodem tegen de eroderende krachten van wind en water en anderzijds heeft het invloed op de erodibiliteit van de bodem. Boven de grond absorbeert de bodembedekking een deel van de energie van vallende neerslag en stromend water of van wind. Het type bodembedekking is echter van belang, omdat bepaalde bedekkingspatronen of hoogtes kunnen leiden tot geconcentreerde oppervlakteafstroming of concentratie van neerslag op de grond, waardoor de erosie juist toeneemt. Ondergronds dragen het wortelsysteem en de input van organische stof bij aan de weerstand van de bodem.

Afhankelijk van de herkomst kan organische stof de aggregaatstabiliteit en de waterretentiecapaciteit van de bodem vergroten (Morgan, 1995). Een belangrijke chemische factor voor erodibiliteit is het gehalte aan gemakkelijk dispersibele klei. Door vernatting kunnen hoge gehalten uitwisselbaar natrium vrijkomen waardoor de structuur uiteenvalt. Losgekomen kleideeltjes vullen de poriën in de bodemmatrix op waardoor de infiltratiecapaciteit verlaagd wordt (Morgan, 1995).

4.1.3 *Topografie*

Toenemende hellingshoek en lengte van een helling versterken in principe de erosie als gevolg van verhoogde stroomsnelheden van water en een groter volume van oppervlakteafstroming.

Stroomsnelheden worden door de aanwezigheid van vegetatie of andere obstakels beperkt. De hellingshoek en –lengte kunnen worden verkleind door de aanleg van terrassen of door middel van contourploegen, waarbij evenwijdig aan de hoogtelijnen wordt geploegd.

In tabel 2 worden erosieremmende maatregelen en de effectiviteit van deze maatregelen op de verschillende erosiemechanismen weergegeven.

Tabel 2: Effectiviteit van verschillende erosieremmende maatregelen.
Gebaseerd op Morgan, 1995.

Maatregel	Effect op erosie door:					
	regenval		afstroming		wind	
	E	T	E	T	E	T
Bescherming tegen erosie						
Oppervlaktebedekking	++	++	++	++	++	++
Oppervlakteruwheid vergroten	-	-	++	++	++	++
Vergroten oppervlakte-opslag in depressies	+	+	++	++	-	-
Infiltratie vergroten	-	-	+	++	-	-
Plantengroei bevorderen en verbetering structuur bodem						
Bemesting	+	+	+	++	-	-
Drainage	-	-	+	++	-	-
Beïnvloeden topografie						
Contourploegen	-	+	+	++	+	++
Aanleg terrassen	-	+	+	++	-	-
Aanleg obstakels	-	-	-	-	+	+
Waterwegen	-	-	-	-	-	-

E erosie; T transport; - geen effect; + matig effect; ++ sterk effect.

4.1.4 Modellen

Voor het modelleren van erosie en sedimentaanvoer naar rivieren bestaat onder ander het WaTEM/SEDEM model (<http://geo.kuleuven.be>) dat het mogelijk maakt effectieve stroomgebied management scenario's te zoeken. Delft3D simuleert onder ander sediment transport in rivieren en beddingmorfologie (<http://delftsoftware.wldelft.nl>).

4.2 Erosie van de rivierbodem en de oevers

Petit et al. (2005) gebruiken de volgende functie voor het beschrijven van de stroomkracht van een rivier:

$$\omega = (\rho g Q S) / w \text{ en } \omega = \tau_b u$$

ω :	stroomkracht [N]
ρ :	vloeistofdichtheid [kg/m ³]
g :	zwaartekrachtversnelling [m/s ²]
Q :	debiet [m ³ /s]
S :	helling in de lengterichting [m/m]
w :	breedte van het wateroppervlak [m]
τ_b :	totale schuifspanning, gemiddeld over de breedte van de rivier [N/m]

u : stroomsnelheid, gemiddeld over de hele breedte van de rivier [m/s]

In Petit et al. (2005) wordt de relatie tussen textuur van het sediment en de kritische stroomkracht voor het plaatsvinden van erosie gegeven:

$$\omega_0 = aD_i^b \text{ [W/m}^2\text{]}$$

ω_0 : kritieke stroomkracht [W/m²]

D_i : grootte van de verplaatste deeltjes [mm]

In de literatuur worden voor verschillende rivieren uiteenlopende waarden gegeven voor a en b ; variërend in orde van grootte van 0,03 tot 0,09 voor a en 1,3 tot 1,7 voor b (voor verwijzingen, zie Petit et al., 2005).

Erosie van cohesief materiaal als gevolg van waterstroming kan worden beschreven met de Krone-Partheniades-vergelijking:

$$A = M * \frac{\tau_b - \tau_e}{\tau_e} \text{ en } \tau_b = \rho g \frac{u^2}{C^2}$$

A : Erosieflux [kg/m²/s]

M : erosieparameter [kg/m²/s]

τ_b : schuifspanning, erosieve kracht van stromend water [N/m²]

τ_e : kritieke schuifspanning, drempelwaarde voor het optreden van erosie [N/m²]

ρ : vloeistof dichtheid [kg/m³]

g : zwaartekrachtversnelling [m/s²]

u : stroomsnelheid [m/s]

C : Chézy ruwheidsparameter

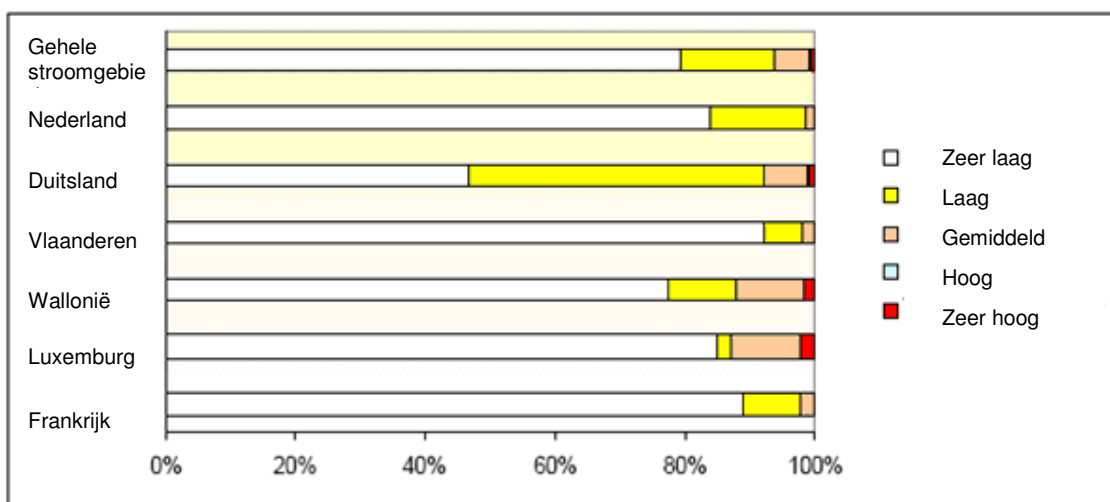
Als gevolg van de golfbelasting vindt erosie van de oevers plaats. De belasting van de oever door golven wordt vooral veroorzaakt door windgolven en in mindere mate door scheepvaart (Coops, red, 2002). De erosieve kracht van rivierwater op de oevers wordt wel vergroot door activiteit van grote motorschepen die zuiging en golfwerking versterken (RIZA, 2003). Golfhoogte en –periode zijn de belangrijkste factoren die de belasting bepalen. Oevers kunnen worden beschermd tegen de kracht van stromend water en golfinslag door het toepassen van oeverbedekking en door het plaatsen van obstakels voor de oever. Bij een fluctuerend waterpeil wordt de belasting van waterstroming en golven verdeeld over de oever. Door middel van oeverbeschermingsconstructie kan de beheerder processen van erosie en aanslibbing sturen.

4.3 Erosie binnen de stroomgebieden van de Maas en de Rijn

Winderosie is in het stroomgebied van de Maas van ondergeschikt belang in vergelijking met erosie door water (Bouzit et al., 2005). Binnen het stroomgebied van de Maas vindt erosie van de hellingen vooral plaats in de Ardennen (in Bakker, 2006). In figuur 5 is weergegeven hoe gevoelig de bodem in verschillende delen van het stroomgebied is voor erosie. In Nederland vindt in Zuid-Limburg erosie plaats op de hellingen van het heuvellandschap, waar de bodem uit löss bestaat. Erosie in Zuid-Limburg wordt veroorzaakt door de combinatie van gemakkelijk erodeerbare löss-bodems, het reliëf en intensieve landbouw (De Roo, 1993). Door het hoogteverschil zijn de beken in dit gebied snelstromend (RIZA, red. Middelkoop, 1998). In de laaggelegen,

vlakke delen van het stroomgebied speelt oevererosie een belangrijkere rol dan hellingerosie. Hoe groot de bijdrage van oevererosie is aan de sedimentlast van de rivieren is niet bekend.

Asselman (1997) ontwikkelde het Rhine Soil Loss Model (RSLM) om bodemverlies op jaarbasis in het gehele Rijnstroomgebied te berekenen als functie van klimaat en landgebruik. Het model is gebaseerd op USLE. Berekende waarden voor jaarlijks bodemverlies variëren van 0.23 ton/ha in het Lahnstroomgebied tot 100 ton/ha in de Alpen. Het model neigt tot een overschatting van de erosiewaarden in de Alpen en de resultaten komen niet overeen met de bodemerrosiekaarten van Richter uit 1965 en Oldeman et al. uit 1990. De verschillen worden door Asselman vooral toegeschreven aan verschillen in de gewas- en hellingfactoren.



Figuur 5: De gevoeligheid van de bodem voor erosie in verschillende delen van het stroomgebied van de Maas (gebaseerd op Bouzit et al., 2005).

5 Transport van sediment

De hoeveelheid materiaal die kan sedimenteren in de rivier, in meren, in havens of op de uiterwaarden en/of buitendijkse overstromingsgebieden is onder andere afhankelijk van de hoeveelheid materiaal die getransporteerd wordt. In grote rivieren zoals de Rijn is de gesuspendeerde sedimentlast gelimiteerd door de voorraad sediment (Thonon, 2006). Transport van sediment is afhankelijk van de transportcapaciteit van de rivier en van de beschikbare voorraad sediment (Asselman, 1999). De sedimentvoorraad bevindt zich zowel aan land als in de rivierbedding. In paragraaf 5.1 wordt beschreven welke factoren van invloed zijn op toevoer van op de hellingen geërodeerd materiaal naar de rivier en aanvoer van sediment vanuit zijrivieren naar de hoofdriever. In paragraaf 5.2 wordt transport van sediment door het riviersysteem beschreven.

In veel van de besproken onderzoeken wordt transport gerelateerd aan debiet. Hierbij wordt de opmerking geplaatst dat stroomsnelheid bepalend is voor erosie en een belangrijke factor is bij transport van sediment. Een groot debiet bij relatief lage snelheid leidt tot minder transport dan een even groot debiet bij hogere stroomsnelheid. Het debiet is een functie van stroomsnelheid en het hydraulische profiel en daardoor locatie afhankelijk. Op één locatie is de relatie tussen debiet en transport van sediment dus rechtevenredig.

5.1 Aanvoer van sediment vanaf de hellingen naar de rivier

Transport van sediment vanaf de hellingen naar de (zij)rivier vindt voornamelijk plaats door stromend water of middels windtransport.

Transport door de wind kan op drie manieren plaatsvinden (Morgan, 1995): in suspensie, rollend of door middel van saltatie. In suspensie wil zeggen dat fijne deeltjes, meestal kleiner dan 0,2 mm hoog in de lucht worden verplaatst over lange afstanden. Grovere deeltjes worden rollend voortbewogen over het oppervlak en saltatie houdt in dat deeltjes in een springende beweging worden verplaatst. Omdat windtransport van ondergeschikt belang is in de stroomgebieden van de Maas en de Rijn, wordt hierna alleen gesproken over transport door water.

Transport door waterstroming kan ondergronds plaatsvinden of bovengronds. De transportcapaciteit van stromend water is afhankelijk van de textuur van het sediment en de snelheid van de stroming. Ondergrondse geconcentreerde afstroming kan plaatsvinden door scheuren of tunnels ('piping') maar ook via de poriën.

De verhouding tussen getransporteerd en geërodeerd materiaal wordt de Sediment Delivery Ratio (SDR) genoemd. De SDR beschrijft welk deel van het geërodeerde materiaal getransporteerd wordt naar de rivier. SDR is afhankelijk van:

1. de afstand tussen erosiepunt en de rivier;
2. hellingshoek en morfologie;
3. bodembedekking;
4. textuur van het geërodeerde materiaal;
5. oppervlakteafstroming (snelheid en duur);
6. oppervlakteruwheid.

Over het algemeen wordt materiaal dat is geërodeerd in stroomgeulen naar grotere afvoerkanalen geleid. Sediment dat door middel van oppervlakteafstroming in ondiepe, brede stromingsvormen wordt geërodeerd en getransporteerd, heeft meer kans om afgezet te worden voordat het een stroomkanaal bereikt. Het geërodeerde materiaal wordt gedeeltelijk gesedimenteerd aan de voet van de helling, achter obstakels en in depressies.

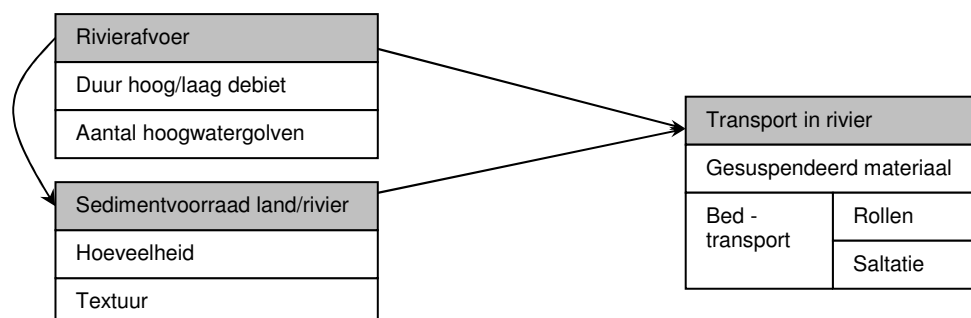
In de kleinere zijstroomgebieden van de hoofdrijver wordt de SDR bij de uitstroom van de stroomgebieden lager met een toenemende grootte van het stroomgebied, de hoeveelheid erosie en rivierafvoer (Asselman, 1997). De afname van de SDR bij grotere stroomgebieden is vaak het gevolg van een lagere hellingshoek en van opslag van sediment op de uiterwaarden. Een deel van het opgeslagen sediment kan opnieuw worden geërodeerd.

Metingen van de sedimentlast van een rivier geven informatie over het gecombineerde effect van erosie en SDR. Vergelijking van erosiemetingen op pilotschaal en sedimentlasten toont aan dat erosie op onbegroeid land het meest bijdraagt aan de sedimentlast (Asselman, 1997).

De hoeveelheid geërodeerd sediment die getransporteerd wordt naar de rivier is van groot belang voor de mogelijke sedimentatie benedenstrooms. Zowel Asselman et al. als Haan et al. (Asselman, et al. 2003) benadrukken dat nog onvoldoende inzicht bestaat in de sedimenttoevoer en dat op dit gebied onderzoek noodzakelijk is om meer betrouwbare berekeningen te kunnen maken.

5.2 Transport door de rivier

De hoeveelheid sediment die getransporteerd wordt door de rivier en de afstand waarover dat gebeurt, is afhankelijk van de rivierafvoer (zowel debiet als stroomsnelheid of hydraulisch profiel), de textuur van het te transporteren materiaal en de beschikbare hoeveelheid sediment. Bij transport in de rivier kan onderscheid worden gemaakt tussen transport van gesuspendeerd materiaal en bedtransport. In figuur 6 zijn deze processen schematisch weergegeven.



Figuur 6: Rivierafvoer en beschikbare sedimentvoorraad bepalen het transport van sediment.

5.2.1 *Textuur sediment*

De textuur van het sediment bepaalt de wijze waarop en de afstand waarover het getransporteerd kan worden. Transport van grof materiaal (bed load) vindt plaats door bedtransport rollen of saltatie (springen) op de rivierbodem. Hierbij worden kleine afstanden afgelegd. Fijnere deeltjes worden getransporteerd in suspensie of in een colloïdale oplossing. Gesuspendeerd materiaal is het materiaal dat achterblijft op een 0,45 µm-filter en kan bestaan uit mineralen of organische stof (Eisma, 1993).

Asselman (1997) heeft voor de Rijn op basis van metingen van Rijkswaterstaat aangetoond dat de mediane korrelgrootte van getransporteerd sediment afneemt bij een hoger debiet. De monsters zijn vlak onder het wateroppervlak genomen en geven naar verwachting een beeld van de textuurverdeling van gesuspendeerd materiaal. Bij de grens tussen Duitsland en Nederland varieerde de mediane korrelgrootte van 35µm bij 1.500 m³/s tot 10 µm bij 4.000 m³/s. De concentratie zandig materiaal verandert niet veel onder verschillende debietwaardes en de afname van de mediane korrelgrootte is het gevolg van de relatieve toename van de fijne fractie. Mogelijk wijst dit op een verschil in herkomst van het materiaal, waardoor meer fijn materiaal wordt aangeleverd bij een hoger debiet.

5.2.2 *Bedtransport en transport in suspensie*

Bedtransport (bedload)

Grof materiaal wordt verplaatst door rollen of saltatie (springen) op de rivierbodem. Petit et al. (2005) hebben de relatie bepaald tussen drempelwaardes voor de kracht van stromend water (schuifspanning) die benodigd is om bedtransport te initiëren en de textuur van het verplaatste materiaal in rivieren van verschillende grootte in de Belgische Ardennen. De rivierbodem van alle bestudeerde rivieren bestaat uit grind. De benodigde stromingskracht is het laagst in de grootste rivier (de Ourthe) en neemt toe bij een afname van het oppervlak van het stroomgebied (er zijn stroomgebieden met een oppervlakte van kleiner dan 20 km² tot 2.660 km² in het onderzoek opgenomen). Zowel de vorm van de bedding (de ruwheid) als de korrelgrootte van het beddingmateriaal bepalen de weerstand van de rivierbodem tegen erosie en transport.

Gesuspendeerd materiaal

Het materiaal dat in suspensie wordt getransporteerd kan over langere afstanden verplaatst worden dan het grovere materiaal dat door bedtransport wordt verplaatst. Gesuspendeerd materiaal is van belang voor de waterkwaliteit en de kwaliteit van het sediment omdat het voor een deel uit klei en organisch materiaal bestaat, waar zware metalen en organische verontreinigingen aan gebonden kunnen zijn.

In een sterk met organische stoffen belast watersysteem als de Maas kan in de zomer de combinatie van stagnant water en een verhoogde temperatuur van het water leiden tot een verhoging van de primaire productie van aquatische planten en/of algen en daarmee van het zwevend-stofgehalte (Eisma, 1993). Van Vliet en Zwolsman (2007) hebben op basis van gegevens uit 1976 voor de Maas bij Eijsden aangetoond dat tijdens langdurige droogte de condities optimaal zijn voor algenbloei. Bij Keizersveer is in 2003 geen zomeralgenbloei aangetoond. Waarschijnlijk zijn een hogere afvoer en lagere watertemperatuur ten opzichte van het water ter hoogte van Eijsden hier de oorzaak van.

Doomen (2003) onderzocht voor de Maas bij Eijsden de relatie tussen seizoen en zwevend-stofconcentratie voor de periode 1988-2002. Hieruit blijkt dat tijdens lage debieten (tot en met 800 m³/s) bij gelijk debiet geen significant verschil bestaat in zwevend-stofgehalte in de zomer en de winter. In de debietsklasse 800-1.000 m³/s is het zwevend stofgehalte in de winter hoger dan in de zomer. Deze uitkomsten lijken in tegenspraak met de theorie van Eisma dat door een combinatie van stagnant water en verhoogde temperaturen in de zomer, de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal toeneemt. Het is echter niet bekend bij welke temperaturen de meetgegevens van Doomen verkregen zijn en welke temperatuur benodigd is voor een significant hogere primaire productie. Omdat in de zomerperioden van 1988-2002 nooit een debiet van meer dan 1.000 m³/s werd gemeten, kon de vergelijking niet worden gemaakt voor hogere debieten.

Het is moeilijk om een goede voorspelling te doen voor de sedimentlast op basis van afvoer, vanwege variaties in sedimentbeschikbaarheid. Erosie tijdens hoog water leidt namelijk tot een afname van de sedimentvoorraad voor een later moment tijdens de hoogwaterperiode en voor een volgende hoogwaterperiode. Dit verschijnsel wordt hysteresis genoemd (zie volgende paragraaf).

Omdat het grootste gedeelte van het transport in de Rijn en de Maas in suspensie plaatsvindt (zie paragraaf 5.4) en het gesuspendeerde materiaal van belang is voor de waterkwaliteit en de kwaliteit van sediment op de uiterwaarden, wordt in onderstaande paragrafen voornamelijk aandacht besteed aan transport van gesuspendeerd materiaal.

5.2.3 *Rivierafvoer*

De rivier wordt gevoed door oppervlakteafstroming van regen- of smeltwater en door afwatering van bovenstroomse rivieren en beken.

Meestal worden empirische relaties gebruikt tussen sedimentconcentratie en waterafvoer om de transportcapaciteit te beschrijven (onder andere Zwolsman, 2000 en Middelkoop et al., 2001). Bij hoge debieten vinden erosie en transport plaats; bij lager debiet bezinkt sediment.

De snelheid waarmee het debiet verandert is mede bepalend voor het zwevend-stofgehalte (Doomen, 2003). Als het debiet snel toeneemt of afneemt, is het zwevend-stofgehalte op het moment dat het hoogste of laagste debiet bereikt wordt hoger dan bij een langzame verandering in debiet. In het geval van een snelle stijging van het debiet tot aan debiet X wordt er minder sediment opgenomen en afgevoerd voordat debiet X bereikt is. De kans is klein, dat de sedimentvoorraad bij het bereiken van debiet X is uitgeput, waardoor de sedimentconcentratie op het moment dat debiet X bereikt wordt hoger is dan wanneer het debiet langzamer was gestegen. Deze redenatie gaat echter alleen op, als een korte tijdsperiode (een dag of minder) wordt beschouwd. Bij een snelle daling van het debiet tot debiet Y is er onvoldoende tijd geweest voor het afvoeren en afzetten van sediment, waardoor de zwevend-stofconcentratie hoger zal zijn dan bij een langzamere afname van het debiet. Doomen beschrijft voor de Maas bij Eijsden de empirische relatie tussen de zwevend stofconcentratie en de snelheid van de verandering van het debiet als volgt:

$$C = 16,18 + 0,06(dQ / dt) + 0,0007(dQ / dt)^2$$

C: zwevend stofconcentratie [mg/l]

Q: debiet [m³/s]

dt: tijdstap[s]

Omdat de transportcapaciteit van het sneller stromende water in de hoofdstroom groter is dan op de uiterwaarden, is volgens Pizzuto (1987, in Asselman en Middelkoop 1995) turbulente diffusie het dominante transportmechanisme op de uiterwaarden, wanneer deze volledig zijn overstroomd en er geen stroming loodrecht op de hoofdstroom naar de uiterwaarden is. Hierbij wordt sediment verplaatst van de hoofdstroom, waar de concentratie sediment hoog is, naar de uiterwaarden waar de concentratie sediment lager is.

Maatregelen voor (lokale, tijdelijke) beïnvloeding van de rivierafvoer

Waterberging in bovenstrooms gebied is een maatregel om hoogwater in stroomafwaarts gelegen delen van het stroomgebied te beperken. Water kan langer worden vastgehouden in stroomopwaartse delen van het stroomgebied door de afvoersnelheid te beperken. Dit kan worden bereikt door het weer laten meanderen van rivieren, het creëren van wetlands en het verwijderen van ontwateringswerken en afwateringswerken in landbouwgebied. Verder kan water langer worden vastgehouden door het bosareaal te vergroten ten kosten van landbouwgrond.

Van Deursen et al. (2002) stellen dat het effect van bovenstroomse waterberging op het plaatsvinden van zeer hoogwater in Nederland beperkt is. De effectiviteit is afhankelijk van de omvang van het stroomgebied en de situatie voorafgaand aan extreme neerslag. In grote stroomgebieden treedt hoogwater op als gevolg van langdurige periodes van neerslag. Het volume dat tijdens extreem hoogwater in Nederland moet worden afgevoerd is grotendeels afhankelijk van neerslag, wanneer de bodem in het stroomgebied verzadigd is als gevolg van voorgaande neerslag. Doordat grote stroomgebieden al een grote bergingscapaciteit hebben moet heel veel extra bergingscapaciteit gecreëerd worden om een significante invloed te verkrijgen op hoge afvoer. Tijdens lange periodes van regenval zal de extra berging vol raken en treedt toch hoge afvoer op. Lokaal is wateroverlast het gevolg van incidentele gebeurtenissen waarbij veel neerslag valt op een klein oppervlak. Deze hoogwatersituaties kunnen wel voorkomen worden door extra berging. Met extra bergingscapaciteit kan het tijdstip van afvoer als gevolg van 'overstroming' van de berging worden beïnvloed.

Van Deursen et al. hebben op basis van verschillende klimaatscenario's en ingrepen met behulp van de waterbalansmodellen MEUSEFLOW en RHINEFLOW het afvoergedrag van de rivieren bestudeerd. Hieruit blijkt dat het afvoergedrag ter hoogte van Lobith en Borgharen zowel bij een nat als een droog scenario, in het geval van veel extra waterberging (door middel van vergroting van het bosareaal ten koste van landbouwgrond en het laten meanderen van alle zijrivieren van de Rijn) gelijk is aan een situatie waarin weinig extra berging wordt bewerkstelligd.

Benedenstrooms kunnen noodvoorzieningen worden getroffen om afvoerpieken op te vangen, zoals retentiebekkens en calamiteitenpolders.

5.2.4 *Sedimentvoorraad en hysteresis*

Als gevolg van erosie en transport tijdens hoge rivierafvoeren neemt de sedimentvoorraad af. Hierdoor is de sedimentconcentratie tijdens stijgende afvoer hoger dan tijdens de daaropvolgende daling van het debiet en het volgende hoogwater. Dit effect wordt hysteresis genoemd. De duur van hoge en lage debieten en het aantal hoogwatergolven bepaalt de verhouding tussen erosie en sedimentatie (Doomen, 2003) en daarmee de aard en omvang van de hysteresis.

Er worden vier hysteresis-effecten beschreven (Asselman, 1999) in de relatie tussen rivierafvoer en gesuspendeerde sedimentlading:

1. Kloksgewijze hysteresis

Toenemend debiet gaat gepaard met een toename van de concentratie gesuspendeerd materiaal. De sedimentvoorraad is vaak uitgeput voordat de afvoerpiek plaatsvindt (zie figuur 7 a en b). Tijdens de daling van de afvoer aan het eind van het hoogwater veroorzaakt niet alleen uitputting van de sedimentvoorraad, maar ook de verhoogde relatieve bijdrage van baseflow¹ aan de rivierafvoer bij een afname van de sedimentconcentratie. In diverse studies (Asselman en Middelkoop, 1998) wordt aangenomen dat dit type hysteresis voorkomt, als het sediment lokaal is geërodeerd vanaf de rivierbedding. Olive en Rieger (1985, in Asselman en Middelkoop, 1998) relateren dit type hysteresis aan een afname van de erosie van kleiige bodems als gevolg van een toenemend bodemvochtgehalte. De kleideeltjes kunnen makkelijker losgemaakt worden wanneer de bodem droog was voorafgaand aan vernatting.

In het stroomgebied van de Rijn is kloksgewijze hysteresis de meest voorkomende vorm van hysteresis. Dit type hysteresis komt vooral voor in de winter, wanneer het meeste sediment wordt aangeleverd vanuit de rivier de Moezel en sedimentvoorraden van in de zomer gesedimenteerd materiaal nog aanwezig zijn. Dit type hysteresis is door Asselman (1999) voor de Rijn bij Emmerich-Rees aangetoond in 55% van de afvoerpieken, waarbij 69% van de pieken met een debiet van meer dan 4.000 m³/s.

2. Geprononceerde kloksgewijze hysteresis

Dit houdt in dat sedimentconcentraties snel stijgen bij een stijgend debiet, soms zelfs voorafgaand aan de snelle stijging van het debiet van de rivier. Dit type hysteresis komt niet vaak voor. Het is door Asselman (1999) voor de Rijn bij Emmerich-Rees aangetoond tijdens enkele afvoerpieken met een debiet van meer dan 4.000 m³/s. De snelle piek in sedimentconcentratie lijkt veroorzaakt te worden door erosie en vroeg transport van sediment in zijrivieren direct bovenstrooms van de meetlocatie.

3. Negatieve hysteresis

Hierbij is de sedimentconcentratie het hoogst na de afvoerpiek (zie figuur 7 c en d). Deze situatie komt voornamelijk voor tijdens hoge afvoer in de zomer. Er zijn vier mogelijke verklaringen voor dit hysteresis-effect:

- a. Ten eerste kan uitputting van de sedimentvoorraad ervoor zorgen dat de toename van de sedimentconcentratie achterblijft bij de toename van de afvoer. Tijdens de winter is de sedimentvoorraad grotendeels al afgevoerd.
- b. Daarnaast is de herkomst van het sediment van belang. Als de afstand tussen het meetpunt en de sedimentvoorraad groot is wordt de hoogwatergolf eerder waargenomen dan de stijging van de sedimentconcentratie (Heidel, 1956).

¹ Baseflow: het deel van de afvoer dat afkomstig is van grondwater.

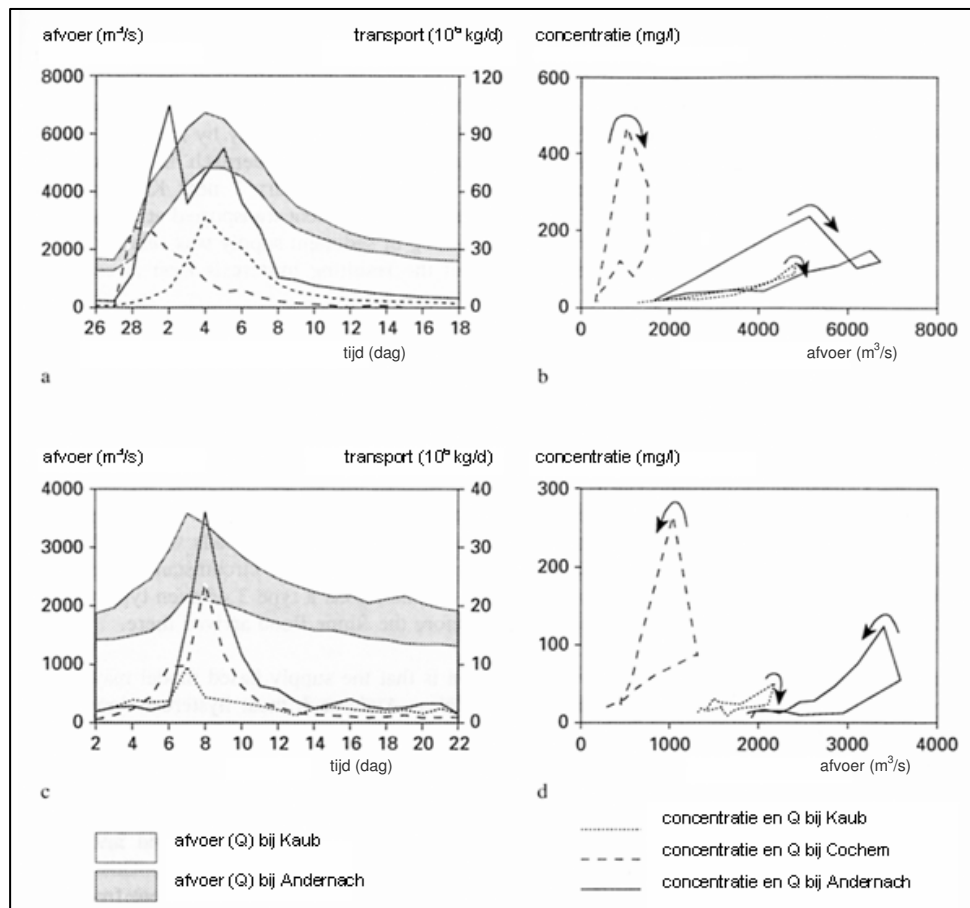
- c. Ten derde is het mogelijk dat sediment pas vrijkomt wanneer een bepaald debiet wordt bereikt of dat sediment vrijkomt door bijvoorbeeld instorting van de oever op het moment dat het waterpeil weer zakt.
- d. Tenslotte bestaat de mogelijkheid dat er geen sedimentvoorraad in de rivierbedding ligt en dat alle sedimentaanvoer afkomstig is van de hellingen (Asselman, 1997).

Asselman (1999) vond dat tijdens deze hysteresis-situatie in de Rijn bij Emmerich-Rees de bovenstroomse zijrivieren Neckar en Main relatief veel sediment leveren. Dit type hysteresis wordt op dit punt tijdens 18% van de hoogwaterperiodes aangetoond maar in slechts 8% van de periodes waarin de afvoer groter was dan 4.000 m³/s. Tijdens sommige gebeurtenissen neemt de sedimentconcentratie benedenstrooms af.

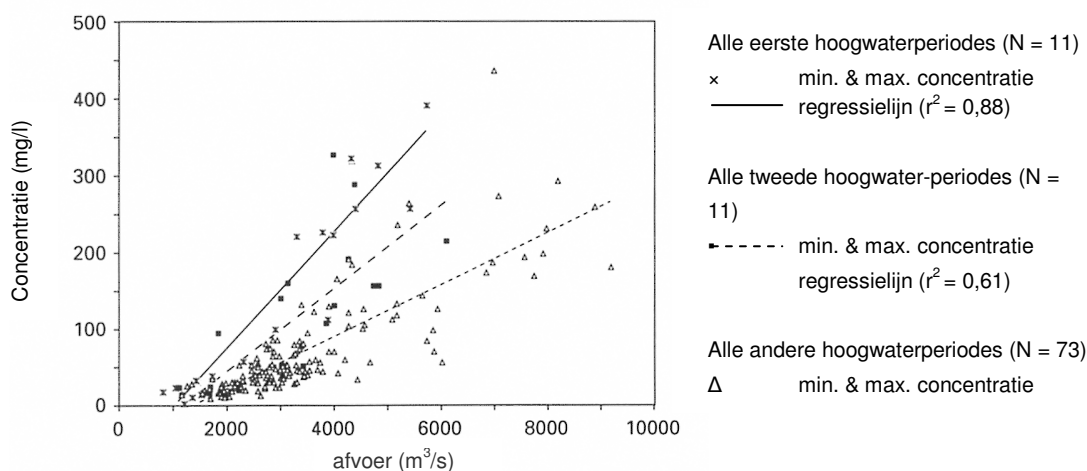
4. Gesloten cyclus/geen hysteresis

Alle zijrivieren leveren ongeveer een gelijke hoeveelheid sediment aan de hoofdrijver en sedimentconcentratie en afvoer nemen in gelijke mate toe en af. Deze situatie doet zich voornamelijk 's zomers voor.

Uit het bovenstaande blijkt dat het moment in een hydrologisch jaar van belang is voor de hoeveelheid sediment die getransporteerd kan worden. Tijdens de eerste hoogwaterperiode is meer sediment beschikbaar voor transport dan tijdens de daaropvolgende momenten van hoog water, want dan is een deel van de sedimentvoorraad al afgevoerd. Dit blijkt ook uit metingen van sedimentconcentraties door Asselman (1997), die zijn vergeleken met afvoer tijdens het eerste hoog water, het tweede hoogwater en de hoogwaterpieken daarna. In figuur 8 is te zien dat de sedimentconcentratie tijdens hoogwater bij gelijk debiet het hoogst is tijdens de eerste gebeurtenis en daarna afneemt.



Figuur 7: Hysteresis-loops voor de rivier de Moezel bij Andernach. a: vroege sedimentaanvoer die resulteert in kloksgewijze hysteresis (b); c: late sedimentaanvoer die resulteert in negatieve hysteresis (d). Gebaseerd op Asselman (1997).



Figuur 8: De sedimentconcentratie tijdens de eerste hoge afvoer in een neerslagseizoen, tijdens de tweede hoge afvoer en de daarna volgende afvoerpieken. De sedimentlast neemt met iedere gebeurtenis af bij gelijk debiet als gevolg van uitputting van de sedimentvoorraad. Uit Asselman (1997).

5.3 Modellen voor de berekening van de sedimentconcentratie

De meest eenvoudige formule voor het berekenen van de sedimentconcentratie is die waarbij de sedimentconcentratie wordt gerelateerd aan debiet:

$$C(t) = aQ(t)^b$$

$C(t)$: concentratie gesuspendeerd sediment op tijdstip 't' [mg/l]

$Q(t)$: waterafvoer op tijdstip 't' [m³/s]

a en b: empirisch verkregen regressiecoëfficiënten. Deze parameters zijn gerelateerd aan eigenschappen van de stroomgeul, zoals morfologie en gradiënt.

Sedimenttransport tijdens een hoogwaterperiode als functie van debiet en de hoeveelheid sediment in voorraad wordt beschreven door het voorraad-model van VanSickle en Beschta (1983). Dit model kan alleen toegepast worden wanneer afname van de sedimentvoorraad plaatsvindt (kloksgewijze hysteresis). Het model:

$$C(t) = aQ(t)^b * g[S(t)]$$

$g[S(t)]$: sedimentafname functie op tijdstip 't'

De sedimentvoorraad is maximaal aan het begin van het hoogwaterseizoen; daarna neemt de functie $g[S(t)]$ af.

$$g[S(t)] = p * \exp\left[r - \frac{S(t)}{S_0}\right]$$

S_0 : de maximale hoeveelheid beschikbaar sediment [kg]

$S(t)$: de hoeveelheid materiaal die in suspensie kan gaan op tijdstip 't' [kg]

p en r : empirisch verkregen, dimensieloze kalibratieparameters. De parameter r drukt de gevoeligheid voor hysteresis-effecten uit; bij locaties met een grote waarde voor r zijn sedimentconcentraties gevoelig voor kleine veranderingen in de omvang van de sedimentvoorraad.

$$\frac{dS(t)}{dt} = -Q(t) * C(t)$$

5.4 Transport van gesuspendeerd materiaal in de Maas en de Rijn

Het stroomgebied van de Rijn heeft als geheel een lage SDR. Van al het sediment dat de rivier bovenstrooms bereikt, bereikt 27% (dat is circa $3,1 * 10^6$ ton/jaar) de Duits-Nederlandse grens (Asselman et al., 2003).

Asselman (2000) heeft voor de Rijn ter hoogte van de Duits-Nederlandse grens de relatie tussen debiet en sedimentconcentratie vastgesteld:

$$C(t) = 29,3 + 1,96 * 10^6 Q(t)^{1,93}$$

Omdat meestal de zwevend stofconcentratie tijdens stijgend debiet hoger is dan tijdens dalend debiet, heeft Doomen (2003) voor de Maas bij Eijsden de volgende relatie tussen debiet en sedimentconcentratie vastgesteld, waarbij rekening wordt gehouden met hysteresis:

$$C = (-4,99 + 0,023 * Q^{1,12}) * H + 7,85$$

H: H=1 bij dalend debiet en H=2 bij een stijgend debiet

In de Maas vindt de hoogste afvoer plaats tijdens de winter. Door erosie in de Ardennen komt bij hoge afvoer veel fijn (65-80% < 63 µm), onverontreinigd materiaal in de Maas terecht (Zwolsman et al., 2000). Doomen (2003) heeft uit visuele interpretatie van tijdreeksen van debiet en zwevend- stofgehalte in de Maas bij Eijsden geconcludeerd dat bij een debiet vanaf 250 m³/s erosie en transport van beddingmateriaal optreden en dat bij een lager debiet sedimentatie plaatsvindt. Voor de Rijn geldt in Nederland ook dat de hoogste afvoer plaatsvindt in de winter. Ter hoogte van Basel wordt echter de hoogste afvoer gemeten in de vroege zomermaanden, als gevolg van de input van smeltwater (RIZA, red. Middelkoop, 1998).

De Maas vervoert jaarlijks 50.000 m³ zand en grind en 300.000 ton slib (Bakker, 2006). Ongeveer 90% van de totale hoeveelheid sediment in de Maas wordt in suspensie getransporteerd en 10% via bodemtransport (Wolters et al., 2001). In de Rijn ter hoogte van Rees wordt circa 93% van het sediment in suspensie getransporteerd (Bundesanstalt

für Gewässerkunde, 1985 in Asselman, 1998) en 85% hiervan bestaat uit klei en silt. De Rijn vervoert per jaar circa $3,1 \cdot 10^6$ ton gesuspendeerd materiaal naar Nederland (Asselman, 1997). Asselman (1997) rapporteert dat de Moezel de belangrijkste leverancier van gesuspendeerd sediment is in het stroomgebied van de Rijn. Een derde van het jaarlijkse sedimenttransport in Nederland wordt door deze zijrivier aangevoerd. De hoogste sedimentopbrengsten ($\text{ton}/\text{km}^2/\text{jaar}$) worden aangetoond in Alpine rivieren ten noorden van Reinfelden in de rivieren Neckar en Moezel.

5.5 Hoeveelheid transport en water- en sedimentkwaliteit

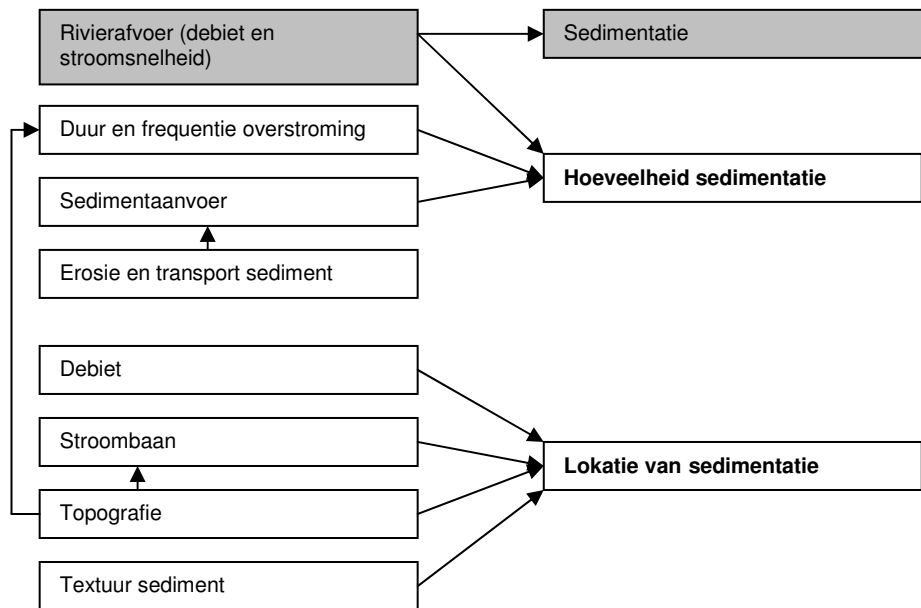
De kwaliteit van het sediment is afhankelijk van de herkomst, de opgeloste verontreinigingen in het water en de samenstelling. Verontreinigingen in de rivier kunnen zijn opgelost in het water en kunnen adsorberen aan een deel (klei en organische stof) van het gesuspendeerde sediment. In het verleden zijn verontreinigende stoffen in grote hoeveelheden in het watersysteem gebracht en geaccumuleerd op de rivierbodems en uiterwaarden. Dit sediment wordt tegenwoordig bedekt door minder verontreinigd sediment. Als gevolg van hogere rivierafvoeren die veroorzaakt worden door veranderingen in klimaat en landgebruik kunnen deze historische verontreinigingen (ook wel ‘altlasten’ genoemd) mogelijk weer in suspensie het watersysteem ingaan (Peñailillo et al., concept 2007). Over het gedrag van historische verontreinigingen van het sediment tijdens extreme afvoeren bestaat echter nog niet voldoende inzicht.

In de Maas neemt over het algemeen de verontreinigingsgraad van het zwevend stof af bij een toename van het debiet. Dit wordt veroorzaakt door de input van schoner sediment dat afkomstig is van bovenstroomse hellingen (Zwolsman et al., 2000; Asselman, 2003; Middelkoop et al., 2003; Van Vliet 2006). Verdunning van het zwevend stof door algenbloei heeft hetzelfde effect (Doomen, 2003). Resuspensie van relatief verontreinigd materiaal op de rivierbodem leidt anderzijds tot een verslechtering van de kwaliteit van het zwevend stof.

In de Rijn wordt de verontreinigingsgraad van het gesuspendeerde materiaal bepaald door de relatieve bijdrage van recent geërodeerd en relatief ‘schoon’ sediment, de hoeveelheid opgeloste verontreiniging en de herverdeling van historische verontreinigingen. Net als bij de Maas, neemt bij de Rijn de verontreinigingsgraad van het sediment toe bij lager debiet. Sedimentconcentraties zijn laag tijdens laag debiet, maar de input van verontreiniging in het riviersysteem gaat door (Peñailillo et al., concept 2007).

6 Sedimentatie

Sedimentatie vindt plaats, wanneer het debiet van de rivier te laag is om sediment verder te transporteren en het wordt afgezet. In figuur 9 worden de belangrijkste factoren schematisch weergegeven. Volgens Thonon (2006) zijn de belangrijkste factoren die sedimentatie op uiterwaarden bepalen in volgorde van aflopend belang: topografie, overstroming en gesuspendeerd sediment.



Figuur 9: Factoren die van invloed zijn op sedimentatie.

6.1 Rivieraafvoer bepaalt sedimentatie

Of sedimentatie plaatsvindt wordt bepaald door de afvoersnelheid van de rivier. Tijdens hoge afvoer vindt vooral erosie in de rivier plaats; bij lagere afvoer vindt vooral sedimentatie plaats. Tijdens overstroming van de uiterwaarden vindt ter plaatse van het overstromingsgebied een daling van het debiet plaats als gevolg van het grotere oppervlak. Daardoor treedt op deze plaatsen veel sedimentatie op. Bij grotere stroomsnelheden kan grover materiaal worden aangevoerd waardoor ook grover materiaal zal sedimenteren. Naast de stroomsnelheid is ook de beschikbaarheid (de aanvoer) van materiaal met een bepaalde korrelgrootte bepalend voor de textuur van het materiaal dat gesedimenteerd wordt.

6.2 Omvang sedimentatie

De hoeveelheid materiaal die per oppervlakte-eenheid wordt afgezet, is afhankelijk van de duur van het sedimentatieproces, de frequentie, het debiet en de hoeveelheid beschikbaar sediment die door transport wordt aangeleverd.

Topografie is bepalend voor de duur van de overstroming van uiterwaarden, de stroombanen en de stroomsnelheid (Asselman en Middelkoop, 1995). Vooral de aanwezigheid van een natuurlijke drempel of een dijk is hierbij van belang (Thonon, 2006). Niet alleen de overstromingsfrequentie maar ook de hoeveelheid sediment die

wordt aangeleverd wordt lager door de aanwezigheid van een drempel of dijk. Daarnaast verlagen dergelijke obstakels de stroomsnelheid van het water en blijft na terugtrekking van het water, een deel van het water achter als stilstaand water waardoor sedimentatie toeneemt. Als gevolg van verhoogde schuifspanning tussen water en bodem ter plaatse van een drempel of dijk kunnen mogelijk vlokken (van colloïdale deeltjes) afgebroken worden. Thonon (2006) vermoedt dat dit een verklaring is voor het aantonen van kleinere vlokken ter plaatse van een uiterwaard van de Rijn zonder dijk dan bij een uiterwaard die begrensd wordt met een lage dijk. Naast de aanwezigheid van een dijk of een natuurlijke drempel zijn hoogte (van het maaiveld) en de aanwezigheid van depressies de belangrijkste topografische kenmerken van de uiterwaarden die sedimentatie beïnvloeden.

De verhouding tussen breedte van de stroomgeul en de uiterwaarden is mede bepalend voor het sedimentatieproces (Thonon, 2006). Smalle rivieren hebben een grotere afvoersnelheid, waardoor meer sediment wordt aangevoerd dan in brede rivieren. Op de uiterwaarden, waar de stroomsnelheid lager is kan bij een groter oppervlak relatief meer sediment afgezet worden.

Over het algemeen neemt sedimentatie toe wanneer de omvang van een overstroming toeneemt. Asselman en Middelkoop (1998) onderzochten de efficiëntie van sedimentatie tijdens overstromingen van verschillende omvang (verschillende debieten). Het onderzoek heeft plaatsgevonden op twee uiterwaarden die door een drempel begrensd worden van de hoofdstroom: de Variksche Plaat (VP) langs de Waal en de Keentse uiterwaard (KE) langs de Maas. Ter plaatse van de laaggelegen VP bleek een middelhoge afvoer tot de meest efficiënte sedimentaccumulatie op de uiterwaarden te leiden; bij hogere afvoerwaardes werd de kritische maximale stroomsnelheid voor het bezinken van gesuspendeerd materiaal overschreden. Omdat daarnaast vaker overstromingen van een matige grote omvang plaatsvinden dan overstromingen van grote omvang, wordt verwacht dat bij VP overstromingen met een matig hoge afvoer het belangrijkste zijn voor het sedimentatieproces. Bij de hoger gelegen uiterwaarden zoals KE, nemen sedimentatiewaardes (km/m^2 per dag) toe bij een toename van het debiet.

6.3 Locatie sedimentatie

De locatie waar sedimentatie plaatsvindt, is afhankelijk van de stroombaan, die wordt bepaald door de topografie. Daarnaast bepalen debiet en de textuur van het sediment hoever bepaalde fracties getransporteerd worden en dus waar het materiaal wordt afgezet.

Op schaal van het rivierstroomgebied vindt sedimentatie voornamelijk plaats in de lager gelegen, vlakke delen in het benedenstroomse gedeelte van de stroomgebieden van de Rijn en de Maas, omdat daar de stroomsnelheid lager is en daarmee de sleepkracht ook.

In de uiterwaarden neemt sediment-accumulatie af, naarmate de afstand vanaf de hoofdstroom toeneemt. Grover sediment wordt dicht bij de hoofdstroom afgezet. Fijner materiaal kan verder worden getransporteerd, waardoor het op grotere afstand van de hoofdstroom wordt afgezet. Sediment blijft achter in lager gelegen delen van de uiterwaarden, wanneer het waterpeil zakt en de rivier zich terugtrekt. In box 1 worden de resultaten van een onderzoek van Asselman en Middelkoop beschreven naar

sedimentatiepatronen op twee uiterwaarden: de Variksche Plaat (VP) langs de Waal en de Keentse uiterwaard (KE) langs de Maas.

6.4 Modellen voor de berekening van de sedimentatie

Thonon (2006) berekende de jaarlijkse sedimentatie op uiterwaarden langs de Rijn met de volgende formules; gebaseerd op de vergelijking van Partheniades-Krone voor erosie, maar dan met een kritische schuifspanning voor sedimentatie :

$$C_t = C_{t-1} * \left(1 - e^{(\alpha * \omega_{s,e} / h) dt}\right), \text{ waarbij } \alpha = 1 - (\tau / \tau_{cr}) \text{ voor } \tau < \tau_{cr}$$

$$D = \left[\sum_{i=1}^n \omega_{s,e} * (C_i * \alpha_i * T_i) \right] + (f_{pond} * h_{pond} * 10^{-3})$$

C_t :	gesuspendeerd sedimentconcentratie na iedere tijdstap [mg/l]
C_{t-1} :	gesuspendeerd sedimentconcentratie tijdens voorgaande tijdstap [mg/l]
$\omega_{s,e}$:	effectieve bezinksnelheid [m/s]
h :	waterdiepte [m]
dt :	tijdstap [s]
τ :	schuifspanning stroming [Pa]
τ_{cr} :	kritische schuifspanning voor sedimentdepositie [Pa]
D :	jaarlijkse sedimentdepositie [kg/m ² per jaar]
T_i :	gemiddelde jaarlijkse duur van een debietklasse [s]
f_{pond} :	overstromingsfrequentie uiterwaard
h_{pond} :	waterniveau tijdens overstroming van de uiterwaard [m]
C_i :	gesuspendeerd sedimentconcentratie tijdens de overstroming [mg/l]
i :	debietklasse
n :	aantal debietklassen

6.5 Sedimentatie in het stroomgebied van de Maas en de Rijn

Zoals reeds in hoofdstuk 5 werd genoemd, zal in de Maas ter hoogte van Eijsden bij een debiet lager dan 250 m³/s sedimentatie plaatsvinden (Doomen, 2003).

Circa een derde van het slib dat de Rijn meevoert, bereikt de Noordzee. Het overige gedeelte wordt gesedimenteerd in het benedenstroomse gedeelte van de rivier (Middelkoop, 1998). Van de jaarvrucht van de Maas blijft circa 50% achter in het riviersysteem; waarbij ongeveer 70% van de sedimentatie plaatsvindt in de uiterwaarden van de Grensmaas, van de Nederlands/Belgische grens tot Roermond, en 30% langs de Zandmaas van Roermond tot Den Bosch (Doomen, 2003).

Thonon heeft met gegevens van de Afferdensche & Deetsche Waarden langs de Rijn de effectieve bezinksnelheid vastgesteld op een waarde van $6,7 \cdot 10^{-5}$ m/s. Uit diverse andere onderzoeken blijkt dat bij gebruik van deze waarde, de kritische schuifspanning voor depositie van sediment 2,0 Pa bedraagt. Asselman en Van Wijngaarden (2002, in Thonon) hebben berekend dat in de lage Rijn de sedimentatie op jaarbasis circa 1,7 kg/m² bedraagt. Thonon berekende dit voor twee gebieden: de Boven Waal (1,4 kg/m²) en de Midden Waal (1,6 kg/m²). De meeste sedimentatie vindt plaats op uiterwaarden met een natuurlijke drempel langs de hoofdstroom of een dijk.

Voor het verminderen van sedimentatie in havens zijn diverse maatregelen mogelijk die worden behandeld in Bolleboom en V.d Wal (2003), zoals het verkleinen van de doorgang van de haven, een stroomgeleidingswand bij de toegang van de haven of een palenrij waardoor de overgang in stromingssnelheid tussen rivier en haven geleidelijker verloopt. Voor meer informatie over deze en andere maatregelen wordt verwezen naar de rapportage van Bolleboom en V.d Wal.

Sedimentatiepatronen op twee uiterwaarden: de Variksche Plaat langs de Waal en de Keentse uiterwaard langs de Maas

Asselman en Middelkoop (1995) onderzochten tijdens een hoogwaterperiode in 1993 de sedimentatiepatronen in een gedeelte van twee uiterwaarden: de Variksche Plaat langs de Waal en de Keentse uiterwaard langs de Maas. Beide uiterwaarden worden alleen gebruikt voor zomerbegrazing. Het overstromingsgebied werd verdeeld in vier gedeeltes:

- de natuurlijke drempel evenwijdig aan de hoofdstroom;
- het bovenstroomse gebied achter de drempel;
- het benedenstroomse gedeelte achter de drempel;
- het centrale gedeelte van het overstromingsgebied.

De Keentse uiterwaard is gevormd door afsluiting van een meanderbocht aan het begin van de twintigste eeuw. Het oppervlak achter de natuurlijke drempel evenwijdig aan de hoofdstroom loopt geleidelijk af richting de rivier en er zijn geen depressies aanwezig. De uiterwaard wordt gemiddeld eens in de twee tot drie jaar overstroomd. De Variksche Plaat is lager gelegen en overstroomt gemiddeld twee tot drie keer per jaar. De Plaat kent een complexer reliëf dan de Keentse uiterwaard. De hoogste delen zijn het bovenstroomse gedeelte en de drempel. De hoogte van het oppervlak neemt geleidelijk af richting het benedenstroomse gedeelte. Tussen de plaat en de oudere uiterwaard bevindt zich een depressie die een oude stroombaan markeert. In het benedenstroomse gebied zijn enkele depressies aanwezig.

Op beide uiterwaarden vindt de grootste hoeveelheid sedimentatie plaats ter plaatse van de drempel, waar het sediment gekenmerkt wordt door zandig materiaal en een laag organische stofgehalte. De Variksche Plaat kent een complexer reliëf dan de Keentse uiterwaard waardoor sedimentatiepatronen dat ook zijn. Hier worden grote hoeveelheden sediment aangetroffen op het stoomafwaartse gedeelte van de uiterwaard en in gesloten depressies.

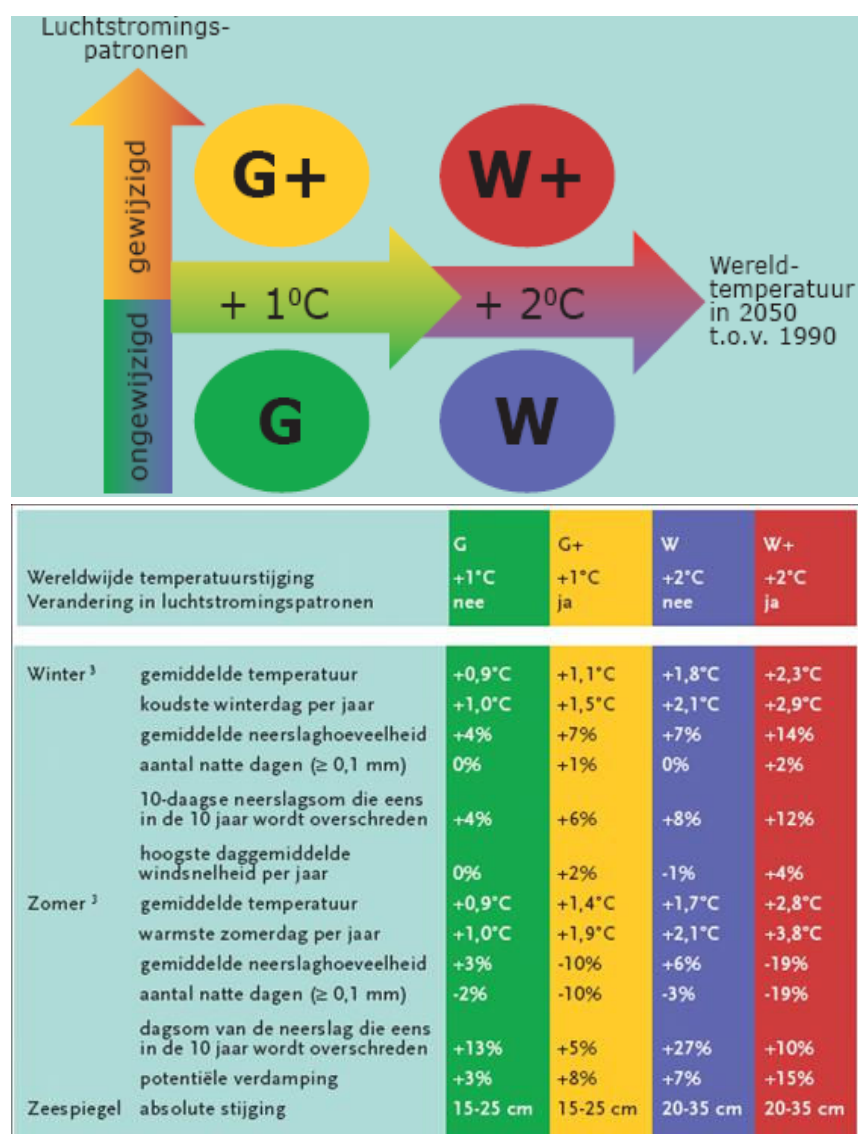
In 1998 onderzochten Asselman en Middelkoop (1998) de veranderingen in sedimentatiepatronen bij verschillende debieten tijdens overstroming. Hieruit bleek dat er weinig veranderingen werden aangetoond bij de Keentse uiterwaard. Op de Variksche Plaat werden wel verschillen aangetoond. Tijdens hoge afvoer wordt het sedimentatiepatroon gedomineerd door maximale sedimentatie van zand nabij de hoofdstroomgeul. De sedimentatie neemt exponentieel af bij een toenemende afstand

Box 1: Resultaten van onderzoeken naar sedimentatiepatronen op twee uiterwaarden door Asselman en Middelkoop.

7 Effecten van klimaatveranderingen en socio-economische veranderingen op erosie, transport en sedimentatie

7.1 Klimaatverandering

De verhoogde uitstoot van broeikasgassen in de twintigste eeuw zal mede leiden tot klimaatverandering. Sommige effecten van het veranderende klimaat worden al waargenomen. De voornaamste veranderingen zijn naar verwachting een stijging van de temperatuur, stijging van de zeespiegel, een grotere frequentie van extreme neerslag en afvoer van water door de rivieren in de winterperiode en een grotere frequentie van zomerdroogte als gevolg van een toegenomen verdamping, en weinig aanvoer van water via de rivieren in de zomer.



Figuur 10: De vier KNMI'06 scenario's voor 2050 (Van den Hurk et al., 2006b).

De Commissie Waterbeheer 21^{ste} eeuw heeft in 2000 klimaatscenario's opgesteld (WB21 scenario's). Het KNMI heeft deze scenario's in 2006 volgens de nieuwste inzichten (IPPC) aangepast (Van den Hurk et al., 2006a). Het KNMI onderscheidt vier klimaatscenario's (zie figuur 10). Dit zijn een gematigd en een warmscenario, en de extreme varianten ervan, kortweg G, G+, W en W+.

De effecten op temperatuur, neerslag, wind, potentiële droogte en zeespiegelstijging zijn berekend voor de jaren 2050 en 2100. De KNMI scenario's kunnen gezien worden als een regionale vertaling van de mondiale effecten die opgesteld zijn door de IPPC.

Asselman (1998) heeft een analyse gemaakt van de effecten van de verwachte klimaatverandering in het Rijnstroomgebied voor 2050 op rivierafvoer, erosie en sedimenttransport. Voor de analyse zijn de Business as Usual (BaU)-best en UKHI (United Kingdom Meteorological Office High Resolution GCM Equilibrium Experiment) klimaatscenario's gebruikt. De scenario's zijn gericht op veranderingen in gemiddelde waarden en niet op extremen. Middelkoop en Kwadijk (2001) refereren in een studie naar de gevolgen van klimaatveranderingen op watermanagement van de Rijn en de Maas naar diverse projecties van het UKHI-scenario. Hieruit komen andere waarden voor de veranderingen in temperatuur en neerslag naar voren dan in het onderzoek van Asselman. Uit de verschillende klimaatscenario's komt het volgende beeld naar voren voor klimaatveranderingen in het stroomgebied van de Rijn tot 2050:

- Zowel 's zomers als 's winters zal de temperatuur enkele graden stijgen. De grootste stijging wordt verwacht in de winter; hierbij worden geen grote regionale verschillen verwacht;
- De neerslag zal afnemen tijdens de zomer of licht toenemen, vooral in het noordelijke (stroomgebied van de Sieg, Ruhr en Lahn) en laaggelegen gedeelte van het stroomgebied; in de winter neemt de neerslag overal toe.

Van Vliet (2006) beschrijft een literatuurstudie naar klimaatveranderingen en de effecten daarvan op het afvoerregime van de Maas: Uit modelsimulaties van De Wit et al. (2001) op basis van het in het Nationaal Onderzoeksprogramma Klimaatverandering (NOP) genoemde HadCM2Gsal klimaatscenario en Mix-scenario's (vijf wereldwijde klimaatscenario's) blijkt dat naast een stijging van de gemiddelde jaartemperatuur een vermindering van neerslag in de zomer en een toename in de winter wordt verwacht in de periode 2070-2099 ten opzichte van 1961-1990. Uit de scenario's die Van Vliet en Middelkoop en Kwadijk blijkt dat in het stroomgebied van de Maas de volgende klimaatveranderingen verwacht worden:

- Zowel in de zomer als in de winter stijgt de temperatuur. Volgens het UKHI-scenario zoals dat door Middelkoop en Kwadijk is beschreven, is de stijging van de temperatuur in het stroomgebied van de Maas hoger dan in het stroomgebied van de Rijn;
- Volgens de UKHI-projecties en het droge scenario van Beersma neemt de neerslag in de zomer af (evenals in de G+ en W+ scenario's van het KNMI, red.). De standaardscenario's van het KNMI voorspellen een toename van de neerslag. De neerslag neemt volgens alle drie de scenario's toe in de winter.

Klimaatscenario's hebben een grote onbetrouwbaarheid in de voorspelling van klimaatveranderingen (voorspellingen van verschillende modellen variëren sterk) Voor details over de uitkomsten van de diverse klimaatscenario's wordt verwezen naar de literatuur.

7.2 Socio-economische veranderingen

In Nederland is door het Centraal PlanBureau, het Milieu- en NatuurPlanbureau en het Ruimtelijk PlanBureau de studie ‘Welvaart en Leefomgeving (WLO)’ uitgevoerd waarin wordt onderzocht hoe Nederland zich tot ontwikkelt (Janssen et al, 2006). Er zijn vier scenario’s ontwikkeld die voortbouwen op de in 2003 uitgebracht CPB-studie ‘Four futures for Europe’. De scenario’s verschillen vooral in de mate waarin landen bereid en in staat zijn internationaal samen te werken en in de verdeling tussen publieke en private verantwoordelijkheden. In tabel 3 worden de WLO-scenario’s samengevat.

Tabel 3: Samenvatting van de vier WLO-scenarios voor Nederland tot 2040 (op basis van <http://www.welvaartenleefomgeving.nl>).

Strong Europe • Immigratie vooral van gezinsmigranten • Hoge bevolkingsgroei • Europese integratie succesvol • Mondiale handel met milieurestricties • Effectief internationaal milieu- en klimaatbeleid • Nadruk op publieke voorzieningen	Global Economy • Immigratie belangrijk • Hoogste bevolkingsgroei • Europese economische en monetaire integratie belangrijk. • Mondiale vrijhandel • Hoge economische groei • Geen effectief internationaal milieubeleid • Nadruk op private voorzieningen
Regional Communities • Immigratie beperkt tot asielmigranten • Bevolking krimpt vanaf 2020 • Geen verdere Europese integratie • Handelsblokken blijven gehandhaafd • Laagste economische groei • Effectief nationaal milieubeleid • Nadruk op publieke voorzieningen	Transatlantic Market • Immigratie beperkt tot werkmigranten • Bevolking stabiliseert rond 2030, daarna lichte afname • Europese integratie alleen op economisch gebied • Handelsblokken en importheffingen blijven gehandhaafd • Geen effectief milieubeleid • Nadruk op private voorzieningen

Evenals klimaatscenario’s, hebben ook socio-economische modellen en modellen voor landgebruik die daarop gebaseerd zijn een zeer grote onzekerheid.

7.2.1 Stroomgebied van de Rijn

Asselman (1998) beschouwt een scenario van Veeneklaas et al. (1994, in Asselman, 1998) voor veranderingen in landgebruik als gevolg van autonome factoren en klimaatveranderingen voor de periode 2040-2049: het Central Projection Climate change-scenario (CPC) dat gebaseerd is op het BaU-klimaatscenario. Het scenario voorspelt een verhoging van de gewasopbrengst als gevolg van de temperatuurstijging in het stroomgebied. Vanwege een dalende bevolkingsgroei zal de vraag naar gewassen echter dalen. De combinatie van hogere productiviteit en een lagere vraag zullen naar verwachting leiden tot een afname het landbouwareaal. Deze conclusie is echter discutabel. Mogelijk is de respons van landbouwproductie op lokale bevolking zeer gering. Naast het CPC-scenario bestaat ook het Central Projection (CP) scenario dat alleen uitgaat van veranderingen in landgebruik als gevolg van socio-economische veranderingen.

In de karakterisering van het werkgebied Rijndelta door het coördinatiebureau Rijn en Maas (2005) wordt tot 2015 in het werkgebied Rijndelta een stijging van de bevolking voorspeld van circa 6,4%. Voor de landbouwsector wordt een groei verwacht in de subsectoren akkerbouw, glastuinbouw, open grondtuinbouw en combinatiebedrijven.

7.2.2 Stroomgebied van de Maas

In het kader van de economische analyse van het stroomgebied, voor de verplichtingen van de KRW, is een basisscenario opgesteld waarin de te verwachten ontwikkelingen in verschillende sectoren wordt beschreven voor de periode tot 2015 (Internationale Maascommissie, 2005). Hieruit blijkt dat in alle landen, met uitzondering van Duitsland, een afname van landbouwactiviteiten verwacht wordt. Dit effect is vooral het gevolg van de voorziene afname van de intensieve veehouderij. De industrie zal volgens het scenario geen toename of afname van activiteiten ondergaan. In alle landen in het stroomgebied (voor Nederland wordt geen verwachting uitgesproken) wordt een groei verwacht in de sector 'handel en diensten'. In Wallonië, Luxemburg en Duitsland wordt een groei van de bevolking voorspeld. In Vlaanderen en Nederland zal de bevolking gelijk blijven of stijgen en dat geldt ook voor het stroomgebied als geheel. Frankrijk is het enige land waar een daling van de bevolking wordt verwacht. In tabel 4 worden de verwachte veranderingen samengevat.

Tabel 4: Verwachte veranderingen in diverse sectoren in het stroomgebied van de Maas tot 2015 (Gebaseerd op Internationale Maascommissie, 2005).

Sector	ISGD Maas	Frankrijk	Wallonië	Luxemburg	Vlaanderen	Duitsland	Nederland
Bevolking	0/+	-	+	+	0/+	+	0/+
Landbouw	-	-	-	0	-	0/+	-
Industrie	0	0	0	0	0	+	0
Handel en diensten	+	+	+	+	+	+	n.b.
Waterzuivering	0/+	+	+	+	0/+	0/+	0
ISGD :internationaal stroomgebiedsdistrict							
+ :	stijging						
- :	daling						
0 :	geen ontwikkeling						

7.3 Effecten van klimaatveranderingen

7.3.1 *Sneeuwvoorraad*

Bij een stijgende wintertemperatuur zal de sneeuw- en ijsvoorraad in het stroomgebied van de Rijn afnemen. Bij een stijging van de wintertemperatuur met 4°C zal de sneeuwgrens in de Alpen 700 meter stijgen (Kwadijk, 1993). De Maas is een regenrivier, zonder grote ijs- of sneeuwvoorraden in het stroomgebied, en wordt dus niet of nauwelijks beïnvloed door verandering van deze voorraad.

7.3.2 *Zeespiegelstijging*

Als gevolg van uitzetting van water, smelten van ijs en bodemdaling zal de zeespiegel aan de Nederlandse kust ten opzichte van het bodemniveau volgens de KNMI-scenario's naar verwachting tot 2050 stijgen met 15-35 cm en tot 2100 met 35-85 cm (Van den Hurk, 2006), afhankelijk van gekozen scenario.

Als gevolg van de zeespiegelstijging zal het waterniveau in het IJsselmeer, bij onveranderd management, tijdens de winter het grootste deel van de tijd hoger zijn dan het huidige streefniveau. In de zomer zal het waterniveau als gevolg van een lagere toevoer van Rijnwater te laag zijn (Middelkoop en Kwadijk, 2001). Het is echter aannemelijk dat het peilregime voor het IJsselmeer gaat veranderen en extra spuwcapaciteit gerealiseerd wordt in de afsluitdijk. De overheid is momenteel het Rijksbeleid aan het formuleren voor het IJsselmeergebied. Verschillende varianten zijn mogelijk: meestijgen met de zeespiegelstijging zodat onder vrij verval water gespuid kan worden naar de Waddenzee of de huidige peilen handhaven en na verloop van tijd pompcapaciteit op de Afsluitdijk plaatsen. Aanvullend vindt er een discussie plaats over een seizoensvolgend peil. Dat houdt in dat in het vroege voorjaar het peil verhoogt wordt (water te gebruiken als zoetwatervoorraad) en door het gebruik in de loop van de zomer weer uitzakt.

7.3.3 *Landgebruik*

De veranderingen in temperatuur en neerslag zullen in Europa leiden tot een verlenging van het groeiseizoen en een verschuiving van de teelt van specifieke gewassen van zuid naar noord. Recreatieve functies van het landschap zullen veranderen. In de literatuur wordt niet beschreven wat het effect van verplaatsing en opheffen van skipistes is op erosie. In drogere zomerperiodes is meer inname van water te verwachten voor landbouw, industrie en drinkwater. Als gevolg van verzilting is ook meer zoet water nodig voor het doorspoelen van polders (Middelkoop en Kwadijk, 2001). Het is echter ook mogelijk dat verzilting van bepaalde gebieden wordt geaccepteerd.

7.3.4 *Rivierafvoer*

De klimaatveranderingen lijken voor de Rijn geen of nauwelijks effect te hebben op de totale jaarlijkse afvoer. De frequenties van zeer lage en zeer hoge afvoer zullen wel toenemen (Asselman, 1998). Kwadijk (1993) onderzocht ook het effect van klimaatveranderingen op rivierafvoer van de Rijn en concludeert dat de rivierafvoer zeer gevoelig is voor veranderingen in de sneeuwvoorraad in het stroomgebied. Als

gevolg van verminderde toevoer van smeltwater in de zomer verandert de Rijn van een gecombineerde smeltwater- en regenrivier in overwegend een regenrivier. De jaarlijkse variatie in afvoer zal hierdoor ook veranderen; 's zomers neemt deze af en in de winter zal de afvoer hoger worden (Middelkoop en Kwadijk, 2001). Veranderend landgebruik en verlenging van het groeiseizoen spelen ook een belangrijke rol bij veranderingen in afvoer. Evapotranspiratie en vochtgebruik door vegetatie veranderen hierdoor.

Van Vliet (2006) beschrijft in een literatuurstudie drie onderzoeken naar veranderingen in afvoerregime van de Maas onder invloed van klimaatveranderingen. In De Wit et al. (2001) zijn op basis van het NOP (HadCM2Gsal klimaatscenario) en Mix-scenario's (vijf wereldwijde klimaatscenario's) met de hydrologische modellen MEUSEFLOW en SCHEME simulaties uitgevoerd voor de veranderingen in afvoer van de Maas bij de Nederlands-Belgische grens. Hieruit blijkt een toename van de gemiddelde afvoer laat in de winter en vroeg in de lente en een afname van de gemiddelde afvoer in de herfst. Van Deursen (2002, in Van Vliet, 2006) heeft ook het MEUSEFLOW-model toegepast, maar met de standaard KNMI-klimaatscenario's uit 2001 als input. Met die simulatie wordt voorspeld, dat een afname van de neerslag in de zomer en een toename van de temperatuur niet leiden tot lagere jaarlijkse rivierafvoeren. Dit is mogelijk te wijten aan het compenserende effect van grotere grondwateraanvulling tijdens de nattere periode. Booij (2005, in Van Vliet, 2006) heeft met het Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning-model (HBV) berekend dat klimaatveranderingen zullen leiden tot grotere variabiliteit in afvoer en een toename in frequentie en range van extreme afvoeren. Deze veranderingen zijn het gevolg van een toename van de neerslagvariabiliteit en het optreden van extreme neerslag. Gellens en Roulin (1998, in Van Vliet, 2006) hebben met diverse scenario's berekend wat het effect van klimaatveranderingen zijn op de frequentie van het voorkomen van laag water. Dit heeft niet geresulteerd in een eenduidige of meest voorkomende richting van deze effecten.

7.3.5 *Overstromingen en maatregelen hiertegen*

De ontwerp-afvoer van een rivier is de afvoer die eens in de 1250 jaar voorkomt en geldt als veiligheidsstandaard (normfrequentie). Volgens Middelkoop en Kwadijk (2001) zal de ontwerp-afvoer in de toekomst toenemen als gevolg van verhoogde winterafvoeren: onder condities volgens het centrale UKHI-scenario voor de Rijn tot 5% in 2050 en tot 10% in 2100. Voor de Maas kunnen die relatieve veranderingen wel twee maal zo groot zijn.

Booij (zie 4.3.4) voorspelt een lichte toename in overstromingen van de Maas. Gellens en Roulin (1998) voorspellen op basis van toepassing van het Integrated Runoff Model—F. Bultot model (IRMB-model) op Belgische zijstroomgebieden van de Maas een grotere frequentie van overstromingen in de wintermaanden.

Een verhoogde zeespiegel en verhoogd waterniveau in het IJsselmeer belemmeren de afvoermogelijkheden van de rivieren die hierin uitmonden. In de winter kan dit leiden tot zeer hoge grondwaterniveaus en mogelijk overstroming van laaggelegen polders.

Eén van de maatregelen die kunnen worden genomen ter beheersing van rampen bij overstroming van de Maas of de Rijn is het aanwijzen van noodoverloopgebieden. In de rampenbeheersingsstrategie van het Ministerie van Verkeer & Waterstaat (2006)

worden potentiële gebieden aangewezen. Daarnaast kan het land naast de rivier beschermd worden door harde maatregelen zoals (hogere of zwaardere) dijken.

7.4 Effecten van veranderingen in klimaat en landgebruik op erosie

Volgens Asselman (1998) zullen veranderingen in landgebruik (vooral een afname in landbouwareaal) in het stroomgebied van de Rijn in 2050 naar verwachting leiden tot een daling van de erosiewaardes met ongeveer 15%. Klimaatveranderingen zullen echter de erosie door regen doen toenemen waardoor per saldo in het gebied benedenstrooms van Basel een lichte afname, van circa 4%, in erosiewaardes wordt verwacht. Asselman et al. (2003) verwachten op basis van UKHI-klimaatscenario's en landgebruikveranderingen (CPC-scenario) een toename van de erosie in de Alpen en een afname in het Duitse gedeelte van het Rijnstroomgebied. Voor het gehele stroomgebied wordt een toename van circa 12 % verwacht. De sedimenttoevoer zal als gevolg hiervan in de Alpen toenemen met 250%. In Duitsland zal de sedimenttoevoer in het Rijnstroomgebied afnemen met 5 tot 40%, voornamelijk als gevolg van een afname van het landbouwareaal.

De toename van de erosiviteit zal als gevolg van meer extreme neerslagbuien zal ook in het stroomgebied van de Maas plaatsvinden. Net als in het stroomgebied van de Rijn wordt een afname van het oppervlak aan agrarisch gebied verwacht. Deze afname is vooral het gevolg van afname van de intensieve veehouderij. Vooral akkers zijn gevoelig voor erosie. Intensieve veehouderij vindt grotendeels plaats in schuren deels op grasland en veranderingen hierin zullen op zich nauwelijks effect hebben op erosie.

7.5 Effecten van veranderingen in klimaat en landgebruik op transport

Als gevolg van een afname van de totale erosie bovenstrooms, zal de totale sedimentlast van de Rijn bij Rees tijdens afvoeren van meer dan 1.500 m³/s afnemen met 15% (Asselman, 1998). Hierbij wordt ervan uitgegaan dat er geen veranderingen optreden in de Sediment Delivery Ratio (SDR) en dat de afname van de sedimentlast alleen het gevolg is van de veranderingen in landgebruik. Het gecombineerde effect van veranderingen in landgebruik en klimaatveranderingen leiden naar verwachting tot een daling in de sedimentlast bij Rees van 3%. De onzekerheden van alle scenario's zijn groot en aannames zoals een onveranderde SDR zijn waarschijnlijk niet reëel. Bovenstaande voorspellingen moeten dan ook als zeer indicatief worden beschouwd. In 2003 voorspellen Asselman et al. dat ondanks een verwachte toename van de erosie in het stroomgebied als geheel, en vooral in de Alpen, de jaarlijkse sedimentlast bij Rees af zal nemen met 13%. Circa 85% van het sediment zal namelijk worden afgezet in meren en andere opslaglocaties en wordt niet stroomafwaarts getransporteerd. Tijdens afvoer tussen 2.00 en 7.500 m³/s zal de sedimentlading lager zijn en het totale sedimenttransport bij extreem hoge en lage afvoeren zal toenemen. Vanwege de lagere sedimenttoevoer tijdens een afvoer tussen 2.000 en 7.500 m³/s wordt verwacht dat de sedimentatie op lage uiterwaarden zal afnemen. De sedimentatie op hoger gelegen uiterwaarden die slechts bij zeer hoge afvoer overstromen zal hierdoor niet beïnvloed worden.

Van Dijk en Kwaad voegen hier in 1999, op basis van dezelfde scenario's als in Asselman (1998), aan toe dat stroomafwaarts van de Alpen processen gerelateerd aan sneeuwval, sneeuwbedekking en sneeuwmelt in 2050 minder belangrijk zullen worden in Frankrijk en Duitsland. Hierdoor zullen de temporele erosie- en

sedimenttoevoerpatronen veranderen. In de Alpen zullen erosie en sedimenttoevoer naar verwachting significant toenemen. Sediment dat wordt aangevoerd vanuit de Alpen, wordt hoofdzakelijk opgeslagen in de meren aan de voet van de Zwitserse Alpen. De hoeveelheid bodemerosie en de sedimentvoorraad die wordt getransporteerd naar de beken en rivieren en uiteindelijk potentieel beschikbaar komt voor transport naar Nederland zal ongeveer 11% afnemen. Indien het landgebruik ten opzichte van 1990 gelijk blijft, zal de sedimenttoevoer stijgen.

7.6 Effecten van veranderingen in klimaat en landgebruik op sedimentatie

De impact van klimaatveranderingen op de sedimentatie in uiterwaarden van de Rijn is veel sterker dan de impact op het totaal jaarlijkse sedimenttransport. In tegenstelling tot de verwachte daling van de totale sedimentlast zal de jaarlijkse hoeveelheid sedimentatie op de uiterwaarden toenemen op basis van het BaU-scenario voor klimaatveranderingen en veranderend landgebruik. Deze toename van de sedimentatieefficiëntie is vooral het gevolg van een grotere frequentie van hoge afvoer. Ter plaatse van overstromingsgebieden die laag gelegen zijn ten opzichte van het waterpeil in hoofdstroom, zal de toename minder dan 20% bedragen en op de hoger gelegen delen, die beschermd zijn door een lage rivierdijk, 20 tot 40%. De absolute toename in sedimentatie is het grootst op de laaggelegen delen van de uiterwaarden die niet beschermd zijn door een dijk (Assleman, 1998). Thonon (2006) voorspelt een toename van de sedimentatie op de uiterwaarden van de Rijn tot 2050 met 13% als gevolg van klimaatveranderingen en 12 % als gevolg van het gecombineerde effect van klimaatveranderingen en veranderingen in landgebruik.

Waarschijnlijk leidt een toename van het aantal overstromingen van de uiterwaarden van de Maas ook tot een toename van de sedimentatie.

8 Conclusie

8.1 Sturende factoren van erosie, transport en sedimentatie

Binnen het stroomgebied van de Maas vindt erosie op de hellingen voornamelijk plaats in de Ardennen en het heuvellandschap in Zuid-Limburg. Erosie van het rivierbed vindt plaats in delen van de rivier waar de stroomsnelheid groot is. In het stroomgebied van de Rijn vindt de meeste erosie plaats in de Alpen. Niet alleen de omvang van de aanlevering van sediment maar ook de kwaliteit van het sediment is van belang bij het beheer van het oppervlaktewater en de bodems. De herkomst van het sediment is hierbij mede bepalend.

Erosie aan land kan beïnvloed worden door de bodem te beschermen tegen de erosiviteit van water of wind, of door het vergroten van de weerstand van de bodem tegen erosie. Vegetatiebedekking is hier geschikt voor, maar hierbij moet worden gelet op het feit dat de groeivorm van sommige vegetatietypes zorgt voor geconcentreerde toevoer van neerslag naar de bodem, waardoor erosie juist bevorderd wordt. Landgebruik is dan ook van invloed op de erodibiliteit van de bodem.

Weerstand van de bodem tegen erosie kan het best worden beïnvloed door verbetering van de structuur van de bodem. Vegetatietype en -omvang hebben invloed op de structuur van de bodem. Daarnaast houdt vegetatie afhankelijk van het type meer of minder water vast waardoor de mate van verzadiging van de bodem wordt beïnvloed.

Aanpassingen in de topografie, zoals de aanleg van terrassen, zorgen ervoor dat de stroomsnelheid van oppervlakteafstroming wordt beperkt. In het geval van oevererosie kan het proces worden beïnvloed door de eroderende kracht van stromend water en golfbelasting te beperken door beschermingsconstructies op of voor de oevers aan te brengen. Scheepvaart heeft een versterkend effect op de belasting van rivierwater op de oever, maar het heeft economische nadelen hier beperkingen op te leggen.

Erosie en transport van sediment in de rivier vindt tijdens hoge afvoer plaats en sedimentatie vindt plaats bij lage afvoer van de rivier. Helling en breedte van het riviersysteem zijn bepalend voor de stroomsnelheid. Door rivieren te laten meanderen wordt de afvoersnelheid beperkt. Door extra berging van water te creëren in bovenstroomse delen van een stroomgebied, kan de afvoer benedenstrooms beperkt worden doordat de watertoevoer uitgesteld wordt. De effectiviteit van deze maatregel is afhankelijk van de schaal waarop de invloed van waterberging op rivierafvoer dient plaats te vinden en de hydrologische situatie.

Tijdens hoogwater neemt de hoeveelheid beschikbaar sediment af, waardoor tijdens de volgende hoge afvoer minder sediment beschikbaar is voor transport. Omdat transport samenhangt met afvoersnelheid en debiet dienen maatregelen ter beïnvloeding hiervan gericht te zijn op het verlagen of verhogen van de rivierafvoer.

Hydrogeomorfologische ingrepen in de stroomgeul en de uiterwaarden beïnvloeden de stroomsnelheid van de rivier en daarmee alle processen van erosie, transport en sedimentatie. De duur, timing en frequentie van afvoerfluctuaties kunnen hierdoor ook worden gereguleerd. Naast hydrogeomorfologische ingrepen kan verandering van

landgebruik een belangrijke maatregel zijn om aanvoer van regenwater naar de rivier te sturen.

Indien sturing van erosie, transport en sedimentatie van materiaal ingezet wordt in verband met het beïnvloeden van de water- en sedimentkwaliteit is het belangrijk om te onderzoeken op wat de belangrijkste bronnen van verontreiniging zijn en op welk moment in het jaar de belangrijkste input van verontreinigd water en/of sediment verwacht worden. Bij het bestuderen van de effecten van extreme afvoeren (zowel laag als hoog) en overstromingen op de kwaliteit van het water en de bodems van de uiterwaarden in een stroomgebied dient naast erosie en sedimentatie ook rekening te worden gehouden met chemische en biologische processen in de bodem en het water.

8.2 Effecten van klimaatverandering en socio-economische veranderingen op erosie, transport en sedimentatie

Factoren die als gevolg van klimaatveranderingen mogelijk veranderen, zijn voornamelijk erosiviteit (van neerslag, stromend water, wind en sneeuw) en landgebruik. Klimaatveranderingen zullen enerzijds de erosiviteit van regen doen toenemen. Anderzijds zou verandering van landgebruik in de toekomst kunnen leiden tot een afname van het landbouwareaal en daarmee de erosie beperken. In de besproken onderzoeken worden echter voor het stroomgebied van de Rijn zowel afname als groei voorspeld van het landbouwareaal. De afname is gebaseerd op de verwachting dat een dalende bevolking zal leiden tot een lagere vraag naar landbouwgewassen. Het is echter de vraag of deze negatieve relatie op de schaal van een stroomgebied bestaat. Voor het Maasstroomgebied wordt een afname van de landbouw verwacht, die voornamelijk een afname van intensieve veehouderij betreft. Omdat deze vorm van landbouw grotendeels niet grondgebonden is zal het effect op erosie zeer gering zijn. Veranderingen in landgebruik en veranderingen in het grondwatersysteem kunnen de erodibiliteit van de bodem doen af- of toenemen.

Getijddebewegingen beïnvloeden waterbeweging en waterstanden in de benedenloop van de Lek, de Waal (Merwede) en de Maas. Een stijgende zeespiegel als gevolg van het veranderende klimaat zal dus invloed hebben op de afvoer van (zij)rivieren en het waterpeil. In de literatuur wordt vooral ingegaan op de effecten van veranderingen in neerslag en temperatuur op het afvoerregime, dat naar verwachting meer extremen zal gaan kennen in de toekomst. De hoeveelheid sediment die kan worden getransporteerd varieert daardoor ook. Als klimaatveranderingen indirect leiden tot het vaker voorkomen extreme afvoeren zal ook het transport gaan fluctueren. Om na te gaan welk sediment en in welke hoeveelheden wordt getransporteerd en kan worden afgezet op plaatsen waar de stroomnelheid van het water laag genoeg is hangt niet alleen af van de rivierafvoer maar ook van de veranderingen in erosieprocessen.

Een toename van de frequentie en omvang van extreem hoog water en overstromingen leidt tot beheersmaatregelen zoals aanpassing van de waterwegen en uitbreiding van noodoverstromingsgebieden. Deze maatregelen, die in het kader van bescherming tegen overstromingen worden genomen, en maatregelen ter optimalisatie van vaarewegen beïnvloeden ook de transport en sedimentatieprocessen in een riviergebied.

8.3 Aanbevelingen

Om te voorspellen hoe processen van erosie, transport en sedimentatie in een rivierstroomgebied veranderen onder invloed van extreme weersomstandigheden en veranderingen in landgebruik en watergebruik is meer inzicht nodig in te verwachten klimaatveranderingen, sociaaleconomische veranderingen en de effecten daarvan op de sturende factoren voor erosie, transport en sedimentatie. Zo bestaat nu nog onzekerheid over het effect van veranderingen in landbouwareaal en de effecten daarvan op erosie.

Het is van belang rekening te houden met het feit dat modelstudies gebaseerd zijn op veranderingen van gemiddelde klimaatparameters of extremen. Indien inzicht gewenst is het effect van veranderingen van extremen, moeten de klimaatscenario's daar ook op gebaseerd zijn en niet op veranderingen in gemiddelden.

Wanneer geohydrologische ingrepen worden toegepast in een stroomgebied met als doel het sturen van een van de genoemde processen of water overlast of droogte, dienen ook de effecten daarvan op andere processen in beschouwing te worden genomen. Ongewenste sedimentatie in noodoverloopgebieden kan daardoor bijvoorbeeld voorkomen worden.

Over het gedrag van historische verontreinigingen bij extreme afvoeren is nog onvoldoende bekend. Onderzoek naar de risico's op mobilisatie hiervan zou hier meer inzicht in moeten geven.

9 Literatuur

Asselman, N.E.M., 1997. Suspended sediment in the river Rhine, the impact of climate change on erosion, transport and deposition. Koninklijk Aardrijkskundig Genootschap/faculteit Ruimtelijke Wetenschappen Universiteit Utrecht.

Asselman, N.E.M., 1998. The impact of climate change on suspended sediment transport in the river Rhine, Netherlands Centre For Geo-ecological Research.

Asselman, N.E.M., 1999. Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine, Hydrological Processes 13, 1437-1450.

Asselman, N.E.M. en Middelkoop, H., 1995. Floodplain sedimentation: quantities, patterns and processes. Earth Surface Processes and Landforms vol. 20, 481-499.

Asselman, N.E.M. en Middelkoop, H., 1998. Temporal variability of contemporary floodplain sedimentation in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Earth Surface Processes and Landforms 23/7, 595-609.

Asselman, N.E.M., Middelkoop, H., Van Dijk, P.M., 2003. The impact of changes in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine. Hydrological Processes 17, 3225-3244.

Bakker, I., 2006. The composition of suspended particulate matter during floodings of the river Meuse, master report Universiteit van Groningen (RUG).

Bolleboom, T.K.H.M. en V.d Wal, M, december 2003. Voorkomen van sedimentatie in Havens. Uitgegeven door Dienst Weg- en Waterbouwkunde.

Bouzit, M., Herivaux, Loubier, C.S., februari 2005. A case study report on the Meuse by BRGM in relation with EUPOL and BASIN. AquaTerrq Deliverable No.: INTEGRATOR1.1c.

Busch, S. (red.), 2004 (concept). Karakterisering stroomgebied Maas (Nederland), in opdracht van Regionaal Bestuurlijk Overleg (RBO Maas).

Coops, H. (red.), 2002. Ecologische effecten van peilbeheer: een kennisoverzicht. Min. V&W, DGR, RIZA-rapport 2002.040; rapport RIKZ/2002.041; DWW rapport nr. DWW-2002-053; ISBN 9036954681, H 5: Oeverstabiliteit onder invloed van peilbeheer, Wessels, Y., Broersen, K., Soesbergen, M.

Doomen, A., 2003. Zwevend stof dynamiek en zwevend stof kwaliteit van de Maas. Faculteit Ruimtelijke wetenschappen, vakgroep fysische geografie, Universiteit Utrecht.

Coördinatiebureau Rijn en Maas, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2005. Karakterisering werkgebied Rijndelta.

Eisma, D., 1993. Suspended matter in the aquatic environment. Springer Verlag. In Bakker, 2006.

H20, nr 22, 2007. “kadeverhoging in de steden heel ingrijpend voor de betrokkenen”, interview met Hans Ruijter, blz 8-9.

ICBR (Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn), 18 maart 2005. Internationaal stroomgebiedsdistrict Rijn. Kenmerken, beoordeling van de milieueffecten van menselijke activiteiten en economische analyse van het watergebruik.

Internationale Maascommissie, 23 maart 2005. Internationaal stroomgebiedsdistrict Maas – Analyse, overkoepelend rapport.

Janssen, L.H.J.M., Okker, V.R., Schuur, J. Welvaart en Leefomgeving, een scenariostudie voor Nederland in 2004. Centraal Planbureau, Milieu- en Natuurplanbureau en Ruimtelijk Planbureau.

Koorevaar, P., Menelik, G., Dirksen, C., 1983. Elements of soil physics, Developments in Soil Science 13, Elsevier.

Kwadijk, J. 1993. The impact of climate change on the discharge of the River Rhine. Koninklijk Aardrijkskundig Genootschap/faculteit Ruimtelijke Wetenschappen Universiteit Utrecht.

Léonard, J., Rajot, J.L., 2001. The influence of termites on runoff and infiltration: quantification and analysis, Geoderma, 104, 17-40.

Liefveld, W.M., Van Looy, K., Prins, K.H., 2001. Biologische monitoring zoete rijkswateren: watersysteemrapportage Maas 1996 RIZA rapport 2000.056. ISBN-nummer 9036953189.

RIZA, Middelkoop, H. (red.), 1998. Twee Rivieren. Rijn en Maas in Nederland, RIZA-rapport 98.041.

RIZA, 2003. De sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal, Managementsamenvatting, 2003.002.

Roo, de, A.P.J., 1993. Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems, Netherlands Geographical Studies.

Morgan, R.P.C., Soil Erosion & Conservation, second edition, 1995. Addison Wesley Longman Limited.

Middelkoop, H., Kwadijk, J.C.J., 2000. Towards Integrated Assessment of the Implications of Global Change for Water management – The Rhine Experience, Phys. Chem. Earth (B), no 7-8, 553-560.

Milieu en Natuur Planbureau (MNP), 2005. Effecten van klimaatverandering in Nederland.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, april 2006. Syntheserapport Onderzoeksprogramma, Rampenbeheersingsstrategie Overstromingen Rijn en Maas, in

opdracht van de Staatssecretaris van V&W en Minister van Buitenlandse Zaken & koninkrijksrelaties.

Peñailillo, R., Passier, H., Bakker, I., van Vliet, M., Delsman, J., dec 2007 (concept). Historical contaminated sediments in the Rhine basin during extreme situations. Syergy project Water Quality and Calamities, Q4453.00.

Petit, F., Gob, F., Houbrechts, G., Assani, A.A., 2005. Critical specific stream power in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 69, 92-101.

Thonon, I., 2006. Deposition of sediment and associated heavy metals on floodplains. Koninklijk Aardrijkskundig Genootschap, Faculteit Geowetenschappen Universiteit Utrecht.

Van den Hurk, B., Klein Tank, A., Lenderink, G., van Oldenborgh, G., Katsman, C., van den Brink, H., Keller, F., Bessembinder, J., Burgers, G., Komen, G., Hazeleger, W., Drijfhout, S. en van Ulden, A (2006a) *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*, Scientific report; WR 2006-01, De Bilt.

Van den Hurk, B., Klein Tank, A., Lenderink, G., van Oldenborgh, G., Katsman, C., van den Brink, H., Keller, F., Bessembinder, J., Burgers, G., Komen, G., Hazeleger, W., Drijfhout, S. en van Ulden, A (2006b) *Klimaat in de 21e eeuw vier scenario's voor Nederland*, Brochure KNMI'06 scenario's.

Van Deursen, W., Middelkoop, H., Kwadijk, J., 2002. Veranderingen van landgebruik, extra berging en het voorkomen van extreem hoge afvoeren. *H₂O* nr 5.

Van Dijk, P.M., 1999. The supply of sediment to the river Rhine drainage network. The impact of climate change and land use change on soil erosion and sediment transport to stream channels. NRP projectno. 952210. Netherlands Centre For Geo-ecological Research, ICG 99/5.

Vansickle, J. en Beschta, R.L., 1983. Supply-based models of suspended sediment transport in streams. *Water Resource Research* 19, 768-778.

Van Vliet, M.T.H., 2006. Effects of droughts and floods on the water quality and drinking water function of the River Meuse: a preview of climate change?, KIWA Water Research, BTO 2006.073 (s).

Van Vliet, M. en Zwolsman, G., 2007. Klimaatverandering en de waterkwaliteit van de Maas. *H₂O* nr 9.

Wolters, H.A., Platteeuw, M., Schoor, M.M. (red), 2001. Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden, ecologie en veiligheid gecombineerd. RIZA-rapport 2001.059.

Wischmeier, W.H. en Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537. Washington DC: Science and Education Administration USDA. Verwijzing in Asselman (1997).

Zwolsman, J.J.G., Kouer, R.M., Hendriks, A.J., 2000. Environmental impacts of River floods in the Netherlands. Wasser Berlin, ATV-DVWK-Schriftenreihe, vol.21, 33-61.