ALTERRA
WAGENINGEN UR



Sedimenthuishouding in het stroomgebied van de Nederlands-Duitse Vecht

Potenties voor herstel van natuurlijke rivierdynamiek

Alterra-rapport 1939
ISSN 1566-7197

W. Viveen, G.J. Maas en J.M. Schoorl

Sedimenthuishouding in het stroomgebied van de Nederlands-Duitse Vecht

Potenties voor herstel van natuurlijke rivierdynamiek

In opdracht van het ministerie van LNV, in het kader van BO-01-03 Cluster Vitaal Landelijk Gebied thema Water. LNV-contactpersoon Drs. S.P. Groen

Projectcode BO-01-003-318

Sedimenthuishouding in het stroomgebied van de Nederlands-Duitse Vecht

Potenties voor herstel van natuurlijke rivierdynamiek

W. Viveen
G.J. Maas
J.M. Schoorl

Alterra-rapport 1939

Alterra, Wageningen, 2009

REFERAAT

W. Viveen, G.J. Maas, J.M. Schoorl, 2009. *Sedimenthuishouding in het stroomgebied van de Nederlands-Duitse Vecht; Potenties voor herstel van natuurlijke rivierdynamiek,* Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1939. 56 blz.; 13 fig.; 10 tab.; 13 ref.

In opdracht van LNV is onderzoek gedaan naar de sedimenthuishouding van de Nederlands-Duitse Vecht. Het accent lag hierbij op het verkrijgen van een beter inzicht in erosie- en sedimentatieprocessen op stroomgebiedsniveau. Vanwege deze reden is er een samenwerking opgezet met Duitse partners. Hierdoor kon er een grensoverschrijdende analyse gemaakt worden van het Vechtsysteem vanaf de bovenlopen in Duitsland tot de monding bij het Zwarte Water in Nederland.
Door gebruik te maken van het landschapsproces-model LAPSUS, ontwikkeld door onderzoekers van de leerstoelgroep Land Dynamics van Wageningen Universiteit, kon er een analyse gemaakt worden van waar zich in het gebied de belangrijkste bronnen van sediment bevinden en hoe verschillende delen van het Vechtsysteem reageren op veranderingen in landgebruik en op aanpassingen aan de benedenstroomse loop van de Vecht. Op basis van drie scenario's is dit gedrag nader onder de loep genomen.

Trefwoorden: Overijsselse Vecht, sediment, erosie, geomorfologie, LAPSUS, rivierdynamiek, fluviatiel

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.boomblad.nl/rapportenservice.

© 2009 Alterra
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland
Tel.: (0317) 480700; fax: (0317) 419000; e-mail: info.alterra@wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

[Alterra-rapport 1939/december/2009]

Inhoud

Woord vooraf 7

Samenvatting 9

1 Inleiding 11
1.1 Achtergrond en doelstellingen 11
1.2 Opzet van het rapport 12

2 Materiaal en methoden 13
2.1 LAPSUS modelbeschrijving 13
2.2 Input LAPSUS 14
2.2.1 Digitaal Hoogte Model 14
2.2.2 Geologische kaart 16
2.2.3 Landgebruikskaart 17
2.2.4 Waterbalans 18
2.2.5 Erosiewaarden voor geologie en landgebruik 20
2.3 Calibratie LAPSUS 21
2.3.1 Waterbalans 21
2.3.2 Sedimentbalans: *P-* en *K-factoren* 22
2.3.3 Gevoeligheidsanalyse *P-factor* 23
2.4 Analyse deelstroomgebieden 27
2.5 Scenario's 28
2.5.1 Scenario 1: huidige situatie 28
2.5.2 Scenario 2: nieuwe loop Nederlandse Vecht met en zonder overstromingen 29
2.5.3 Scenario 3: landgebruiksveranderingen 30

3 Resultaten 31
3.1 Scenario 1 31
3.1.1 Algemeen beeld erosie- en sedimentatiekarakteristiek 31
3.1.2 Erosie 33
3.1.3 Sedimentatie 34
3.1.4 Erosie-sedimentatiebalans 34
3.1.5 Sediment Delivery Ratio 35
3.2 Scenario 2 36
3.2.1 Weghalen oeververdediging 36
3.2.2 Effect van overstromingen 37
3.2.3 Huidige Vechtloop versus nieuwe Vechtloop 37
3.3 Scenario 3 38
3.3.1 Erosie 39
3.3.2 Sedimentatie 39
3.3.3 Erosie-sedimentatiebalans 40

4 Discussie 43
4.1 Scenario 1 43
4.2 Scenario 2 44
4.3 Scenario 3 45
4.4 Gebruik van LAPSUS voor modellering erosie- en sedimentatie processen 46
4.5 Implicaties voor rivierherstel 48
5 Conclusies 51
6 Suggesties voor verder onderzoek 53
Literatuur 55

Woord vooraf

In dit rapport wordt de Nederlands-Duitse Vecht in een integrale en grensoverschrijdende context nader onderzocht. Er is gekeken naar de erosie- en sedimentatiedynamiek op stroomgebiedsniveau. Ondanks het gebrek aan kwantitatieve meetgegevens is het toch mogelijk geweest om in grote lijnen aan te geven wat de sedimentbalans van de Vecht en haar zijtakken is en hoe deze balans verandert onder invloed van landgebruiksveranderingen. Op deze manier worden handvaten aangereikt voor een beter beheer en (her)inrichting van de Nederlands-Duitse Vecht.

Het onderzoek is opgezet in samenspraak met de regio (programma Ruimte voor de Vecht) en uitgevoerd in opdracht van het ministerie van LNV, in het kader van BO-01-03 Cluster Vitaal Landelijk Gebied thema Water. De contactpersoon namens LNV was Drs. S.P. Groen.

Dit onderzoek zou niet mogelijk zijn geweest zonder de hulp van een aantal mensen. In de eerste plaats willen we Dorothea Altenhofen van het NLWKN in Meppen, Duitsland, bedanken voor de goede samenwerking en haar enthousiaste opstelling. De door haar beschikbaar gestelde meetreeksen van de Vecht zijn erg belangrijk gebleken voor dit onderzoek. Hans-Ulrich Funke en Bernd Zummach worden bedankt voor hun hulp bij het klaarzetten van de data.

Daarnaast zijn we Heiner Berger van de afdeling Wasserwirtschaft van de Bezwirksregiering Nordrhein-Westfalen in Münster ook erkentelijk voor het ter beschikking stellen van de benodigde data.

In Nederland willen we graag Thomas de Meij van Waterschap Velt en Vecht bedanken voor zijn hulp. Henk Kloosterboer en Gerben Tromp van Waterschap Groot Salland worden ook bedankt voor de benodigde afvoergegevens, evenals Paul Termes van HKV.

Samenvatting

In opdracht van LNV is onderzoek gedaan naar de sedimenthuishouding van de Nederlands-Duitse Vecht. Het accent lag hierbij op het verkrijgen van een beter inzicht in erosie- en sedimentatieprocessen op stroomgebiedsniveau. Vanwege deze reden is er een samenwerking opgezet met Duitse partners. Hierdoor kon er een grensoverschrijdende analyse gemaakt worden van het Vechtsysteem vanaf de bovenlopen in Duitsland tot de monding bij het Zwarte Water in Nederland.

Door gebruik te maken van het landschaps-proces model LAPSUS, ontwikkeld door onderzoekers van de leerstoelgroep Land Dynamics van Wageningen Universiteit, kon een analyse gemaakt worden van waar zich in het gebied de belangrijkste bronnen van sediment bevinden en hoe verschillende delen van het Vechtsysteem reageren op veranderingen in landgebruik en op aanpassingen aan de benedenstroomse loop van de Vecht. Op basis van drie scenario's is dit gedrag nader onder de loep genomen.

In scenario 1 is het erosie- en sedimentatiegedrag van de huidige Nederlands-Duitse Vecht onderzocht. Op basis van een analyse van deelstroomgebieden is nader bepaald waar zich de belangrijkste bronnen van sediment bevinden. Uit deze analyse kwam naar voren dat de bovenlopen van de Dinkel, de Vecht en de Steinfurter Aa in Duitsland de belangrijkste sedimentleveranciers zijn. De stroomgebieden van de Dinkel en de Regge leveren een gemiddelde hoeveelheid sediment. In het noordelijk deel van de Nederlandse Vecht vindt nauwelijks aanlevering van sediment plaats. De Duitse en de Nederlandse lopen van de Vecht zelf fungeren voornamelijk als doorvoerkanaal voor sedimenten die geleverd worden door hun zijtakken. De Nederlandse Vecht kent een netto erosie-overschot, waardoor er voornamelijk insnijding plaatsvindt.

In scenario 2 is onderzocht wat aanpassingen aan de loop van de Nederlandse Vecht voor gevolg hebben voor de erosie- en sedimentatiepatronen. Hiervoor zijn een aantal analyses uitgevoerd in een geselecteerd gebied tussen Hardenberg en Ommen. Het verwijderen van de oeververdediging leidt tot een verhoogde erosie, maar niet tot een verhoogde sedimentatie. Dit is waarschijnlijk te wijten aan het feit dat de Nederlandse Vecht qua sedimentverzadiging al bijna aan haar maximale kunnen zit. Het overige sediment wordt naar het Zwarte Water getransporteerd. Het verwijderen van de oeververdediging heeft daarnaast hoogstwaarschijnlijk een positief effect op fluviatiel-geomorfologische processen als oeverafkalving, meanderverplaatsing en opbouw van oeverwallen. Dit effect is echter niet onderzocht.

Het toelaten van overstromingen in het dal van de Vecht zorgt ervoor dat er significant meer sediment achterblijft in het gebied. Zonder overstromingen kan de Vecht niet sedimenteren in het Vechtdal. Om sediment te behouden in de Nederlandse Vecht, is het toestaan van inundaties dan ook een vereiste.

Aanpassingen in de loop van de Vecht ten slotte, leiden tot een verhoging in sedimentatie en in mindere mate in hoeveelheid erosie.

In scenario 3 is onderzocht wat het effect is van veranderingen in landgebruik in de dynamische bovenlopen van de Vecht. Hiervoor is alle landbouwgrond van de bovenlopen van de Dinkel, de Vecht en de Steinfurter Aa omgezet in bos. Het gevolg hiervan is dat de erosie in deze gebieden sterk afneemt, evenals de hoeveelheid sedimentatie. Hierdoor neemt het erosieoverschot in de Duitse Vecht sterk toe en ook in de Nederlandse Vecht is dit effect merkbaar, maar in mindere mate dan in Duitsland. In Nederland wordt deze sedimentdeficiëntie voor een deel opgevangen door de sedimentbuffercapaciteit van de Nederlandse Vecht. Dit toont aan dat de Nederlandse Vecht deels afhankelijk is van wat er bovenstrooms gebeurt, maar ook deels zelfregulerend werkt.

Wil men terug naar een meer natuurlijke Vecht waarbij er meer ruimte is voor natuurlijke erosie- en sedimentatieprocessen, dan wordt aanbevolen een aantal veranderingen door te voeren. Ten eerste zal er meer samenwerking plaats moeten vinden met Duitsland omdat de Nederlandse Vecht deels afhankelijk is van wat er bovenstrooms gebeurt. Daarnaast zullen ingrepen in de loop van de Vecht nodig zijn om de hoeveelheid erosie en sedimentatie te reguleren. De oeververdediging zal weggehaald moeten worden, het Vechtdal zal regelmatig moeten kunnen overstromen en de vorm van de Vechtloop zal aangepast moeten worden.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doelstellingen

In het kader van een aantal programma's zoals Ruimte voor de Vecht, worden momenteel grootschalige ingrepen voor de Overijsselsche Vecht gepland. Gestreefd wordt naar herstel van de Overijsselsche Vecht in een halfnatuurlijke rivier. Daarvoor moeten onder andere weer natuurlijke erosie- en sedimentatieprocessen gaan plaatsvinden, omdat een dynamisch abiotisch milieu een sterke invloed heeft op voortkomende flora en fauna. Afkalving van meanderbuitenbochten en sedimentatie in binnenbochten en opslibbing van uiterwaarden tijdens hoogwaterpieken zorgt ervoor dat vegetatiesuccessies steeds weer van voor af aan kunnen beginnen. Een afwisseling van verschillende successiestadia en vegetatiegradiënten zorgt voor een rijke biodiversiteit en een afwisselend landschap.

Er is echter zeer weinig bekend over het sedimentatiegedrag van de Vecht. Er zijn nauwelijks kwantitatieve meetgegevens beschikbaar en hydraulisch onderzoek heeft zich altijd beperkt tot het Nederlandse deel van de Vecht. Om een goed inzicht te krijgen in de erosie- en sedimentatiedynamiek is het echter van groot belang om niet alleen naar de Nederlandse Vechtloop te kijken, maar om naar het hele stroomgebied te kijken, inclusief de Duitse bovenlopen. Deze studie beoogt dan ook om meer inzicht te verschaffen in de ruimtelijke sedimentatiedynamiek van de Nederlands-Duitse Vecht.

Het project kent de volgende doelstellingen en onderzoeksvragen:

- Genereren van kennis over de sedimenthuishouding in het stroomgebied. Hoeveel zand wordt er door de Vecht getransporteerd, waar vindt erosie plaats en waar in het systeem wordt zand afgezet?
- Wat is het effect van hermeanderingsprojecten en het verwijderen van oeververdediging op de sedimenthuishouding van het riviersysteem en de morfologie van het riviersysteem?
- Leveren van riviermorfologische kennis ten behoeve van het ontwerpproces gericht op het realiseren van ecologische doelen, gerelateerd aan erosie en sedimentatieprocessen.

Voor het onderzoek wordt gebruik gemaakt van het landschapsproces model LAPSUS (LandscApe ProcesS modelling at mUltidimensions and Scales) dat ontwikkeld is door onderzoekers van de leerstoelgroep Land Dynamics van Wageningen Universiteit (Schoorl et al., 2000; 2002). LAPUS is speciaal ontwikkeld om erosie- en sedimentatieprocessen op landschapsniveau te simuleren en daarom geschikt om het hele stroomgebied van de Vecht nader te onderzoeken. Een tweede aspect is dat LAPSUS gebruik maakt van een aantal eenvoudig te verzamelen invoergegevens, die later in dit rapport besproken zullen worden. Deze omvatten onder andere terreinhoogte data (Digitaal Hoogte Model, opgebouwd uit raster data;

afgekort DEM), geologische en bodemkundige gegevens, landgebruiksgegevens, neerslag en bodemfysische parameters en aanvullende beslisregels of scenario's.

LAPSUS is in eerste instantie ontwikkeld om oppervlakkige erosie- en sedimentatieprocessen te berekenen. Erosie gedreven door hellingshoek- en lengte in combinatie met hoeveelheid waterafstroming is het dominante proces, dus de invoer van landschapsreliëf middels een Digitaal Hoogte Model is erg belangrijk. LAPSUS heeft geen grondwatermodule, dus alle afvoer gebeurt via het aardoppervlak. Daarnaast is LAPSUS nog niet eerder toegepast in een vlak gebied als Nederland en ook niet op deze schaalgrootte. Wegens deze beperkingen heeft de studie ook deels een experimenteel karakter. Omdat er weinig meetgegevens beschikbaar zijn, heeft de studie vooral een oriënterend karakter. Toch kunnen de uitkomsten goed gebruikt worden als leidraad voor verder natuurbeleid en onderzoek.

1.2 Opzet van het rapport

In het hoofstuk Materiaal en methoden wordt uitgelegd welke invoer LAPSUS nodig heeft en hoe deze invoer verzameld en voorbereid is. Daarna wordt ingegaan op de calibratie van LAPSUS. Calibratie is altijd nodig omdat de gegenereerde uitkomsten gespiegeld moeten worden aan de werkelijkheid. Het model werkt met een aantal van te voren in te stellen parameters en de juiste afstelling van deze parameters wordt meestal bepaald door te kijken naar de plausabiliteit van de uitkomsten. Omdat meetgegevens van de natuurlijke situatie niet beschikbaar zijn, is een alternatieve methode ontwikkeld om toch de plausabiliteit van de gegeneerde data te controleren. Het hoofdstuk eindigt met de presentatie van drie scenario's. In scenario 1 wordt de huidige situatie van de Vecht onderzocht; in scenario 2 worden de potenties van een nieuwe Nederlandse Vechtloop bekeken en in scenario 3 wordt een landgebruiksscenario gepresenteerd waarbij herbebossing in het Duitse deel van de Vecht een rol speelt.

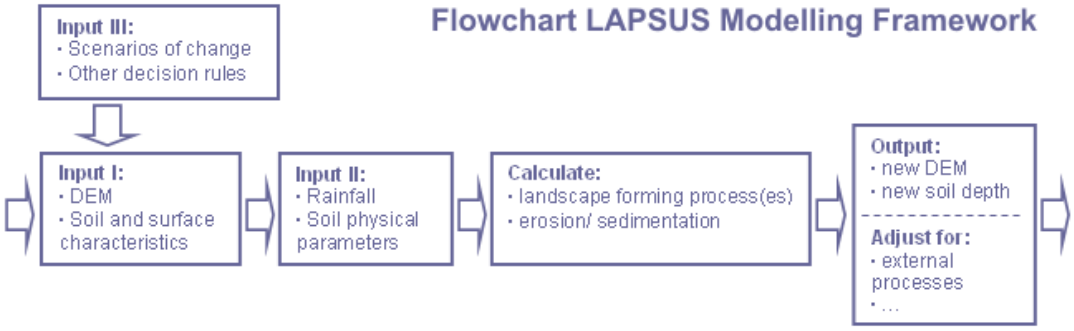
De uitkomsten van de drie scenario's worden gepresenteerd in het hoofdstuk Resultaten. Daarna volgt de discussie over de gebruikte onderzoeksmethode en de resultaten in een groter perspectief in het hoofdstuk Discussie. Het rapport besluit met de Conclusies waarna nog enkele suggesties voor vervolgonderzoek worden gedaan..

2 Materiaal en methoden

2.1 LAPSUS modelbeschrijving

LAPSUS is een zogenaamd landschaps-procesmodel. Aan de hand van een aantal fysische procesbeschrijvingen wordt berekend waar in het landschap erosie en waar in het landschap sedimentatie plaatsvindt. Gradiëntgedreven verplaatsing van water en sediment is het meest belangrijke proces. Aan de hand van het Digitale Hoogte Model wordt per pixel (gridcel) berekend naar welke volgende gridcel het door regenval verkregen water getransporteerd wordt. Dit is altijd van een landschappelijk hogere positie (gridcel) naar de meest nabije lagere positie. Op deze manier ontstaat er een afwateringspatroon dat hellingsafwaarts gestuurd wordt en uiteindelijk convergeert in steeds lager gelegen rivierlopen. Per gridcel wordt berekend hoeveel sediment er geërodeerd kan worden en bij de volgende, lager gelegen gridcel wordt weer berekend hoeveel sediment er én geërodeerd en weer neergelegd kan worden. Sturend voor de richting waarin sediment verplaatst wordt is het drainagepatroon.

De hoeveelheid geërodeerd en gesedimenteerd materiaal wordt geregeld door een aantal sediment-transportvergelijkingen gebaseerd op eerder werk van Kirkby en Foster en Meyer (zie Schoorl et al., 2002 voor referenties). Hellingshoek en jaarlijkse hoeveelheid waterafstroming bepalen de transportcapaciteit. Als de transportcapaciteit hoger is dan de transportsnelheid, kan de snelheid opgevoerd worden door de erodeerbaarheid van het bodemmateriaal (*K-factor*) te vergroten. Als de transportsnelheid hoger wordt dan de capaciteit, bijvoorbeeld omdat de hellingshoek van het terrein of de hoeveelheid oppervlakkige afstroming afneemt, zal de overtollige hoeveelheid sediment neergelegd worden. De parameter *P-factor* kan gebruikt worden om sturing te geven aan het gemak waarmee overtollig sediment neergelegd kan worden (Schoorl et al., 2002).
In figuur 1 wordt een stroomdiagram van LAPSUS gepresenteerd. In dit stroomdiagram worden de invoergegevens voor LAPSUS schematisch weergegeven.



Figuur 1 LAPSUS stroomdiagram

Door gebruik te maken van scenario's en beslisregels is het mogelijk om te achterhalen wat de dominante factoren voor de vorming van het landschap zijn. Bijvoorbeeld, door verschillende scenario's voor landgebruik te onderzoeken, kan bepaald worden wat het effect van bepaalde vormen van landgebruik op de erodeerbaarheid van het landschap is.
Bodemkundige, geologische en landgebruiksgegevens zijn bepalend voor de mate van erodeerbaarheid van het terrein. In combinatie met oppervlakkige waterafvoer, verkregen door regenval en bodemfysische parameters (o.a. *P-* en *K-factoren*), wordt zo bepaald waar er in het landschap erosie- en sedimentatieprocessen optreden.
Nadat het model alle gridcellen eenmaal doorlopen heeft (één iteratie), wordt er een nieuwe DEM gegenereerd met aangepaste hoogtewaarden. Ook bestaat de mogelijkheid om een nieuwe bodemdieptekaart te genereren, maar daar is in dit onderzoek geen gebruik van gemaakt. De DEM wordt automatisch als input gebruikt voor de volgende iteratie, waarbij het hele stroomdiagram nogmaals doorlopen wordt. In dit onderzoek wordt op basis van stappen van één jaar gerekend.

2.2 Input LAPSUS

2.2.1 Digitaal Hoogte Model

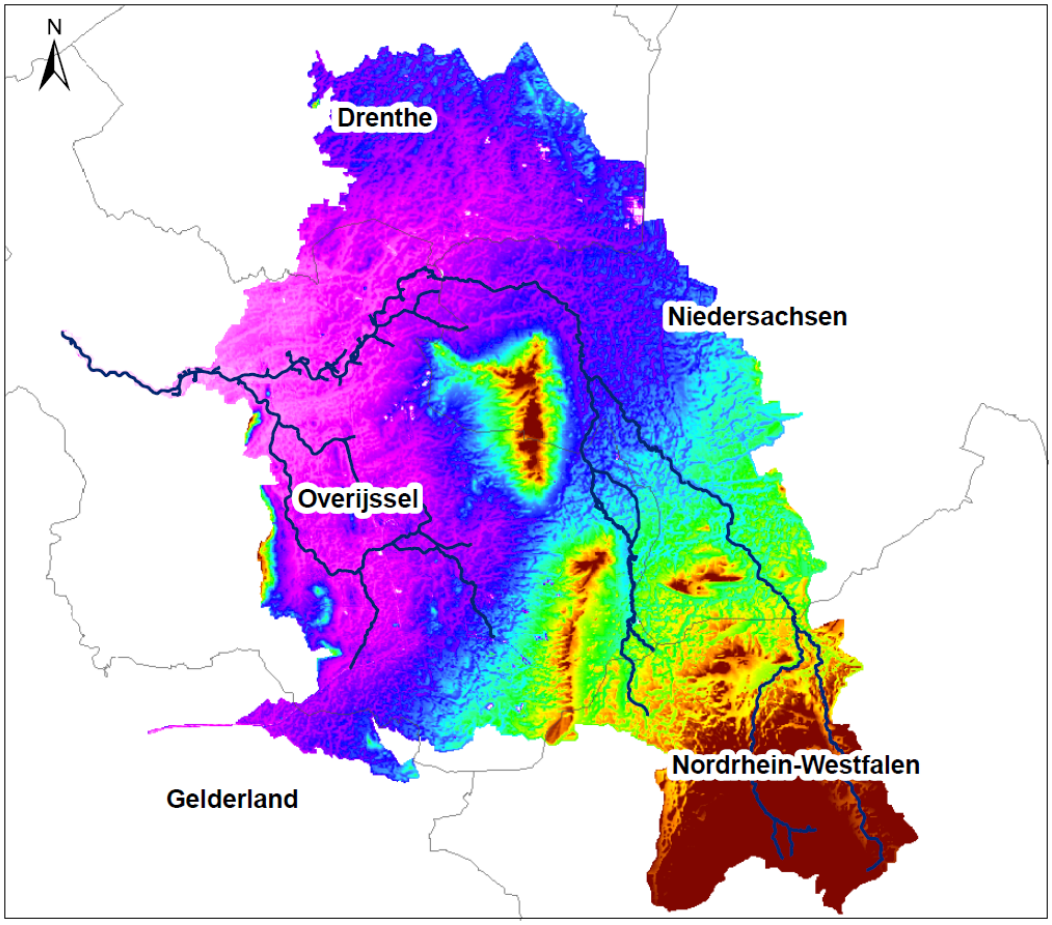
Het Duitse deel van de DEM is in Duitsland bij het Geodatencentrum aangekocht. Deze DEM, met een gridcelgrootte van 25 m, is daarna aan het Nederlandse 25 m AHN gekoppeld, zodat er een gebiedsdekkend hoogtebestand ontstond. Waterschap Velt en Vecht voorzag ons van een bestand waarin de omlijning van het hele stroomgebied was vastgelegd. Op deze manier kon op eenvoudige wijze de vorm van het stroomgebied uit de DEM geknipt worden.
In het Nederlandse deel van de DEM ontbraken op verschillende plekken, met name de plekken waar zich water bevindt, hoogtewaarnemingen. Deze leemten zijn opgevuld met de waarde -0,30 m, de hoogtewaarneming met de laagste waarde in het gebied.

Hierna is er binnen ArcGIS een model gemaakt van de potentiële natuurlijke afstroming in het gebied. Dit is gedaan aan de hand van de stappen Fill, Flow Direction en Flow Accumulation. Hierbij wordt eerst aan alle gridcellen die geen lagere naastgelegen cel kennen, een waarde toegekend die minimaal de waarde van een naastgelegen cel heeft. Op deze manier zijn onder andere de cellen met waarde -0,30 m opgevuld. Daarna wordt water van een gridcel naar een volgende, meest lager gelegen gridcel gestuurd en ontstaat er als het ware een afwateringspatroon. Het ontstane patroon is daarna vergeleken met het waterlopenstelsel uit topografische kaarten en atlassen. Hieruit bleek dat het gesimuleerde, natuurlijke drainagepatroon op een aantal punten afweek van het werkelijke patroon, omdat de waterhuishouding in het gebied deels aangepast is door kanalen, stuwen en rivierverleggingen. Knelpunten waren onder andere het Twentekanaal, het Afwateringskanaal en de verbinding tussen de Dinkel en de Vecht. Ook volgde de gesimuleerde Vecht de bedding van de echte Vecht niet helemaal, maar liep op andere plekken over de

dalbodem. Dit had als gevolg dat er op sommige punten in de Vecht teveel water van zijtakken geloosd werd en op andere punten weer te weinig. Dit zou uiteindelijk grote consequenties hebben gehad voor de gehele water- en sedimentsverdeling in het gebied.

Daarom zijn er op verschillende punten gridcelwaarden aangepast om ervoor te zorgen dat de afwatering in de goede richting gestuurd werd. Na een aanpassing werd het drainagepatroon weer gesimuleerd en gekeken naar verbetering. Dit proces herhaalde zich net zolang tot het gesimuleerde patroon op hoofdlijnen overeenkwam met het werkelijke patroon. Als criterium werd gesteld dat de Vecht en haar grootste zijtakken (Regge, Afwateringskanaal, Ommerkanaal, Radewijkerbeek, Dinkel, Steinfurter Aa) op de juiste plaats gesimuleerd werden.

Als laatste stap is de opgevulde, gecorrigeerde DEM nabehandeld met het programma ArcFlat (Schoorl, 2001), om alle plekken die stagnatie van water veroorzaken weg te poetsen. Het gaat hierbij om gridcellen die geen lagere buurman kennen (sinks), vlakke oppervlakten (flats) en pseudo-vlakke oppervlakten (pseudo-flats). Het resultaat is weergegeven in figuur 2.



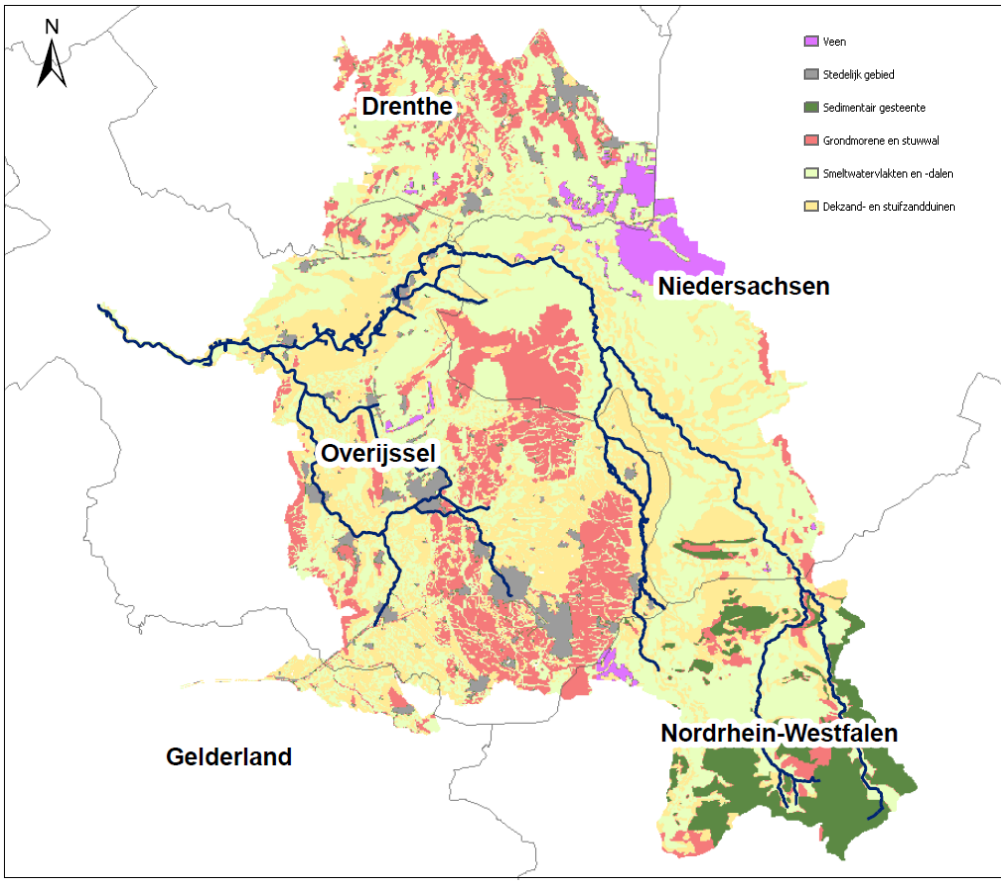
Figuur 2 Hoogtemodel van het stroomgebied van de Vecht

2.2.2 Geologische kaart

LAPSUS maakt gebruik van bodemkundige of geologische gegevens om de erodeerbaarheid van moedermaterialen te bepalen. Daarnaast kan aan de hand van bodemkundige gegevens een inschatting gemaakt worden van de waterretentiecapaciteit van de bodem, die op zijn beurt weer belangrijk is om de hoeveelheid oppervlakkige afvoer te simuleren.
Een betrouwbare, gedetailleerde en voor ArcGIS geschikte bodemkaart voor het Duitse deel was niet verkrijgbaar. Daarom is ervoor gekozen de Duitse 1:200.000 geologische kaart van het gebied te gebruiken (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1984). Deze papieren versie is in de computer gescand, gedigitaliseerd en gegeorefereerd. Daarna zijn de geologische eenheden op basis van facies gegroepeerd en teruggebracht naar zeven klassen:
1. Veen
2. Stedelijk gebied
3. Sedimentair gesteente
4. Grondmorene/stuwwal
5. Smeltwatervlakten en dalen
6. Dekzanden en stuifzandduinen
7. Water

Voor het meest stroomopwaartse deel van de Vecht in Nordrhein-Westfalen was geen informatie beschikbaar. De geologische kaart is daarom geïnterpoleerd naar dit gebied toe op basis van de DEM.

Voor het Nederlandse deel is gebruik gemaakt van de digitale geomorfologische kaart. De indeling van de Duitse geologische kaart is, in tegenstelling tot de Nederlandse geologische kaart, meer gebaseerd op geomorfologische kenmerken. Daardoor zijn de Nederlandse geomorfologische kaart en de Duitse geologische kaart in hoge mate verenigbaar. Ook voor de Nederlandse situatie is een indeling in de bovengenoemde zeven klassen gemaakt. Beide kaarten zijn samengevoegd en omgezet naar een rasterformaat met gridcelgrootte van 25 m. Figuur 3 geeft de geologische kaart weer.



Figuur 3 Geologische kaart van het stroomgebied van de Vecht

2.2.3 Landgebruikskaart

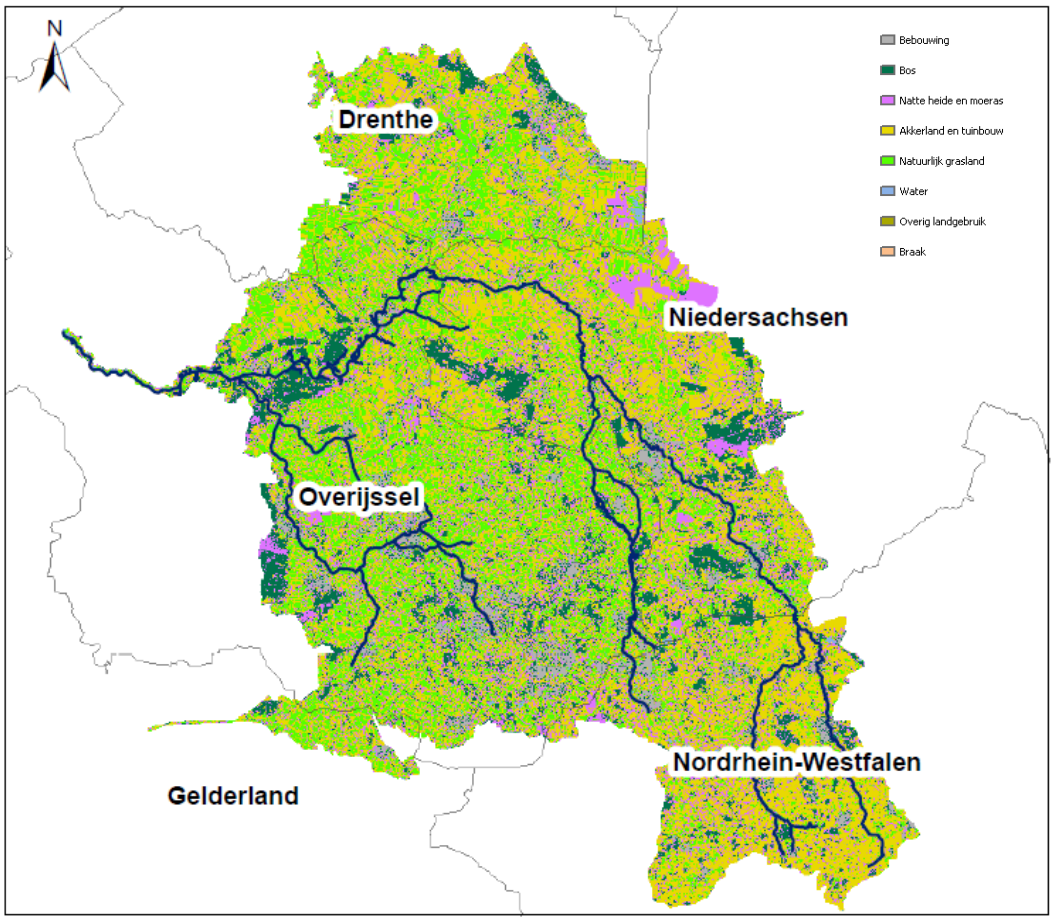
Landgebruiksgegevens hebben ook invloed op de erodeerbaarheid van het landschap en daarom is een landgebruikskaart noodzakelijk. Op basis van de Nederlandse Top50, de Top50 van Niedersachsen en de Top10 van Nordrhein-Westfalen is een kaart samengesteld en vervolgens teruggebracht naar een vereenvoudiging met acht klassen:

1. Bebouwing
2. (Gemengd) bos en bomenrijen
3. Natte heide en moeras
4. Akkerland en tuinbouw
5. (Natuurlijk) grasland
6. Water
7. Overig landgebruik (o.a. recreatieterreinen en kerkhoven)
8. Braakliggend terrein

De kaart is omgezet naar een rasterformaat met gridcellgrootte van 25 m. Ook is er gekeken of wegen, dijken en andere elementen op de kaart op precies dezelfde plaats liggen als deze elementen op de DEM. Op de DEM zijn soms nog kunstmatige verhogingen in het landschap zichtbaar. Omdat deze elementen niet erodeerbaar zijn, is het van groot belang dat zij op dezelfde plaats liggen als op de DEM. Anders

zouden dijken en opgehoogde wegen in een LAPSUS-simulatie weggeërodeerd worden en ten onrechte een hoeveelheid sediment genereren.

Bij de omzetting van de Duitse Gauss-Krüger projectie naar het Nederlandse RD-stelsel en de bijbehorende datumverandering sloop er toch een kleine onnauwkeurigheid in de omzetting, waardoor de kaart en de DEM niet helemaal overlapten. Door handmatige aanpassing van de projectie is de landgebruikskaart uiteindelijk toch kloppend gemaakt met de DEM. De landgebruikskaart is te zien in figuur 4.



Figuur 4 Landgebruikskaart van het stroomgebied van de Vecht

2.2.4 Waterbalans

LAPSUS maakt gebruik van een netwerk van oppervlakkige waterafvoer om te kunnen eroderen en sedimenteren. Hiervoor wordt er op elke gridcel een bepaalde hoeveelheid neerslag losgelaten dat afstroomt en in de waterlopen terecht komt. Een deel van deze neerslag verdwijnt weer in de vorm van verdamping en bodemretentie. Om ervoor te zorgen dat de hoeveelheid waterafvoer realistisch is, is het nodig om de waterafvoer te ijken aan de werkelijke situatie. Hiertoe is het wenselijk een waterbalans op te stellen.

Een waterbalans voor het gebied is niet beschikbaar en ook niet voor de afzonderlijke waterschappen. Dit is te wijten aan de ingewikkelde hydrologie en niet-sluitende balansposten die onder andere het gevolg zijn van de landsgrens (De Meij, persoonlijke mededeling). Om deze reden is er voor gekozen een versimpelde waterbalans op te stellen. De waterbalans bestaat uit vier componenten: neerslag, verdamping, bodemopslag en afvoer.

De neerslag is bepaald door gebruik te maken van gemeten dagwaardes van het KNMI meetstation Twenthe over de jaren 2000-2007. De gemiddelde hoeveelheid jaarlijkse neerslag over deze periode bedraagt 797 mm per jaar.

Voor de verdamping is gebruik gemaakt van een geschat gemiddelde voor het Waterschap Velt en Vecht. Dit gemiddelde bedraagt 450 mm per jaar (Van der Gaast en Massop, 2008). Er zijn andere schattingen die hoger uitkomen (zie o.a. vergelijkingen in Massop et al., 2005), maar een hogere verdamping leidde tijdens calibratie van de waterverdeling tot een te lage waterafvoer. Dit kan enerzijds het gevolg zijn van onzekerheden in de bepaling van de verdamping, anderzijds kan het zijn dat de jaarlijkse gemiddelde neerslag toch hoger is, doordat in het heuvelachtige Duitse deel meer regen valt. Om deze onzekerheden te ondervangen, is uitgegaan van de meest conservatieve schatting voor de verdamping van 450 mm.

De bodemopslag is bepaald door voor elke geologische eenheid de waterretentie te berekenen. Op basis van de Staringreeks (Wösten et al., 2001) is voor elk type ondergrond het vochtgehalte bij veldcapaciteit (pF 2) bepaald (tabel 1). Om vast te stellen tot welke type ondergrond elke geologische eenheid behoorde, is gekeken naar sedimentsamenstelling, leem- en kleigehaltes en organisch stofgehalte. Dit is gedaan op basis van sedimentbeschrijvingen op de Duitse 1:200:000 geologische kaart en bodemprofielbeschrijvingen van de Nederlandse 1: 50:000 bodemkaart (Stiboka, 1979). Voor het meest stroomopwaartse deel van de Duitse Vecht in Nordrhein-Westfalen was geen informatie beschikbaar. Omdat het voornamelijk om verweerd klei-mergelgesteente ging, is gebruik gemaakt van bodemprofielbeschrijvingen in een vergelijkbaar gebied, namelijk die van Zuid-Limburg (Stiboka, 1990).

Tabel 1. Vochtgehalte bepaald per geologische eenheid volgens Staringreeks

Geologische eenheid	**Indeling volgens Staringreeks**	**Type sediment**	**Vochtgehalte θ**
Veengebied	V017	Meso- en eutroof veen	0.72
Sedimentair gesteente	K013	Zware klei	0.53
Grondmorene/stuwwal	Z06	Keileem	0.27
Smeltwater afzettingen	Z05	Grof zand	0.05
Dekzanden en stuifzanden	Z03	Sterk lemig zeer fijn tot matig fijn zand	0.20

Het vochtgehalte is in eerste instantie vermenigvuldigd met de bodemdikte boven grondwaterspiegel om zodoende tot een totale bodemopslag in m te kunnen komen. Voor de Waterschappen Velt en Vecht en Regge en Dinkel zijn kaarten met gemiddelde grondwaterstanden beschikbaar (Van der Gaast en Massop, 2008; Van der Gaast et al., 2006). Op basis hiervan is een schatting van de grondwaterstand per

geologische eenheid gemaakt. Echter, de waterbalans was hierdoor niet kloppend te krijgen en de totale afvoer viel hierdoor veel te laag uit. Daarom is besloten om de bodemretentie als sluitpost te gebruiken. Zie de paragraaf over Calibratie voor verdere informatie.

De laatste component in de waterbalans is de afvoer. LAPSUS werkt alleen met oppervlakte afvoer en heeft geen module voor kwel, grondwaterstroming en laterale afvoer. Het is daarom niet mogelijk een onderscheid te maken tussen deze posten. Al het water dat wordt afgevoerd, wordt daarom via het aardoppervlak naar de waterlopen getransporteerd. Van der Gaast en Massop (2008) geven aan dat in het Waterschap Velt en Vecht per jaar gemiddeld tussen de 0 en 30 dagen sprake is van enige plasvorming, dat wil zeggen dat er water op het maaiveld geborgen wordt. Plasvorming is een eerste vereiste voor oppervlakte-afvoer. Dit aantal dagen lijkt te weinig te zijn om de totale afvoer van (neerslag – verdamping – berging) = x mm te kunnen vervoeren.

De situatie is anders voor de heuvelachtige delen en de grondmorenegebieden. In de stuwwallen en grondmorenes bevinden zich vanaf maaiveld tot -30 cm beneden maaiveld impermeabele kleilagen die waterstagnatie kunnen veroorzaken (Stiboka, 1979). In Duitsland heeft zich op het sedimentaire gesteente een dunne, zware kleibodem gevormd. In beide gevallen zal de bovengrond snel verzadigd zijn en door de gradiënt van het terrein, snel oppervlakte afstroming plaatsvinden. Dat waterberging in deze gebieden lastig is, blijkt uit het NLWKN jaarrapport van 2007 (NLWKN, 2007), toen door hevige regenval veel oppervlakte-afvoer plaatsvond. Daarom is de situatie van maximale oppervlakte afvoer in deze gebieden realistischer dan voor de vlakke gebieden met venen, dekzanden en fluviatiele afzettingen.

Bovenstaand in oogschouw nemend, kan gesteld worden dat bij de modellering met LAPSUS uitgegaan wordt van maximale erosie omdat alle waterafvoer via het aardoppervlak geschiedt.

2.2.5 Erosiewaarden voor geologie en landgebruik

Aan elke klasse van de geologische kaart en de landgebruikskaart is een erosieweerstandsfactor (*K-factor*) toegekend. Hoe lager de waarde, des te minder gevoelig een klasse is voor erosie. Voor elke gridcel in het gebied is vervolgens de factor voor beide kaarten met elkaar vermenigvuldigd om tot een definitieve erosiefactor te komen. Landgebruik en bodem/geologie samen bepalen namelijk de erosiepotentie van een gebied.

Voor beide kaarten is gebruik gemaakt van *K-factoren* die gebruikt worden voor de Universal Soil Loss Equation, de meest voorkomende methode om bodemerosie te schatten (www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/00-001.htm#tab2, 12 december 2008). De *K-factor* voor bodems wordt geschat op basis van sedimentsamenstelling en organisch stofgehalte. Een inschatting van de gemiddelde sedimentsamenstelling voor elke geologische klasse is gebaseerd op de 1:200.000

geologische kaarten van Duitsland en bodemprofielbeschrijvingen (Stiboka, 1979). In het geval van sterk heterogene sediment- of vegetatiesamenstellingen, zoals bij de klasse Fluviatiele afzettingen en de klasse Akkerland en tuinbouw het geval is, is uitgegaan van een gemiddelde *K-factor* van alle facies of landbouwtypen. De *K-factor* voor braakliggend terrein is wegens gebrek aan gegevens geschat.
Voor landgebruiksklassen zijn rechtstreekse erosieweerstanden beschikbaar. De volgende waarden zijn gevonden (tabel 2).

Tabel 2. Erosiewaarden (k-factoren) per Geologische en Landgebruiksklasse

Geologie			**Landgebruik**	
Geologische klasse	**Sediment-samenstelling**	***k-factor***	**Landgebruiksklasse**	***k-factor***
Veengebied	n.v.t.	0	Bebouwing	0
Bebouwing	n.v.t.	0	(Gemengd) bos en bomenrijen	0.10
Sedimentair gesteente	Zware klei	0.15	Natte heide en moeras	0
Grondmorene/stuwwal	Keileem	0.20	Akkerland en tuinbouw	0.44
Smeltwater afzettingen	Zand	0.07	(Natuurlijk) grasland	0.02
Dekzanden en stuifzanden	Zeer fijn zandige leem	0.33	Water	0.01
Water	n.v.t.	1.0	Overig landgebruik	0
			Braakliggend terrein	0.70

2.3 Calibratie LAPSUS

2.3.1 Waterbalans

Om te bepalen of de gesimuleerde hoeveelheid afvoer en de ruimtelijke variabiliteit in afvoer realistisch was, is op een aantal punten een vergelijking gemaakt met gemeten waarden. Deze waarden zijn afkomstig van gemeten dagwaarden bij een aantal Nederlandse en Duitse stuwen over de jaren 2000-2007. Over deze jaren is de gemiddelde afvoer per seconde genomen. Voor de stuwen in Duitsland waren alleen de gegevens voor 2007 beschikbaar. Omdat de afvoer in Duitsland sterk regenafhankelijk is, zijn de waarden uit 2007 teruggeschaald naar gemiddelde waarden voor 2000-2007 door de regenval uit 2007 te vergelijken met die uit de jaren 2000-2007. In 2007 viel gemiddeld 1000 mm neerslag (NLWKN, 2007; KNMI, 2007), tegen gemiddeld 800 mm over 2000-2007. De gemeten afvoer in 2007 is dus met 20% teruggeschaald.

De datareeks van 2007 voor het Afwateringskanaal was onvolledig. In de gemeten maanden was consequent 2.8 keer zoveel water aanwezig vergeleken met de waterafvoer voor het Ommerkanaal. Daarom is het jaarlijkse gemiddelde van het Ommerkanaal met 2.8 vermenigvuldigd en gebruikt als benadering voor het Afwateringskanaal.

Als middel om de hoeveelheid afvoer te reguleren, is de bodemretentie gebruikt. Elke geologische eenheid kent een bepaald waterbergend vermogen, zoals uitgerekend met hulp van de Staringreeks. Door dit te vermenigvuldigen met een bepaalde bodemdikte D, kan in principe de afvoer gecalibreerd worden, omdat het waterbergend vermogen rechtstreeks gekoppeld is aan de totale afvoer. In tabel 3 is de totale hoeveelheid geborgen water per geologische eenheid weergegeven.

Tabel 3 Geborgen water per gridcel per geologische klasse

Geologische klasse	**Geborgen water in mm/jr per gridcel**
Veengebied	216
Bebouwing	0
Sedimentair gesteente	0
Grondmorene/stuwwal	0
Smeltwater afzettingen	20
Dekzanden en stuifzanden	80
Water	0

In tabel 4 is de uiteindelijke gesimuleerde afvoer uitgezet tegen de gemeten waarden bij de verschillende stuwen.

Tabel 4 In LAPSUS gesimuleerde afvoer bij een aantal ijkpunten

Stuw	**Gemeten afvoer 2007 in m3/s**	**Gemeten afvoer 2000-2007 in m3/s**	**Gesimuleerde afvoer in m3/s**
Vecht bij Ommen (NL)	n.v.t.	24.02	25.35
Ommerkanaal (NL)	n.v.t.	2.42	0.12
Afwateringskanaal (NL)	6.78 ?	6.78 ?	4.30
Regge (NL)	n.v.t.	9.94	11.49
Vecht bij Emlichheim (DU)	n.v.t.	17.80	16.23
Dinkel (DU)	8.23	6.58	5.76
Vecht bij Ohne (DU)	5.96	4.77	3.63
Vecht bij Neuenhaus (DU)	11.97	9.58	6.55

We zien dat de gesimuleerde waarden redelijk goed overeenkomen met de gemeten waarden voor de jaren 2000-2007. Bij Neuenhaus echter wordt ongeveer een derde te weinig water gegenereerd. Dit kan te wijten zijn aan de ingewikkelde kunstmatige waterhuishouding bij Neuenhaus. Deze situatie is met hulp van een 'natuurlijk' drainagepatroon niet één op één na te doen.

Bij het Ommerkanaal wordt ook te weinig water gesimuleerd. Dit kanaal loopt van noord naar zuid over een vlak gebied, geheel tegen de natuurlijke drainagerichting in. ArcGIS laat de waterlopen van oost naar west lopen omdat het gebied klaarblijkelijk in die richting weghelt. Dit valt niet te ondervangen en we nemen daarom voor kennis aan dat er bij het Ommerkanaal te weinig water gesimuleerd wordt.

2.3.2 Sedimentbalans: *P-* en *K-factoren*

LAPSUS kent twee hoofdparameters die gebruikt worden om de sedimentbalans te calibreren. De *P-factor* wordt gebruikt om te bepalen hoe snel sediment, dat in transport is, weer neergelegd kan worden; de *K-factor* bepaalt de erodeerbaarheid van

het terrein. In eerder onderzoek (onder andere Schoorl et al., 2002) werden deze parameters zo afgesteld, dat de geproduceerde modelleeruitkomsten overeenkwamen met velddata. Een veel gebruikte methode is om de gesimuleerde hoeveelheid sediment per tijdseenheid op een bepaalde plek te toetsen aan wat er op die plek in werkelijkheid per tijdseenheid is afgezet of geërodeerd. Dit vereist altijd meetgegevens die uit veldwerk beschikbaar zijn gekomen. Navraag bij HKV, Waterschap Velt en Vecht en Waterschap Groot Salland, het NLWKN in Niedersachsen, Grafschaft Bentheim en nog een partner in Nordrhein-Westfalen, leverden niets op: er zijn er geen meetgegevens over sedimenttransport beschikbaar. In het kader van dit onderzoek was het niet mogelijk veldwerk uit te voeren, dus we hebben aannames moeten maken.

De *K-factor* bepaalt hoe gemakkelijk sediment losgemaakt kan worden. De reeds eerder genoemde erosiewaarden zijn gebruikt om de onderlinge erosieverhoudingen tussen geologische klassen in kaart te brengen. Deze waarden kunnen echter niet als absolute waarden gebruikt worden. Met de *K-factor* (met hoofdletter) kunnen al deze waarden tegelijkertijd veranderd worden, zonder dat de onderlinge verhoudingen veranderen. Zo kunnen we bijvoorbeeld alle waarden ineens met 10 vermenigvuldigen of delen.

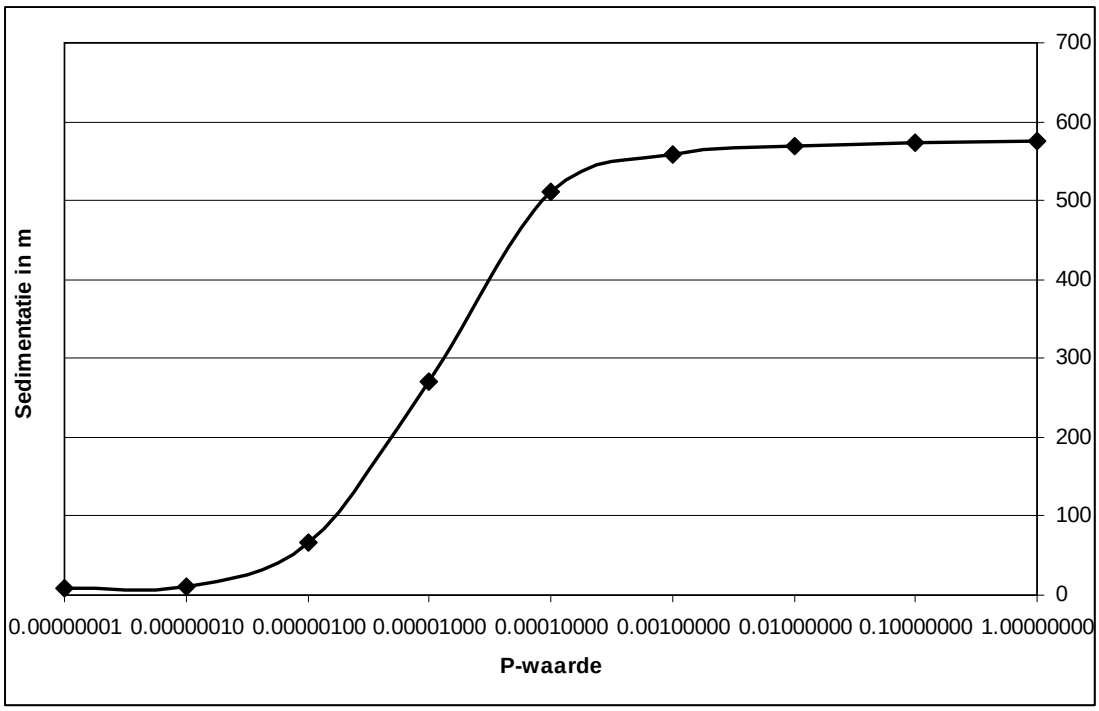
Omdat niet bekend is hoeveel sediment er door het Vechtsysteem gaat, is een proxy gebruikt om de totale hoeveelheid geërodeerd sediment aan te toetsen. Asselman et al. (2003) hebben berekend dat er gemiddeld 0.71 t/ha/jr aan helling-erosie plaatsvindt in het stroomgebied van de Rijn. Hoffmann et al. (2007) veronderstellen een lineaire relatie tussen de hoeveelheid geërodeerd hellingmateriaal en grootte van het stroomgebied. Hoe groter een stroomgebied, des te minder erosie er plaatsvindt. Zij hebben daartoe naar een aantal Midden-Europese rivieren gekeken die variëren in stroomgebiedsgrootte. Als we de waarde voor de Rijn van 0.71 t/ha/jr plotten in deze grafiek en interpoleren naar een stroomgebied ter grootte van de Vecht (103 tot 10 4 km2), dan komen we uit op een schatting van 0.5 tot 1.5 t/h/jr voor de Vecht. We hebben de waarde 1.5 t/ha/jr aangehouden als ijkpunt omdat we alleen de maximale erosie kunnen voorspellen. Dit komt overeen met een *K-factor* van 0.0011. Deze factor is gedurende het gehele onderzoek gelijk gehouden.

Voor de *P-factor* liggen de zaken wat lastiger. Daarom is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om te bepalen wat de invloed van de *P-factor* is op de erosie- en sedimentatiedynamiek in het gebied. De uitkomsten van deze analyse zijn gebruikt bij het verder invullen van elk scenario.

2.3.3 Gevoeligheidsanalyse *P-factor*

Er zijn een aantal runs gedaan met een verschillende *P-factor*. Hieruit bleek dat er alleen binnen een bepaald traject een verschil in sedimentatie optrad. Tussen de P-waarden 0.001 en 0.0000001 vindt er een sterke verandering plaats van 550 m naar 8 m sedimentatie. Buiten dit traject om bleef de waarde min of meer constant (figuur 5). Om deze reden hebben we het begin van het traject (P-waarde 0.001), het midden

van het traject (P-waarde 0.00001) en het einde van het traject (P-waarde 0.0000001) hieronder in meer detail geanaliseerd en ook een analyse door de tijd heen gemaakt.



Figuur 5 S-vormige curve voor bereik in P-waarden. De sedimentatie is de totale sedimentatie voor het hele stroomgebied

De analyse is gemaakt door in eerste instantie te kijken naar erosie- en sedimentatiekaartjes en door op basis van puur visuele verschillen iets te zeggen over het erosie- en sedimentatieverloop. Omdat er per *P-factor* per jaar een kaartje gegenereerd wordt, zijn er in totaal 90 kaartjes bekeken.

Na vijf jaar simuleren met een P-waarde van 0.001 lijkt in de bovenlopen van het Vechtsysteem en in de beekdalen zich meer sediment opgehoopt te hebben, terwijl in het Nederlandse deel de Vecht een nog meer eroderend karakter heeft gekregen. Dit patroon verandert nauwelijks na 10, 15, 20 en 30 jaar. Er lijkt alleen iets meer erosie in het Nederlandse deel van de Vecht plaats te vinden. Door de hoge *P-factor* wordt er niet genoeg sediment gemobiliseerd en blijft de Vecht een erosief karakter behouden.

Bij een *P-factor* van 0.00001 wordt het meeste sediment in de heuvelachtige gebieden neergelegd. De erosiedynamiek wijkt niet af van de vorige runs omdat de *K-factor* niet veranderd is, maar er is wel verschil in hoe het sediment over het gebied gedistribueerd wordt. We zien dat er in Duitsland op de berghellingen geen sediment meer achter blijft. Alles wordt rechtstreeks naar de kleinere en grotere beek- en rivierdalen getransporteerd, en naar de vlakke delen in het landschap zoals dalvlakten. Ook in Nederland is de Vecht nu overwegend sedimentair van aard, met af en toe nog een erosiepuls. Na vijf jaar simuleren is in de bovenlopen van de Vecht en

Steinfurter Aa iets meer sediment terecht gekomen, verder zijn er nauwelijks veranderingen opgetreden. Deze situatie verandert niet na 30 jaar simuleren.

Bij een *P-factor* van 0.0000001 is in het gehele systeem veel minder sediment aanwezig. In het bovenstroomse Duitse deel bevindt zich geen sediment meer op de berghellingen en nauwelijks nog aan de voet van hellingen. Het aanwezige sediment bevindt zich nu in de rivier- en beekdalen en op vlakke stukken terrein, zoals dalvlakten. De Dinkel vervoert nog steeds overwegend sediment, ook al zijn er iets meer erosiepulsen zichtbaar. De Vecht zelf is over het gehele traject nog steeds sedimentair van karakter, hoewel de intensiteit veel minder is. Na tien jaar simuleren is in het dal van de Radewijkerbeek veel meer sediment blijven liggen dat vanaf de stuwwallen komt. In Nederland is de Vecht iets erosiever geworden en in het bovenstroomse deel van de Vecht iets meer ophoping van sediment in de vlakke delen. Dit patroon verandert niet meer na tien jaar simuleren.

LAPSUS heeft ook bijgehouden hoeveel meter er per jaar meer of minder geërodeerd en gesedimenteerd wordt. Uit deze data blijkt dat er per jaar nauwelijks veranderingen optreden in de budgetten voor het hele stroomgebied. Per jaar nemen de erosie en sedimentatie gemiddeld met 0.5 m af voor het hele stroomgebied. Dit is een verwaarloosbaar kleine hoeveelheid en waarschijnlijk onderdeel van het natuurlijke denudatieproces zoals dat in alle landschappen wereldwijd voorkomt. Een 30-jaren reeks voor P-waarde 0.001 staat in tabel 5 gegeven.

Tabel 5 Jaarlijkse erosie en sedimentatie in m gedurende 30 jaar voor P-waarde 0.001. Waarden zijn accumulatieve waarden voor het hele stroomgebied

Jaar	Erosie	Sedimentatie	Jaar	Erosie	Sedimentatie
1	578.36	551.32	16	573.25	539.17
2	578.28	547.43	17	572.89	538.87
3	578.01	545.38	18	572.72	538.83
4	577.83	544.63	19	572.29	538.59
5	577.43	543.85	20	571.95	538.38
6	577.02	543.26	21	571.83	538.37
7	576.79	542.95	22	571.60	538.22
8	576.39	542.37	23	571.28	537.93
9	576.10	541.76	24	570.96	537.66
10	575.74	541.23	25	570.60	537.35
11	575.25	540.97	26	570.41	537.12
12	574.71	540.63	27	570.10	536.79
13	574.37	539.75	28	569.71	536.37
14	573.96	539.44	29	569.48	536.14
15	573.56	539.24	30	569.26	535.52

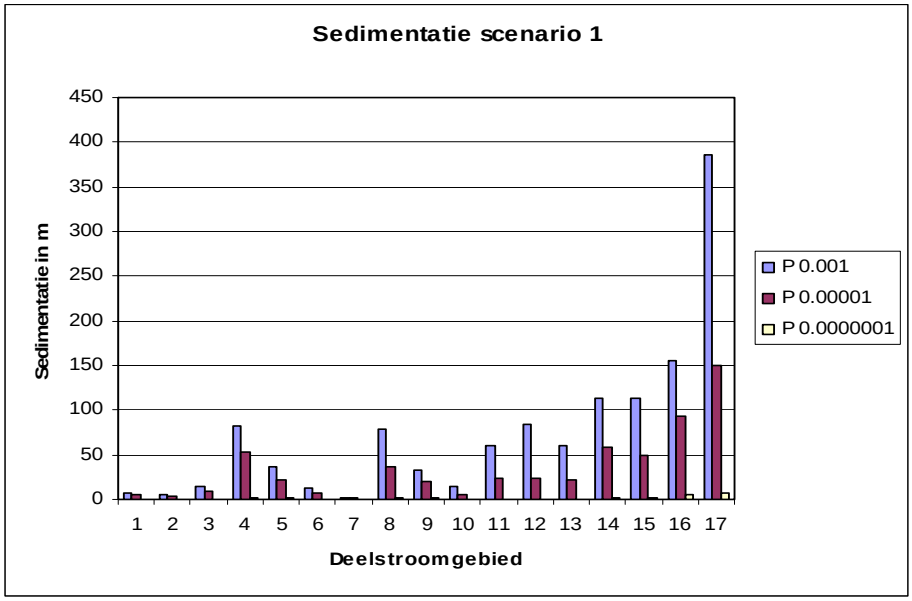
Uit de analyse blijkt dat de verschillen tussen de drie *P-factoren* erg groot zijn, maar de veranderingen door de tijd heen per *P-factor* nauwelijks een rol spelen. Klaarblijkelijk reageert het systeem lineair door de tijd heen. Dit is voor een deel te wijten aan de ingevoerde modeldata. We hebben er voor gekozen de erosiefactor K constant te houden. Dit hoeft in werkelijkheid niet zo te zijn. De *K-factor* voor een deelgebiedje kan veranderen doordat door erosie een helling vlakker wordt en dus minder snel gaat eroderen, of dat door wegslijten van een dunne laag bodemmateriaal het harde erosieresistentere gesteente tevoorschijn komt.

Door deze lineariteit is het niet nodig om per scenario ook nog eens een tijdanalyse te maken. Er is ervoor gekozen om de resultaten na tien jaar modelleren uit te werken, omdat er na deze periode nauwelijks nog veranderingen optreden in sedimentatiegedrag.

In eerste instantie zijn alle resultaten van de scenario's 1 t/m 3 uitgewerkt (scenario's worden in het volgende hoofdstuk uitgelegd) voor model runs met de drie verschillende P-waarden. Daaruit bleek dat de trend tussen de drie P-waarden steeds hetzelfde was, ongeacht het scenario. Bij een hoge P-waarde van 0.001 is er weinig sediment in transport, omdat het sediment weer snel kan worden neergelegd. Bij deze waarde is de hoeveelheid sedimentatie continu het hoogst. Bij een gemiddelde P-waarde van 0.00001 is er meer sediment in transport en wordt er minder snel sediment neergelegd. Hierdoor neemt de sedimentatiehoeveelheid af. Bij de lage P-waarde van 0.0000001 is bijna al het sediment in transport en is de sedimentatiewaarde het laagst. Figuur 6 geeft dit weer in een staafdiagram.

Erosie is onafhankelijk van de P-waarde omdat deze alleen gestuurd wordt door de *K-factor*; hiervoor is het dus niet nodig de drie P-waarden uit te werken.

Omdat de trend steeds gelijk is, is ervoor gekozen om één P-waarde te kiezen en daarmee verder te werken. De keuze voor de P-waarde 0.0000001 lijkt niet reëel, omdat het onwaarschijnlijk is dat in de Vecht al het sediment continu in transport is. Dit zou impliceren dat de Vecht alleen maar zeer fijn materiaal (silt, klei) zou vervoeren. Als we kijken naar de gemiddelde sedimentsamenstelling van de gronden in de dalvlakte van de Nederlandse Vecht, dan blijken deze te bestaan uit fijnzandige (150µ) gronden (referentie). Binnen de verdeling van sedimentkorrelgrootte neemt deze fractie een gemiddelde plaats in (tussen grof zand/grind aan de ene kant van het spectrum en klei aan de andere kant). Als we dit vertalen naar de P-waarde, dan is het aannemelijker om een gemiddelde P-waarde van 0.00001 te nemen als uitgangspunt.



Figuur 6 Sedimentatie in m per deelstroomgebied. De sedimentatie in m voor P-waarde 0.0000001 is zo gering dat deze niet zichtbaar is in de figuur

2.4 Analyse deelstroomgebieden

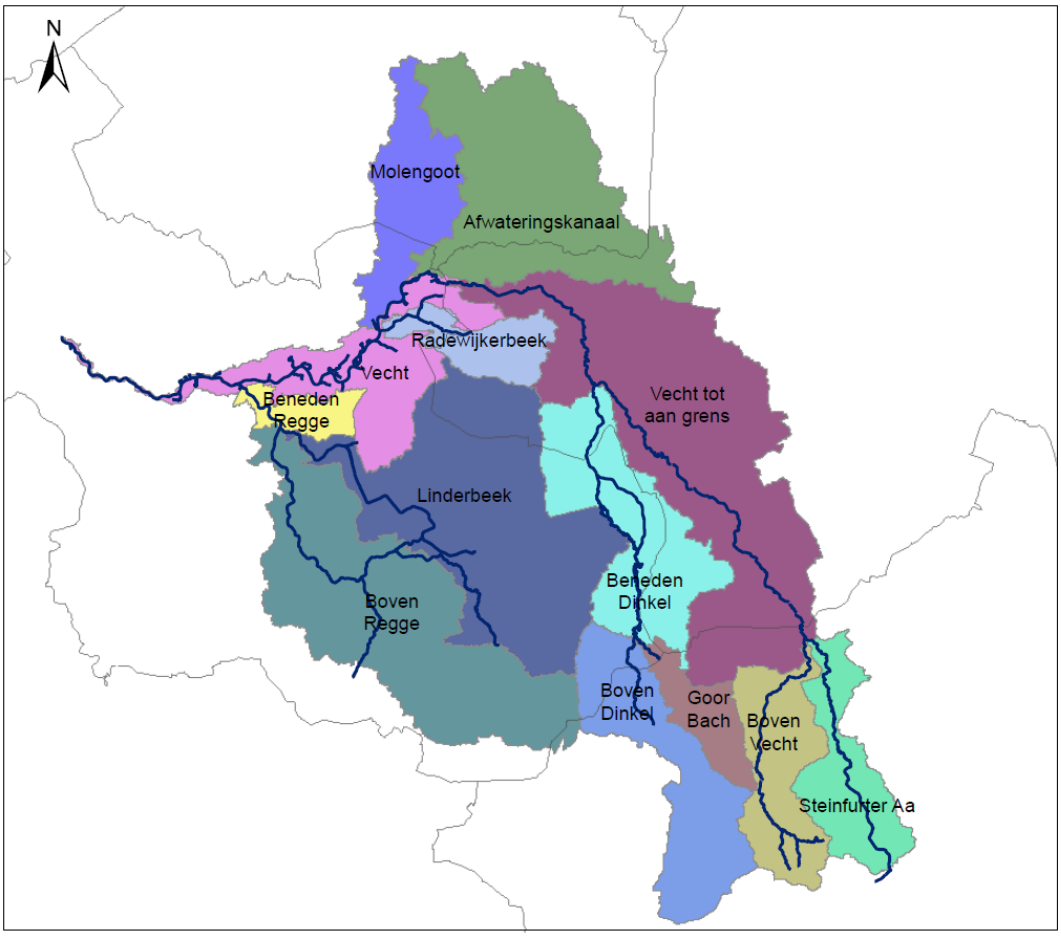
Om een beter en meer kwantitatief inzicht te krijgen in de ruimtelijke verspreiding van erosie- en sedimentatiegebieden, is het stroomgebied van de Vecht opgedeeld in 13 deelstroomgebieden (tabel 6, figuur 7). Dit is gedaan met de Hydrology-module in ArcGIS Spatial Analyst. Er is hierbij gebruik gemaakt van natuurlijke waterscheidingen. Dit wijkt enigszins af van de werkelijke situatie waarbij menselijke ingrepen in de waterhuishouding plaats vinden. Toch geeft het naar ons idee een goed genoeg beeld van hoe de onderlinge verhoudingen tussen deelstroomgebieden zijn. Figuur 7 en tabel 6 geven de namen en lokaties van de deelstroomgebieden weer. Sommige namen zoals Boven Vecht en Goor Bach zijn misschien geen officieel in gebruik zijnde namen en worden in dit onderzoek slechts ter aanduiding van de gebieden gebruikt.

Ook is het gehele stroomgebied van de Regge en Dinkel onderzocht, evenals die van Nederland en Duitsland. Deze staan niet apart aangegeven in de figuur.

Tabel 6 Locaties (begin- en eindpunten) van de deelstroomgebieden

Nummer	Naam	Locatie (begin- en eindpunt)
1	Nederlandse Vecht	Nederlands-Duitse grens tot Zwarte Water
2	Molengoot	Molengoot
3	Afwateringskanaal	Afwateringskanaal
4	Duitse Vecht	Samenloop Boven Vecht-Steinfurter Aa tot NL
5	Beneden Dinkel	Samenloop Goorbach tot samenloop Vecht
6	Radewijkerbeek	Radewijkerbeek
7	Beneden Regge	Samenloop Linderbeek-Boven Regge tot Vecht
8	Linderbeek	Linderbeek tot aan samenloop Regge
9	Boven Regge	Begin Regge tot samenloop Linderbeek
10	Goor Bach	Begin Goor Bach tot samenloop Dinkel
11	Boven Dinkel	Begin Dinkel tot samenloop Goor Bach
12	Boven Vecht	Begin Vecht tot samenloop Steinfurter Aa
13	Steinfurter Aa	Begin Steinfurter Aa tot samenloop Vecht
14	Regge totaal	Beneden Regge + Boven Regge + Linderbeek
15	Dinkel totaal	Beneden Dinkel + Boven Dinkel + Goor Bach
16	Nederland totaal	Nederlands-Duitse grens
17	Duitsland totaal	Nederlands-Duitse grens

Per stroomgebied is gekeken naar de hoeveelheid erosie, de hoeveelheid sedimentatie, de erosie-sedimentatiebalans en de Sediment Delivery Ratio (afgekort SDR). De SDR wordt berekend als 1-(sedimentatie in m / (erosie in m * -1)) en geeft aan hoeveel sediment er na ratio uit een gebied getransporteerd wordt. Het is in feite een maat voor de interne erosie-sedimentatiedynamiek van een gebied en hangt sterk af van de twee sturende krachten hellingsgradiënt en jaarlijkse waterafvoer. Zo kan bepaald worden welke zijtakken relatief het meeste sediment toevoeren aan de Vecht en welke zijtakken het meest gevoelig zijn voor veranderingen in omgevingsvariabelen.



Figuur 7 Deelstroomgebieden Vecht

2.5 Scenario's

2.5.1 Scenario 1: huidige situatie

In dit scenario is uitgegaan van de huidige situatie met stuwen en oeververdediging in de vorm van stortsteen. De oeververdediging is gesimuleerd door aan weerszijden van het Nederlandse deel van de Vecht een enkele rij gridcellen aan te brengen die niet-erodeerbaar is (landgebruiksklasse 1, bebouwing). Hierdoor vindt er geen afkalving door oppervlakte-erosie plaats. Dit is wel een grove benadering van de werkelijkheid, omdat elke gridcel 625 m2 is, terwijl een stukje oeververdediging vele malen kleiner is.

De zes stuwen in de Vecht (Junne, de Haandrik, Hardenberg, Diffelen, Vilsteren en Vechterweerd) zijn ook op niet-erodeerbaar gezet, door op die plek de gridcel aan te passen. In werkelijkheid bestaan de stuwen ook uit betonnen blokken waar water overheen stroomt en deze eroderen ook niet.

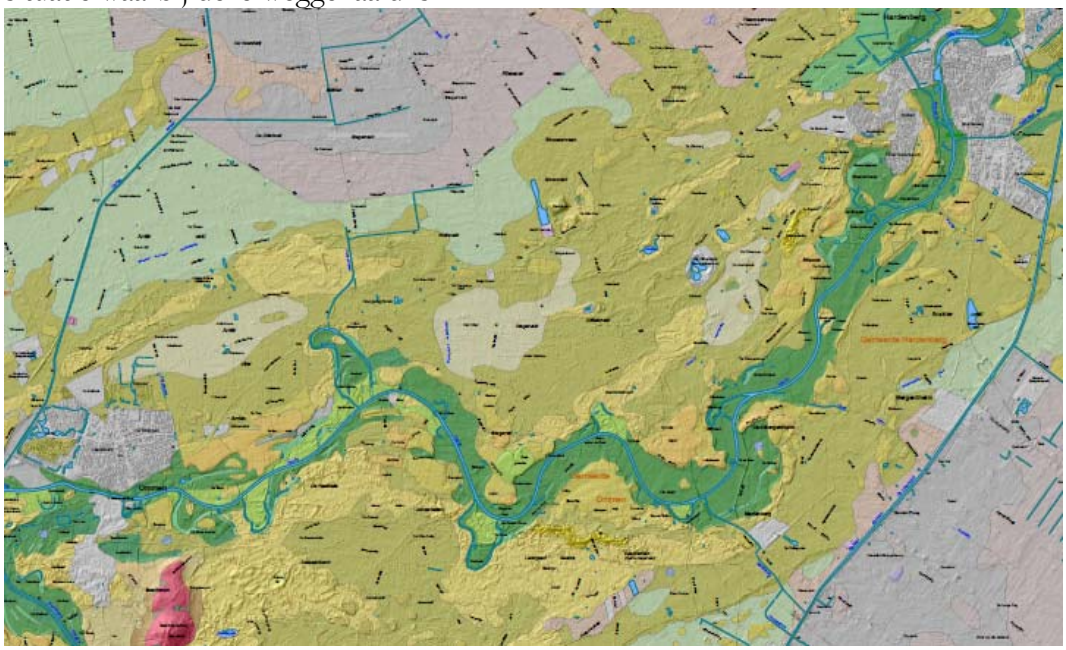
De DEM gaf geen correcte weergave van de waterhoogte van de Vecht. Daarom zijn de waarden van alle gridcellen tussen het traject Emlichheim en het Zwarte Water, die de waterloop van de Nederlandse Vecht vormen, handmatig aangepast. Uitgegaan is van het gemiddelde jaarlijkse streefpijl direct boven en beneden elke stuw (data HKV). Het niveauverschil tussen water onderkant stuw en water bovenkant volgende stuw is vervolgens lineair verrekend met het aantal gridcellen in dat traject. Bijvoorbeeld: het waterpeil aan de voet van stuw de Haandrik is 7.54 m en het waterpeil aan de bovenkant van de eerstvolgende, verder stroomafwaarts gelegen, stuw Hardenberg 6.78 m. Het verschil is 7.54 – 6.78 = 0.76 m. Laten we voorstellen dat het traject tussen deze twee stuwen in één km is en uit 40 gridcellen bestaat. Dan neemt de hoogte bij de eerstvolgende gridcel vanaf de Haandrik af met 0.76/40 = 0.019 m. Deze cel heeft dan een waarde van 7.54 m – 0.019 m = 7.021 m.

Omdat LAPSUS geen waterkolom kent, en alles daarom oppervlakkig afvoert, wordt de waterspiegel van de Vecht ook gezien als een oppervlak waar afstroming van plaatsvindt.

2.5.2 Scenario 2: nieuwe loop Nederlandse Vecht met en zonder overstromingen

In dit scenario wordt een deelgebied van de Nederlandse Vecht onder de loep genomen. Er is een uitsnede genomen van het Vechtdal tussen Hardenberg en Ommen (zie figuur 8). Er is over een periode van tien jaar gesimuleerd met elk jaar een overstromingsgebeurtenis. Uitgaande van bovenstaande gegevens zijn er drie subscenario's onderzocht.

Om te beginnen is er een vergelijking gemaakt tussen de situatie waarbij de oeverbekleding (steenstort) van de huidige Vechtloop gehandhaafd blijft, en de situatie waarbij deze weggehaald is.



Figuur 8 Vechtdal tussen Hardenberg en Ommen (uitsnede uit de Geomorfologische Kaart van Nederland 1:50.000)

In het tweede subscenario is er gekeken wat het effect van een overstroming op de sedimentatie in het rivierdal is. De vorming van nieuwe sedimentaire structuren zoals oeverwallen en kommen vindt vooral plaats tijdens hoogwaterpieken. Daarom is het simuleren van een overstroming een plausibele manier om te achterhalen of de vorm van het Vechtdal, de aard van de Vechtloop en de beschikbare hoeveelheid sediment zich lenen voor natuurlijke sedimentatieprocessen. Een overstroming werd gesimuleerd door het dal van de Vecht vol te laten lopen met een laag water van 1.5 m. Deze hoeveelheid komt overeen met gemeten hoogwaterreeksen (data HKV, 2009). Als invoer voor de hoeveelheid opslibbing in het Vechtdal zijn gegevens gebruikt die verkregen zijn uit slibmattenonderzoek ten zuiden van Hardenberg. Over twee jaren met hoogwaterstanden is een opslibbing gemeten van ongeveer 2 mm (Maas en Makaske, 2009).

Als laatste wordt een vergelijking gemaakt tussen de huidige Vechtloop en een situatie met een nieuw aangelegde Vechtloop. Wolfert et al. (2009) hebben een alternatieve loop van de Nederlandse Vecht geschetst die, op basis van hun berekeningen, beter hoort bij de energiehuishouding van het Vechtsysteem. De nieuwe loop begint bij stuw De Haandrik en eindigt in het Zwarte water. De loop is ruim dertien km langer en maakt gebruik van een groot aantal oude meanderbochten. Ook zijn alle stuwen verwijderd (de stuw bij Hardenberg blijft gehandhaafd). Aan de voet van de stuw is het streefpeil van de Vecht 710 cm en benedenstrooms bij het Zwarte Water 0 cm. Er is voor de berekeningen in dit scenario een lineair verval in hoogte tussen deze twee punten aangehouden. Ook is de oeververdediging weggehaald, zodat er meer ruimte komt voor oeverafkalving.

2.5.3 Scenario 3: landgebruiksveranderingen

De uitkomsten van scenario 1 gaven aan dat het bovenstroomse Duitse deel van de Vecht een grote erosie- en sedimentatiedynamiek kent. Het is dan ook interessant om te kijken wat er gebeurt als door landgebruiksveranderingen de bovenstroomse erosie- en sedimentatiedynamiek verandert, en wat voor effecten dit benedenstrooms heeft.

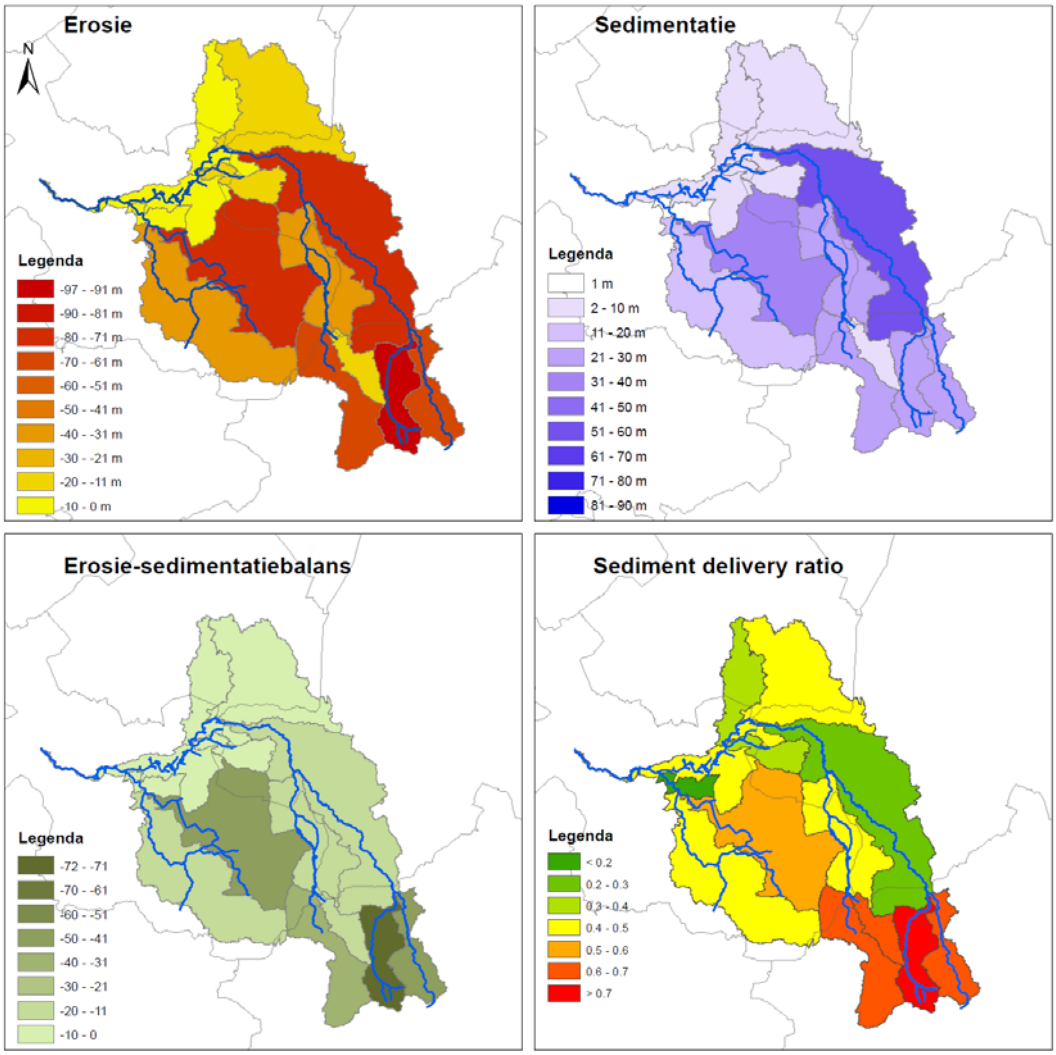
We hebben dit gesimuleerd door een virtueel scenario op te stellen waarbij in de deelstroomgebieden van de Boven Vecht, de Steinfurter Aa en de Boven Dinkel al het akkerland is vervangen door bos. Dit is naar het model toe vertaald door voor deze gebieden in LAPSUS de *k-factor* voor landbouwgrond om te zetten naar de *k-factor* voor bos. Hierdoor neemt de erosiegevoeligheid van de bovengrond sterk af.

3 Resultaten

De hieronder beschreven resultaten worden uitgedrukt in hoeveelheden (m) per deelstroomgebied. De resultaten van het tiende jaar modelleren worden besproken. De waarden zijn géén accumulatieve waarden van tien jaar modelleren, maar de waarden van jaar 10 alleen, dus in totaal één jaar.
Er is uitgegaan van een *K-factor* van 0.0011, wat leidt tot maximaal 600 m erosie voor het hele stroomgebied. De gebruikte *P-factor* is 0.00001.

3.1 Scenario 1

3.1.1 Algemeen beeld erosie- en sedimentatiekarakteristiek



Figuur 9a,b,c,d Totale erosie (a), totale sedimentatie (b), erosie-sedimentatiebalans (c) en de Sediment delivery ratio (d) per deelstroomgebied

Het eerste wat opvalt is dat de meeste erosie plaatsvindt bij de bovenloop van de Vecht en de Steinfurter Aa (figuur 9a, 10a). De aanwezigheid van heuvels bestaande uit sedimentair gesteente zorgt voor grote hoogteverschillen. Deze relatief steile hellingen zorgen voor veel oppervlakkige waterafvoer en sedimenttransport. Met name op de flanken van de heuvels wordt veel materiaal geërodeerd; bovenop de heuvels is relatief iets minder erosie gaande. De aard van de helling (hellingshoek, hellingslengte) is dominant over geologie; binnen de klasse sedimentair gesteente is de erosie op de steile hellingen sterker dan nabij de voet van de hellingen. Ook de keilemen en dekzanden gelegen op steile hellingen kennen een sterke erosie.

De erosie wordt enigszins gedempt door de aanwezigheid van bos en grasland op deze hellingen. Het meeste sediment wordt afgezet aan de voet van de hellingen en op de overgangen naar de beekdalen van de Vecht en Steinfurter Aa.

De tweede grote bron van sediment is het stuwwallen- en keileemgebied van de Paasberg, de Galgenberg en de Braamberg ten noorden van Ootmarsum. Ook hier vindt veel transport van sediment plaats richting Vecht en Dinkel.

Het keileemgebied tussen Hengelo, Enschede en Oldenzaal blijft wat erosie betreft ver achter bij de andere keileem-stuwwalgebieden. Hier lijkt de aanwezigheid van voornamelijk grasland, bos en bebouwing in combinatie met een vrij vlak gebied erosie tegen te gaan.

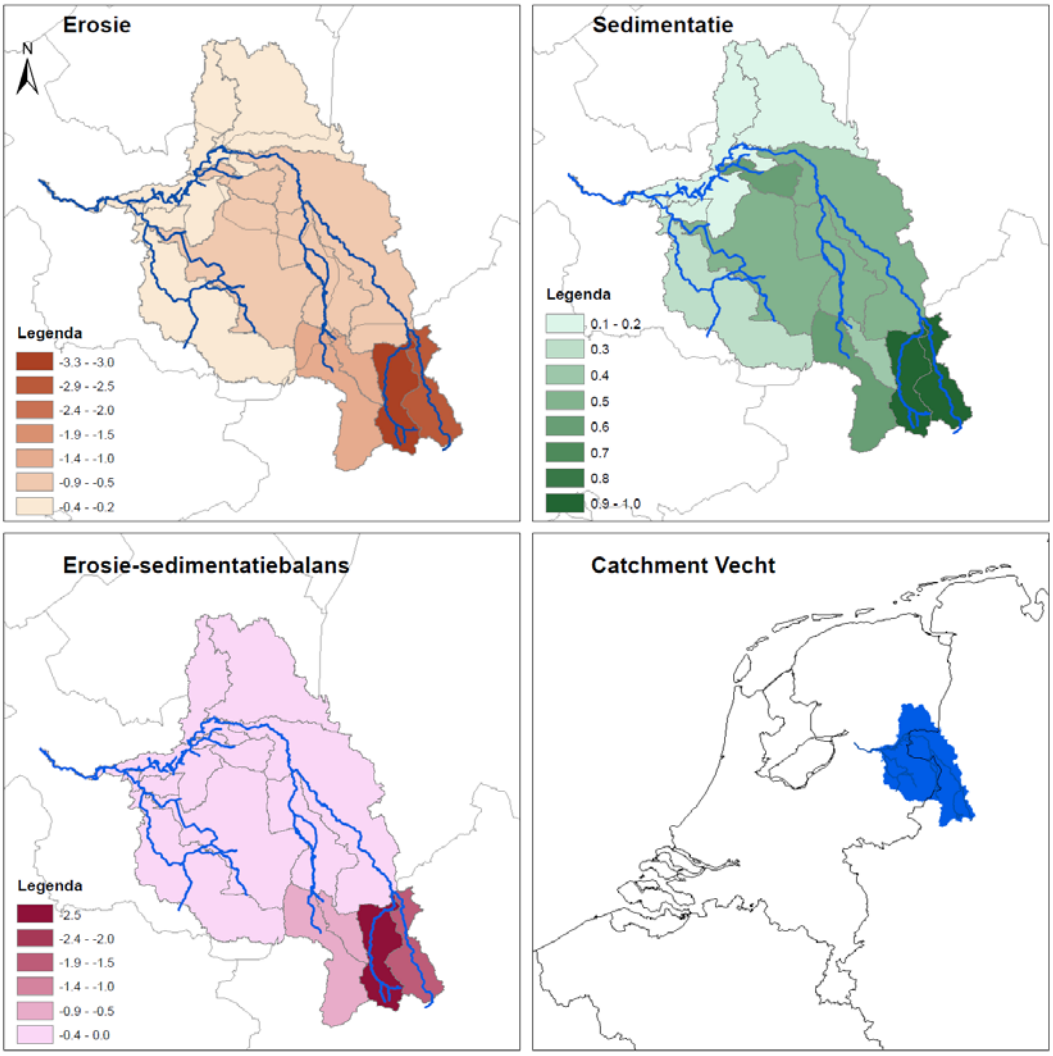
Aan de westkant van de Regge vindt ook relatief veel erosie plaats vanaf de stuwwallen van de Holterberg. Doordat dit gebied de waterscheiding vormt, is het totale aandeel aan sediment voor de Regge echter beperkt.

In de overige vlakke gebieden vindt ook wat erosie en sedimentatie plaats, maar veel minder dan in bovengenoemde gebieden. Deze gebieden lijken veel meer een doorgeefluik voor sediment te zijn, dan dat zij zelf sediment genereren.

De loop van de Vecht vertoont een sedimentair karakter in praktisch heel Duitsland. Pas in de buurt van Emlichheim gaat dit over in een erosief karakter en dit blijft zo in het hele Nederlandse deel. Doordat langs de loop van de Vecht oeverbescherming is aangebracht, vindt er geen erosie of sedimentatie plaats langs de oeverwallen van de Vecht. Wél zien we dat er in de verlaten meanderbochten langs de Vecht sedimentatie plaatsvindt door oeverafkalving.

De Steinfurter Aa en de Regge daarentegen vertonen over hun gehele traject een voornamelijk sedimentair karakter, doordat de transportafstand tussen hun loop en gebieden die sediment leveren, kleiner is. De Dinkel kent een afwisseling van sedimentatie en erosie. In de bovenloop treedt vooral sedimentatie op, maar in de benedenloop treedt sterke erosie op.

Over de algehele lijn genomen zijn in Duitsland de erosie- en sedimentatieprocessen veel intensiever aanwezig dan in Nederland.



Figuur 10a,b,c,d Gemiddelde erosie (a), gemiddelde sedimentatie (b) en de gemiddelde erosie-sedimentatiebalans (c) per deelstroomgebied en het stroomgebied van de Vecht (d)

3.1.2 Erosie

Figuur 9a geeft een overzicht van de erosie per deelstroomgebied. De hoeveelheid erosie in het hele stroomgebied van de Regge en de Dinkel is het grootst, gevolgd door de Boven Vecht, Linderbeek, de Duitse Vecht, de Steinfurter Aa en de Boven Dinkel. De erosie in de andere, voornamelijk Nederlandse deelstroomgebieden, is beduidend minder. De stroomgebieden van de Regge en Dinkel zijn in hun geheel ook opgenomen in de figuur. Te zien valt dat in beide gebieden ongeveer evenveel erosie optreedt. Er is ook een analyse gemaakt van de hoeveelheid erosie in het Nederlandse respectievelijk Duitse deel van het hele stroomgebied van de Vecht (deelstroomgebieden 16 resp. 17). Hieruit komt naar voren dat in Nederland 160 m sediment geërodeerd wordt tegen gemiddeld 415 m in Duitsland.

Omdat de totale hoeveelheid erosie sterk afhankelijk is van de grootte van het deelstroomgebied, is in figuur 10a ook de gemiddelde erosie per deelstroomgebied weergegeven. Het betreft de gemiddelde erosie per gridcel per deelstroomgebied. Te zien valt dat in de Boven Vecht gemiddeld de meeste erosie plaatsvindt, gevolgd door de Steinfurter Aa en in mindere mate de Boven Dinkel. In tegenstelling tot de gesommeerde erosie, kennen de Linderbeek en de Duitse Vecht een gemiddelde hoeveelheid gemiddelde erosie. De gehele Regge en Dinkel komen niet veel verder dan een gemiddelde plaats, hoewel de Dinkel bijna twee keer zoveel gemiddelde erosie kent als de Regge. De andere Nederlandse zijtakken kennen een relatief lage gemiddelde erosie, conform de gesommeerde erosie. Hieruit valt op te maken dat in de Duitse bovenlopen van het stroomgebied Vecht (Boven Vecht, Boven Dinkel, Steinfurter Aa) de meeste erosie plaatsvindt, en dat in het benedenstroomse Nederlandse deel de minste erosie plaatsvindt. In Duitsland in het algemeen vindt bijna drie keer zoveel erosie plaats als in Nederland.

3.1.3 Sedimentatie

De gesommeerde en gemiddelde sedimentatie zijn weergegeven in figuur 9b en 10b. In figuur 9b vindt in de Regge en Dinkel de meeste sedimentatie plaats, gevolgd door de Duitse Vecht, de Linderbeek, de Boven Vecht, de Boven Dinkel en de Steinfurter Aa. In de Nederlandse Vecht, de Molengoot en het Afwateringskanaal gebeurt bijna niets. In de Linderbeek blijkt ook meer sedimentatie plaats te vinden dan in de Boven Regge.

Kijken we echter naar de gemiddelde sedimentatie, dan blijkt de Steinfurter Aa na de Boven Vecht de meeste sedimentatie te kennen, op de voet gevolgd door de Boven Dinkel. Hierna komen de Duitse Vecht, de Beneden Dinkel, de Raderwijkerbeek en de Linderbeek. De Nederlandse Vecht, de Molengoot en het Afwateringskanaal kennen een geringe hoeveelheid sedimentatie.

De Dinkel en de Regge voeren ook veel sediment aan. Kijken we echter naar de gemiddelde waarde, dan komen deze drie rivieren niet verder dan een gemiddelde hoeveelheid sedimentatie. De Boven Dinkel, de Boven Vecht en de Steinfurter Aa zijn de belangrijkste sedimentatiegebieden. In de overige gebieden gebeurt weinig. Opmerkelijk is dat zelfs het Nederlandse deel van de Vecht weinig sedimentatie ondervindt en zeer laag scoort in beide figuren. Nog opmerkelijker is dat in Duitsland gemiddeld anderhalf tot bijna twee keer zoveel sedimentatie plaatsvindt als in Nederland, terwijl Nederlands stroomafwaarts ligt.

3.1.4 Erosie-sedimentatiebalans

In onderstaande figuren 9c en 10c is de hoeveelheid erosie en sedimentatie bij elkaar opgeteld om een idee te krijgen van de netto hoeveelheid sedimentatie die plaatsvindt. Te zien valt dat alle waarden negatief zijn. Er is dus sprake van een erosieoverschot in alle deelstroomgebieden.

De Boven Vecht en de Steinfurter Aa hebben zowel absoluut als gemiddeld het grootste erosieoverschot. Dit betekent dat zij relatief gezien het meeste sediment aan de Vecht leveren. Ook de Linderbeek en de Boven Dinkel leveren veel sediment aan de Vecht, maar dit beeld is enigszins vertekend omdat de Linderbeek een veel groter stroomgebied heeft dan de eerdergenoemde zijrivieren.

De Nederlandse zijrivieren en kanalen leveren heel weinig sediment op. De Nederlandse Vecht zelf, de Molengoot, het Afwateringskanaal en de Radewijkerbeek kennen een heel lage waarde. Dit betekent dat het hele noordelijke deel van het Nederlandse Vechtsysteem (Drenthsche keileemplateau) nauwelijks iets bijdraagt aan sediment.

Het hele stroomgebied van de Regge en de Dinkel leveren een bovengemiddelde hoeveelheid sediment aan in absolute hoeveelheden, maar naar ratio van stroomgebiedsgrootte komen zij niet verder dan een gemiddelde positie. Gemiddeld gezien heeft het systeem van de Dinkel een groter erosieoverschot dan het systeem van de Regge. De Regge (Beneden en Boven Regge samen) levert een gemiddelde hoeveelheid sediment aan, minder dan verwacht werd. De Linderbeek blijkt eigenlijk de belangrijkste toevoerpost van sediment voor het Reggesysteem te zijn.

Zowel de Nederlandse als Duitse Vecht kennen een gering erosieoverschot; hierdoor lijken zij voor hun sedimenttoevoer afhankelijk te zijn van de zijtakken en dan met name de bovenlopen.

Als we het Nederlandse deel van het Vechtsysteem vergelijken met het Duitse deel, dan zien we dat in Duitsland het erosieoverschot in Duitsland ongeveer vier keer zo groot is als in Nederland. Duitsland is dus voor aanvoer van sediment een vele belangrijkere bron dan Nederland.

3.1.5 Sediment Delivery Ratio

De SDR (figuur 9d) is een ratio geschaald tussen 1 en 0. Bij 1 wordt al het sediment dat in een deelgebied geërodeerd wordt, binnen het gesimuleerde jaar ook uit het gebied getransporteerd; bij een waarde 0 blijft al het geërodeerde materiaal binnen de gesimuleerde tijdspanne in het gebied liggen. De SDR is dus eigenlijk een maat voor de interne dynamiek van een gebied en laat zien hoe efficiënt een zijtak sediment levert aan de Vecht. Figuur 9d laat zien dat de Boven Vecht, de Steinfurter Aa en de Goorbach de hoogste SDR hebben, gevolgd door de Boven Dinkel.

De Nederlandse Vecht, de Molengoot en het Afwateringskanaal hebben een gemiddelde waarde. De Duitse Vecht heeft een lage waarde.

De Linderbeek heeft een bovengemiddelde SDR, iets hoger dan die van de Boven Regge zelfs. De Regge en Dinkel hebben een bovengemiddelde SDR, waarbij de Dinkel net iets meer sediment uit zijn stroomgebied transporteert.

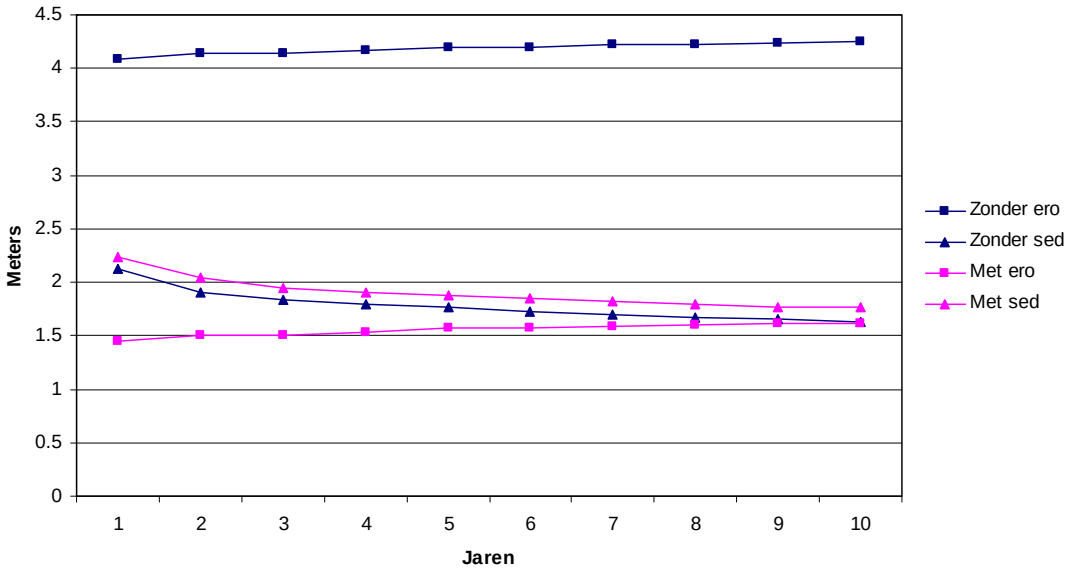
De SDR voor Duitsland tenslotte, is anderhalf maal zo hoog als die van Nederland.

3.2 Scenario 2

In dit scenario is ook over een periode van 10 jaar gemodelleerd en worden de resultaten in totale hoeveelheid erosie of sedimentatie in meters weergegeven. In tegenstelling tot scenario's 1 en 3 wordt in dit scenario wel het verloop door de tijd heen gepresenteerd. Omdat we nu in een klein gebied (Vechtloop tussen Hardenberg en Ommen) werken, maakt een meter meer of minder sediment al snel een wezenlijk verschil.

3.2.1 Weghalen oeververdediging

In dit subscenario is er een simulatie gedraaid waarbij de oeververdediging (steenstort) van de huidige Vechtloop in het dal van de Vecht tussen Hardenberg en Ommen is weggehaald. In onderstaande figuur 11 is de totale hoeveelheid erosie en de totale hoeveelheid sedimentatie mét en zonder oeververdediging uitgezet tegen een tijdreeks van tien jaar simuleren. Per jaar is er tevens een overstromingsgebeurtenis gesimuleerd. Deze hebben geen invloed op het relatieve verschil tussen de situatie met en zonder oeverbekleding.



Figuur 11. De huidige loop van de Vecht met oeververdediging en zonder oeververdediging gesimuleerd over een periode van 10 jaar. "Met ero" geeft de erosie bij een situatie met oeververdediging aan; "Met sed" de sedimentatie met oeververdediging. "Zonder" geeft de erosie en sedimentatie zonder oeververdediging weer.

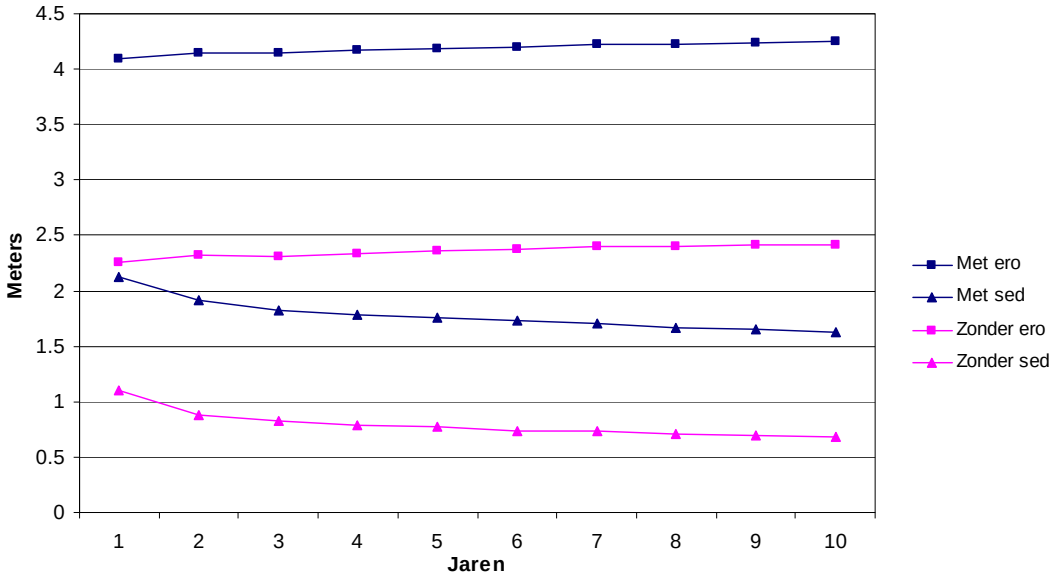
Wanneer de oeververdediging gehandhaafd blijft, ligt de totale erosie in het dal van de Vecht rond de 1.5 m. Wanneer deze weggehaald wordt, stijgt de hoeveelheid erosie naar ruim 4 m. Door de tijd heen blijft de erosie licht stijgen.

De verschillen bij de gemeten sedimentatiewaarden zijn ongeveer gelijk, hoewel het behoud van de oeververdediging iets gunstiger uit lijkt te pakken voor de hoeveelheid sedimentatie. Hierbij wordt gemiddeld 1.7 m sediment afgezet tegen 1.5 m wanneer de steenstort weggehaald wordt. In beide gevallen zien we dat de sedimentatie door de tijd heen licht afneemt.

3.2.2 Effect van overstromingen

In onderstaande figuur 12 zijn de gesimuleerde erosie- en sedimentatiewaarden bij een situatie met en zonder overstromingen weergegeven. Zonder jaarlijkse overstromingen ligt de totale hoeveelheid erosie rond de 2 á 2.5 m. Met jaarlijkse overstromingen ligt deze ruim boven de 4 m. De erosie stijgt over de periode van 10 jaar licht en de stijging is na 10 jaar nog niet afgevlakt.

De hoeveelheid sedimentatie ligt zonder overstromingen oorspronkelijk rond de 1.1 m, maar neemt in latere jaren af naar 0.6 m. Wanneer er sprake is van overstromingen, ligt de sedimentatie veel hoger, tussen de 2.1 en 1.6 m. In beide gevallen neemt de hoeveelheid sedimentatie door de tijd heen licht af.



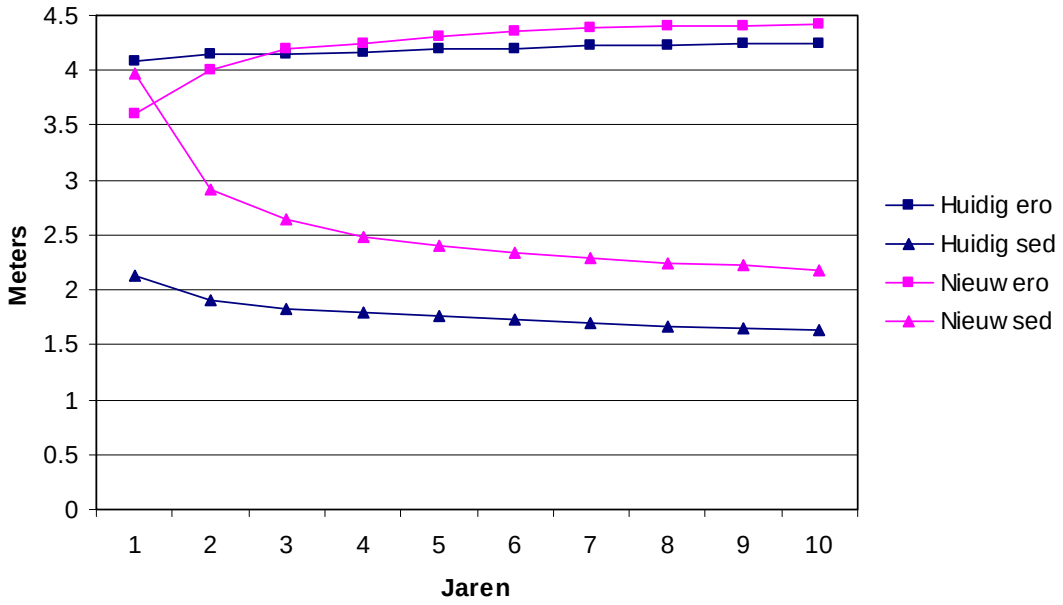
Figuur 12 Effect van overstromingen op de hoeveelheid erosie en sedimentatie in m over een periode van 10 jaar. 'Met' geeft situatie met overstromingen weer, 'Zonder' de situatie zonder overstromingen. 'ero' staat voor erosie en 'sed' voor sedimentatie

3.2.3 Huidige Vechtloop versus nieuwe Vechtloop

In figuur 13 staat de hoeveelheid erosie en sedimentatie weergegeven in de situatie met huidige en de situatie met nieuwe Vechtloop. De erosie bij de huidige Vechtloop ligt net boven de 4 m en blijft ligt stijgen over een periode van 10 jaar. De hoeveelheid erosie neemt iets toe bij de nieuwe Vechtloop en ligt gemiddeld 0.15 m hoger. Ook in dit geval is er sprake van een stijgende trend over een periode van 10

jaar. De hoeveelheid sedimentatie bij de huidige Vechtloop ligt oorspronkelijk net boven de 2 m, maar neemt na 2 jaar simuleren af naar 1.6 m. In het geval van de nieuwe Vechtloop ligt de hoeveelheid sedimentatie aanzienlijk hoger. In het begin zelfs rond de 4 m, maar dit zwakt al snel af naar 2.2 m na 10 jaar simuleren. In beide gevallen reageert de sedimentatie door de tijd heen op een zelfde manier. De manier waarop de afname zich manifesteert is gelijk bij de huidige en de nieuwe loop.

Saillant detail is dat bij de nieuwe Vechtloop er in het begin meer sedimentatie is dan erosie, maar dat dit verandert na het eerste jaar simuleren. Waarschijnlijk is het riviersysteem na de aanleg van de nieuwe loop dusdanig uit balans, dat er eerst veel sediment gegenereerd wordt. Pas na twee jaar herstelt de balans zich enigszins en neemt de erosie de overhand.



Figuur 13 Effect van de aanleg van een nieuwe Vechtloop op de hoeveelheid erosie en sedimentatie in m over een periode van 10 jaar. 'Huidig' geeft situatie met huidige Vechtloop weer, 'Nieuw' de situatie met nieuwe Vechtloop. 'ero' staat voor erosie en 'sed' voor sedimentatie

3.3 Scenario 3

Ook voor dit scenario is het stroomgebied van de Vecht opgedeeld in 13 deelstroomgebieden. Voor de deelstroomgebieden 2, 3, 6-10 en 14 is het erosieverschil altijd ongeveer 0. Omdat zij aparte zijtakken van de Vecht zijn, worden deze gebieden niet beïnvloed door stroomafwaartse veranderingen in sedimentlast van de Boven Dinkel, Boven Vecht of Steinfurter Aa.

3.3.1 Erosie

In de onderstaande tabel 8 staan de absolute erosiewaardes in m vermeld voor de situatie voor bebossing en de situatie na bebossing en zijn deze waarden gegeven als het percentuele verschil tussen de twee situaties. Een negatieve waarde betekent dat de erosie is afgenomen en een positieve waarde betekent dat de erosie is toegenomen.

De erosie in de herbeboste stroomgebieden is flink afgenomen met ongeveer 65 % in de Boven Dinkel, de Boven Vecht en de Steinfurter Aa. In het hele stroomgebied van de Dinkel is de erosie afgenomen met 34 %.

In de Duitse Vecht is de hoeveelheid erosie licht gestegen met ongeveer 2 %. Een oorzaak kan zijn dat door de afgenomen hoeveelheid erosie in de bovenlopen er ook een afname van sediment stroomafwaarts is geweest, waardoor de erosie licht is toegenomen.

In het algemeen beschouwd is de totale erosie in Duitsland met ongeveer 34% gedaald, van gemiddeld 418 m naar 272 m. In Nederland is de totale hoeveelheid erosie lichtelijk gedaald met ongeveer 2 %.

Tabel 8 Erosiewaarden in m per deelstroomgebied voor en na herbebossing

Nr.	Deelstroomgebied P-waarde 0.00001	Voor	Na	Verschil	Verschil %
1	NL Vecht	-10.33	-10.43	0.1	-1.0
4	DU Vecht	-73.18	-73.67	0.49	-0.7
5	Beneden Dinkel	-39.01	-39.01	0	0.0
11	Boven Dinkel	-61.24	-21.91	-39.33	64.2
12	Boven Vecht	-96.5	-34.17	-62.33	64.6
13	Steinfurter Aa	-68.05	-24.51	-43.54	64.0
15	Dinkel totaal	-115.84	-76.51	-39.33	34.0
16	Nederland totaal	-160.67	-158.79	-1.88	1.2
17	Duitsland totaal	-415.93	-273.26	-142.67	34.3

3.3.2 Sedimentatie

In onderstaande tabel zijn de sedimentatiewaarden in m vóór en ná bebossing weergegeven en het verschil tussen deze twee waarden in m en procenten. We zien dat in alle gevallen er óf geen verandering in sedimentatie is opgetreden (in geval van deelstroomgebieden die niet beïnvloed worden door de bovenlopen van de Vecht) óf dat er een afname in sedimentatie is. De Boven Dinkel, de Boven Vecht en de Steinfurter Aa ondergaan, afhankelijk van de P-waarde, een terugloop in sedimentatie van bijna 70%. De sedimentatie in de Beneden Dinkel loopt met 14% terug; de Dinkel in zijn geheel kent een terugloop in sedimentatie van 38%. De Duitse Vecht kent een terugloop van 21% en de Nederlandse Vecht een terugloop van 9%. Tenslotte zien we dat in Nederland als geheel de terugloop 4% bedraagt en in Duitsland 38%.

Samenvattend kan gesteld worden dat de Duitse Bovenlopen van de Vecht veel sterker beïnvloed worden door de herbebossing dan de rest van het stroomgebied. Het effect wordt minder naarmate we verder stroomafwaarts gaan en in Nederland is het effect het minst, hoewel nog steeds merkbaar.

Tabel . Sedimentatiewaarden in m per deelstroomgebied voor en na herbebossing

Nr.	Deelstroomgebied P-waarde 0.00001	Voor	Na	Verschil	Verschil %
1	NL Vecht	5.97	5.45	0.52	8.7
4	DU Vecht	52.78	41.85	10.93	20.7
5	Beneden Dinkel	21.27	18.25	3.02	14.2
11	Boven Dinkel	23.82	7.88	15.94	66.9
12	Boven Vecht	24.46	7.87	16.59	67.8
13	Steinfurter Aa	21.31	6.82	14.49	68.0
15	Dinkel totaal	50.1	31.14	18.96	37.8
16	Nederland totaal	94.16	90.13	4.03	4.3
17	Duitsland totaal	150.38	92.92	57.46	38.2

3.3.3 Erosie-sedimentatiebalans

Om te begrijpen hoe de erosie-sedimentatiebalans zich verhoudt, dienen de verschillende kolommen in tabel 10 gebruikt te worden. Een positieve waarde betekent een vermindering in netto erosie en een negatief getal een vermeerdering in netto erosie. Uit de figuur blijkt dat verhoudingsgewijs de Boven Dinkel, de Boven Vecht en de Steinfurter Aa rond de 60% minder erosief worden door de herbebossing. Uit tabel 10 blijkt dat er nog steeds sprake is van overwegend negatieve getallen. Dit impliceert dat, hoewel de erosie met 60% is afgenomen, deze gebieden nog steeds erosief van karakter zijn.

De Beneden Dinkel kent een toename in netto erosie van 17%; de Dinkel in zijn geheel kent een afname in erosie van 34%.

De Duitse Vecht kent een erosietoename van 56%. De Nederlandse Vecht neemt qua erosie toe met ongeveer 15%.

In Duitsland als zijn geheel neemt de totale netto erosie af met 35%, maar desondanks blijft het Duitse deel van het stroomgebied van de Vecht erosief qua karakter.

In Nederland neemt door de herbebossing de erosie toe met maximaal 5%. Ook hier geldt dat het hele stroomgebied erosief van karakter blijft. Deze slechts lichte stijging in erosieoverschot is voor een deel te wijten aan een afname in erosie in de Dinkel, die een toename in erosie meer benedenstrooms compenseert.

Tabel 10 Erosie-sedimentatiebalanswaarden in m voor en na herbebossin.

Nr.	Deelstroomgebied P-waarde 0.00001	Voor	Na	Verschil	Verschil %
1	NL Vecht	-4.35	-4.97	0.62	-14.3
4	DU Vecht	-20.38	-31.81	11.43	-56.1
5	Beneden Dinkel	-17.74	-20.76	3.02	-17.0
11	Boven Dinkel	-37.41	-14.02	-23.39	62.5
12	Boven Vecht	-72.03	-26.3	-45.73	63.5
13	Steinfurter Aa	-46.73	-17.69	-29.04	62.1
15	Dinkel totaal	-65.72	-45.36	-20.36	31.0
16	Nederland totaal	-66.49	-68.64	2.15	-3.2
17	Duitsland totaal	-265.5	-180.29	-85.21	32.1

4 Discussie

4.1 Scenario 1

In scenario 1 werd onderzocht hoe de huidige sedimenthuishouding van het hele Nederlands-Duitse Vechtsysteem in elkaar steekt. In een analyse van deelstroomgebieden kon achterhaald worden waar de belangrijkste sedimentbronnen zich bevinden en wat de hoofdzijtakken van de Vecht in totaal aan sediment bijdroegen. De resultaten laten op een duidelijke manier zien dat de *P-factor* een zeer grote invloed heeft op onze modeluitkomsten. We kunnen daarom niet zeggen hoeveel sediment er door het Vechtsysteem en haar deelgebieden gaat. Bovendien hebben we een maximale erosie van 600 m (1.5 ton/ha/jr) aan het hele gebied toegekend, waardoor er een artificieel plafond ontstaat. We kunnen daarom alleen iets zeggen over hoe deze 600 m erosie over het gebied verspreid is, en dus is het beter om naar trends te kijken en van daar uit aanbevelingen te doen.

Om te beginnen komt uit alle resultaten naar voren dat er in Duitsland veel meer sediment gegenereerd wordt dan in Nederland. De gemiddelde en totale erosie in Duitsland is bijna drie maal zo hoog als in Nederland. De gemiddelde sedimentatie is ook ongeveer drie keer zo hoog en de erosie/sedimentatiebalans laat zien dat er vanuit Duitsland ongeveer vier keer zoveel sediment getransporteerd wordt dan vanuit Nederland. De SDR tenslotte laat zien dat op jaarbasis er in Duitsland een sterkere interne dynamiek heerst dan in Nederland. Van de hoeveelheid sediment die in het land gegenereerd wordt, verlaat een hoger aandeel Duitsland dan dit voor Nederland het geval is.

Uit de resultaten blijkt verder dat het aandeel in erosie en sedimentatie in de gebieden Molengoot en Afwateringskanaal verwaarloosbaar klein is. Dit zou het gevolg kunnen zijn van de gebiedsindeling die Spatial Analyst in ArcGIS gemaakt heeft. Het westelijke deel van het Drenthse Keileemplateau is namelijk niet opgenomen in de berekeningen, omdat deze naar het westen weghelt en de natuurlijke drainage ook naar het westen gaat, in plaats van aansluiting bij de Vecht te zoeken. Dit gebied is echter slechts ongeveer een kwart van het hele gebied dat door de Molengoot en Afwateringskanaal wordt bestreken, dus zal qua erosie en sedimentatie niet significant meer bijdragen. Hieruit volgt dat het hele noordelijke Nederlandse deel van het Vechtsysteem een verwaarloosbaar kleine bijdrage levert aan de hoeveelheid erosie en sedimentatie in het stroomgebied van de Nederlands-Duitse Vecht.

De stroomgebieden van de Regge en Dinkel kennen een zelfde hoeveelheid erosie en een zelfde hoeveelheid sedimentatie. Het stroomgebied van de Regge is echter twee keer zo groot als dat van de Dinkel. Kijken we daarom naar de gemiddelde waarden, dan blijkt de Dinkel gemiddeld twee keer zoveel sediment te eroderen en af te voeren als de Regge.

Binnen het stroomgebied van de Regge speelt de loop van de Regge zelf slechts een bescheiden rol. Het is haar belangrijkste zijtak, de Linderbeek, die het overgrote deel van de sedimenten genereert en deze naar de Vecht vervoert. Dit kan enerzijds komen doordat een groot deel van de Regge in stortsteen is vastgelegd en dus weinig kan eroderen; anderzijds ligt in het stroomgebied van de Linderbeek een aantal grote moreneruggen (de Paasberg en de Galgenberg, zie figuur 3) die veel sediment aanleveren.

De Duitse Vecht komt in alle berekeningen als gemiddeld naar voren; er vindt niet bijzonder veel dynamiek plaats. Dit deelstroomgebied lijkt in eerste plaats vooral een doorvoerkanaal te zijn voor de sedimenten die in de bovenlopen Boven Vecht, Steinfurter Aa en Boven Dinkel gegenereerd worden.

De Nederlandse Vecht levert zonder haar zijrivieren bijzonder weinig sediment op. De dynamiek lijkt gering en volledig afhankelijk te zijn van de andere deelstroomgebieden. De Nederlandse Vecht komt naar voren als een licht erosieve rivier.

De bovenlopen van het Vechtsysteem in Duitsland zijn de gebieden die het meest intensief eroderen en die voor de grootste hoeveelheden sediment zorgen, zowel in absolute als relatieve zin. In alle berekeningen komt de Boven Vecht er als belangrijkste bron van sediment uit, op de voet gevolgd door de Steinfurter Aa en de Boven Dinkel. Dit komt vooral duidelijk naar voren in de berekeningen van gemiddelde erosie en gemiddelde sedimentatie. De andere figuren geven een enigszins vertekend beeld omdat zij absolute, gebiedsgrootte afhankelijke hoeveelheden geven. Daar de stroomgebieden van de Regge en de Dinkel grote gebieden zijn, zullen zij automatisch het meeste sediment opleveren. Toch zijn qua dynamiek de eerder genoemde Duitse bovenlopen vele malen belangrijker. Dit zal voor een groot deel te maken hebben met de steile hellingen in het gebied, het gemakkelijk erodeerbaar moedermateriaal en de erosiegevoelige vorm van landgebruik. Het is daarom ook aannemelijk dat veranderingen in erosie/sedimentatie in dit bovenstroomse deel grote invloed zullen hebben op het verloop van de benedenstroomse sedimentatieprocessen.

4.2 Scenario 2

In Scenario 2 werd onderzocht wat het effect is van het weghalen van de oeververdediging, het aanbrengen van een nieuwe Vechtloop en wat een jaarlijks terugkerende overstroming voor effecten zou hebben op het landschap. Uit de resultaten komt duidelijk naar voren dat het weghalen van de oeververdediging een positief effect heeft op de hoeveelheid erosie in het gebied. Deze neemt toe. Hierbij dient wel in ogenschouw genomen te worden dat alleen oevererosie door oppervlakkige waterafstroming van hoger op in het landschap plaatsvindt. Er vindt geen laterale afkalving plaats door stromend water van de rivier zelf. Dit proces neemt LAPSUS niet mee in haar berekeningen. Het is daarom aannemelijk dat de werkelijke erosie door aanvullende laterale oeverafkalving groter is.

Echter, ondanks dat de erosie toeneemt, neemt de hoeveelheid sedimentatie niet toe. Het kan zijn dat de Nederlandse Vecht qua sedimentopnamecapaciteit al bijna aan haar limiet ziet. Een toename in sediment door erosie heeft dan tot gevolg dat het extra sediment rechtstreeks op het Zwarte Water geloosd wordt, in plaats van dat het in het gebied gesedimenteerd wordt. Dit impliceert dat er aanvullende maatregelen genomen moeten worden om het sediment alsnog in het gebied te houden. Door bijvoorbeeld ontdiepen van de Vecht, kunnen er lokaal zandbanken in de rivier ontstaan. Op deze wijze zou de hoeveelheid sedimentatie kunnen toenemen en zelfs gestimuleerd kunnen worden door weghalen van de oeververdediging.

Op zich is de erosiestijging van enkele meters niet erg veel. Zelfs wanneer het hele traject tussen Emlichheim en Zwolle ontdaan zou worden van zijn oeververdediging, zou de totale toename in sediment gering zijn vergeleken met wat er jaarlijks aan sediment in het hele gebied gegenereerd wordt. Door de mogelijkheid van laterale oeverafkalving kan deze hoeveelheid echter nog iets stijgen. Het meest belangrijke echter is dat door weghalen van de oeververdediging de Vecht weer kans zal krijgen om in het laterale vlak te gaan bewegen, o.a. door het mogelijkerwijs verleggen van meanderbochten en uitbouwen van oeverwallen. Deze effecten zijn niet onderzocht in deze studie, maar kunnen potentiëel een grote impact hebben.

Het effect van overstromingen kwam duidelijk naar voren in de simulaties. Door overstromingen neemt de hoeveelheid erosie en sedimentatie significant toe. Zonder overstromingen blijft er bijna geen sediment achter in het gebied. Doordat de Vechtloop diep ingesneden in het Vechtdal ligt, wordt het merendeel van het sediment op het Zwarte Water geloosd. Vanuit het omliggende gebied in Nederland kan wegens de vlakke ligging en geringe erodeerbaarheid van het aardoppervlak, in ieder geval niets aangevoerd worden. Wil men dus naar een terugkeer van meer natuurlijke erosie- en sedimentatieprocessen in het Vechtdal, dan is het toestaan van (al dan niet jaarlijkse) inundaties van het Vechtdal een eerste vereiste.

Ook het aanbrengen van een nieuwe, meer meanderende Vechtloop heeft een positief effect op zowel de erosie als de sedimentatie in het Vechtdal. Deze nemen in beide gevallen toe, waardoor verwacht mag worden dat de Vecht een meer dynamisch karakter krijgt. Waarschijnlijk is het geringere verval en dus afname in stroomsnelheid de belangrijkste oorzaak. Het effect van het weghalen van de stuwen is niet afzonderlijk onderzocht en daardoor kunnen we niet met zekerheid stellen of dit een positief of negatief effect zal hebben. We kunnen alleen stellen dat het weghalen van de stuwen in combinatie met een andere Vechtloop een positief effect heeft.

4.3 Scenario 3

In scenario 3 werd onderzocht wat het effect is van het veranderen van het grondgebruik gesimuleerd door bebossen van de bovenlopen van de Vecht in Duitsland. Het blijkt dat hierdoor de erosie in de Boven Dinkel, de Boven Vecht en de Steinfurter Aa met 65% afneemt. Door het verminderen van sedimentaanvoer

door deze bovenlopen stijgt de erosie in de Duitse en de Nederlandse Vecht licht met 2%.

De sedimentatie neemt in de drie bovenlopen Boven Dinkel, Boven Vecht en Steinfurter Aa het meest af met bijna 70%. Deze waarden zijn vergelijkbaar met de percentuele terugloop in erosie dat aangeeft dat de erosie en sedimentatie in deze gebieden rechtstreeks aan elkaar gekoppeld is. De sedimentatie in de Duitse Vecht loopt terug met 21% en de Nederlandse Vecht met 9%. Als we naar de erosie-sedimentatiebalans kijken, dan zien we dat er een sterke netto toename van erosie in de Duitse Vecht is van 56%. Dit geeft aan dat de Duitse Vecht wat sediment toevoer betreft erg afhankelijk is van haar bovenlopen en eigenlijk alleen als een soort doorvoerkanaal fungeert. Ook in het Nederlandse deel van de Vecht worden de gevolgen van het verminderen van sediment bovenstrooms gevoeld; het erosieoverschot van de erosie-sedimentatiebalans neemt toe naar 15%, maar in veel mindere mate dan in de Duitse Vecht. Dit toont aan dat het Nederlandse deel een stuk ongevoeliger is voor bovenstroomse veranderingen dan het Duitse deel. Het lijkt erop dat het Nederlandse deel van het Vechtsysteem al bijna haar maximale capaciteit van sedimentopname en -depositie heeft bereikt. Een deel van de sedimenten die in de Nederlandse benedenloop van de Vecht terechtkomt, sedimenteert niet maar wordt rechtstreeks uit het gebied getransporteerd naar het Zwarte Water. Als door herbebossing de hoeveelheid sediment afneemt en de hoeveelheid erosie toeneemt, zal er ook minder in het Zwarte Water terecht komen. Maar de hoeveelheid in het Nederlandse deel zelf zal veel minder afnemen, door aanvulling van sediment dat anders in het Zwarte Water terecht was gekomen. Dit effect is ook al gemeten in scenario 2, waarbij het weghalen van de oeververdediging wel leidde tot meer erosie maar niet tot significant meer sedimentatie. Dit maakt duidelijk dat de Nederlandse Vecht voor een deel afhankelijk is van wat er in de Duitse bovenlopen gebeurt, maar ook deels zelfregulerend functioneert. Dit maakt duidelijk dat bij het ontwerpen van inrichtingsplannen, bijvoorbeeld voor natuurbeheer, rekening gehouden moet worden met zowel de Duitse als Nederlandse situatie. Soms wil men natuurlijke erosie- en sedimentatieprocessen terug brengen in het landschap. Bijvoorbeeld door het opnieuw verkrijgen van erosieprocessen in binnenbochten van een rivier en uitbouw van oeverwallen aan de buitenzijde. Deze zorgen voor hun beurt voor differentiatie in het landschap en ontstaan van successiegradiënten voor flora en fauna. Herinrichtingsmaatregelen in het Nederlandse deel van de Vecht leiden dan niet zondermeer tot een verbetering van deze processen, als in Duitsland de basisvoorwaarden (sedimenttoevoer) niet aanwezig zijn om deze processen te sturen.

4.4 Gebruik van LAPSUS voor modellering erosie- en sedimentatie processen

Het gebruik van LAPSUS voor deze studie had een experimenteel karakter. In deze paragraaf wordt daarom de toepasbaarheid van LAPSUS verder onder de loep genomen. Het lijkt erop dat LAPSUS goed gebruikt kan worden om op grotere schaal erosie- en sedimentatiepatronen weer te geven. LAPSUS geeft aan dat er in de

gebieden met veel reliëfverschil en in gebieden met een hoge erosiegevoeligheid van het landschap, een hoge erosie- en sedimentatiedynamiek heerst. In de vlakke gebieden en gebieden met geringe erosiegevoeligheid gebeurt weinig. Dit lijkt intuïtief een juiste weergave van de natuurlijke situatie te zijn. Overal ter wereld komt dit soort patronen terug, zie onder andere het werk van Schoorl et al. (2000; 2002). Of de geschatte hoeveelheden en snelheden juist zijn, is een tweede. Door gebrek aan materiaal om onze berekeningen aan te toetsen, kan dit niet met zekerheid worden gezegd. Het opdelen in deelstroomgebieden heeft op een goede manier inzichtelijk kunnen maken waar de meeste sedimentatie en erosie plaatsvinden. Ook hiervoor geldt dat de gegevens slechts vergelijkend gebruikt kunnen worden en niet kwantitatief.

LAPSUS heeft geen geomorfologisch-fluviatiele procesbeschrijvingen zoals lateraal afkalven van beddingen, erosie in binnenbochten en uitbouw van oeverwallen in buitenbochten. Dit effect is dus niet meegenomen in onze simulaties, maar kan wel een significante bijdrage leveren aan de hoeveelheid erosie en sedimentatie. Met name het aanleggen van een meer meanderende rivier, zoals in scenario 2 het geval was, kan leiden tot processen in de meanderbochten die de hoeveelheid erosie en sedimentatie nog meer versterken.

Het gebruik van een rivierloop met lineair aflopende hoogtewaarden per gridcel heeft voor enige afwijkingen gezorgd. In elk erosie- of sedimentatiekaartje komen er op regelmatige afstand 'rode putjes' voor in de loop van de Nederlandse Vecht. Deze putjes duiden op lokaal sterke erosie van de rivierloop en zijn waarschijnlijk het gevolg van de manier waarop wij de hoogtewaarden in de DEM ingebracht hebben. In het Nederlandse AHN hebben de gridcellen van plaatsen met wateroppervlakken vaak geen waarde. Dit komt omdat water het signaal van de satelliet die de hoogtewaarnemingen meet, reflecteert. De satelliet registreert dan geen hoogte. Wij hebben daarom op een artificiële manier de hoogte van de Vechtloop ingevoerd door gebruik te maken van een functie die lineair verval berekent. In de DEM van de Duitse Vecht kwamen wel correcte hoogtewaarden voor, waarschijnlijk door een extra nabewerking van de Duitsers. Wij hebben in de Duitse Vecht de hoogtewaarden van de gridcellen dan ook niet hoeven aanpassen. In de Duitse Vecht kwamen in onze simulaties dan ook geen rode putjes voor.

Bij gebruik van een rivierloop met een iets onregelmatiger verloop in hoogte zouden deze putjes waarschijnlijk niet gevormd zijn. Waarschijnlijk zijn zij het gevolg van het ontbreken van voldoende geaccumuleerd sediment. Door de regelmatig aflopende gladde bodem kan sediment er niet goed blijven liggen. Voor een volgende keer is het daarom raadzaam om geen lineair verval bij een rivierloop toe te passen.

Naast het lineaire verval is ook de breedte van de rivierloop een punt van verbetering. Wij zijn consistent uitgegaan van een breedte van 1 gridcel, oftewel 25 m. In werkelijkheid is het benedenstroomse deel van de Vecht driemaal zo breed. Dit zou invloed kunnen hebben op de hoeveelheid sediment die blijft liggen. Immers, in een bredere rivier moet dezelfde hoeveelheid water over een groter oppervlak

verdeeld worden, waardoor de stroomsnelheid afneemt en er dus eerder depositie van materiaal optreedt.

Ook de gebruikte aannames kennen een zekere mate van onzekerheid. In het bijzonder de gebruikte waarden voor de *k-factoren* van de geologische en landgebruiksklassen zijn onzeker. Deze zijn afgeleid van USLE-berekeningen, maar het is bekend dat voor dezelfde bodemtypes onder dezelfde omstandigheden toch verschillende waarden berekend kunnen worden. Het is eigenlijk niet goed te berekenen wat de erosiegevoeligheid van bodems en landgebruik is. Dit leidt er toe dat onze aangenomen k-waarden niet heel nauwkeurig kunnen zijn en dat bij gebruik van andere waarden wellicht iets andere erosieverhoudingen per klasse kunnen ontstaan. Vooral voor de landgebruiksklasse 'Water' kan dit gevolgen hebben. Onze analyses duiden er in veel gevallen op dat de Vechtloop erosief van karakter is, maar dit hangt grotendeels samen met de gekozen *k-factor*. In scenario 2 is gekozen voor een andere *k-factor*, waardoor de Vechtloop meer sedimentair van aard werd. Om deze reden waarschuwen wij ervoor om onze gegevens niet als kwantitatief te gebruiken. Het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse voor de *k-factor*, zoals gedaan voor de *P-factor*, had beter inzichtelijk kunnen maken wat de invloed van de *k-factor* op de modeluitkomsten is. Wegens gebrek aan tijd en de beperkte toetsingsmogelijkheden om de *k-factor* wat meer richting te geven, is hier vanaf gezien.

Toch heeft ook gebruik van een dergelijke *k-factor* haar nut, omdat bij gelijkhouding van deze factor er toch verschillen in deelscenario's kunnen ontstaan, die wel iets zeggen over relatieve veranderingen.

De manier waarop wij onze *k-factor* ingesteld hebben, kan ook nog invloed hebben op de wijze waarop het gebied erodeert. We hebben de *k-factor* door de tijd heen constant gehouden, terwijl dit niet zo hoeft te zijn. De *k-factor* voor de rivierloop verandert door de tijd heen en per plaats (stroomsnelheid van water verandert, dus ook het gemak waarmee sediment meegenomen kan worden). De bodemerodeerbaarheid kan ook afnemen wanneer bijvoorbeeld een ondiepe bodem tot aan het onderliggende gesteente geërodeerd wordt. Wederom, door gebrek aan toetsingsgegevens was er echter geen beter alternatief beschikbaar.

Ook is er geen gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de waterbalans, terwijl het debiet een belangrijke factor is voor de hoeveelheid sediment die geërodeerd, opgelost en vervoerd kan worden. Door te kijken hoe gevoelig het model is voor veranderingen in debiet, zou beter bepaald kunnen worden wat de betrouwbaarheid is van de gesimuleerde erosie- en sedimentatiewaarden.

4.5 Implicaties voor rivierherstel

Uit onze landschappelijk analyses is naar voren gekomen dat de belangrijkste bronnen van sediment zich in het bovenstroomse Duitse deel bevinden en dat er vanuit het noordelijke deel van het Nederlandse Vechtsysteem nauwelijks sediment

aangeleverd wordt. Daarnaast hebben wij aangetoond dat veranderingen bovenstrooms leiden tot veranderingen benedenstrooms, hoewel het Nederlandse deel ook deels zelfregulerend werkt. Dit laatste komt waarschijnlijk omdat de Nederlandse Vecht al aan haar maximale sedimentopnamecapaciteit zit. Bij het ontwerp van natuurinrichtingsplannen voor dit gebied is het daarom raadzaam om de ontwerpen af te stellen op het natuurbeleid in Duitsland. Een goede samenwerking tussen beide landen vergroot de kans op slagen van het Nederlandse natuurbeleid.

Indien het gewenst is om meer sedimenttoevoer te verkrijgen, en deze mogelijkheden bestaan niet in Duitsland, dan zou men zich binnen Nederland moeten richten op de Dinkel. De Dinkel is de grootste aanvoerpost van sediment binnen Nederland. Bovendien vloeit hij redelijk stroomopwaarts samen met de Vecht, zodat een vermeerdering in sediment doorwerkt in het hele Nederlandse Vechtsysteem.

Het is niet raadzaam om zich te richten op het noordelijke deel van het Vechtsysteem omdat daar geen sediment vandaan komt. De Regge mondt te ver stroomafwaarts in de Vecht uit, waardoor een mogelijke sedimenttoevoer verloren gaat in het Zwarte Water. De Nederlandse Vecht zelf tenslotte is een doorvoerkanaal voor sediment en ingrepen zullen niet leiden tot een zeer sterke toename in sediment.

Ingrepen in de Nederlandse Vecht zijn daarentegen wél nuttig op het gebied van sedimentretentie. De Nederlandse Vecht kent een erosieoverschot waardoor hij dieper insnijdt in het landschap. Het is waarschijnlijk dat op dit moment de sedimenten die Nederland wel bereiken, afgezet worden in het Zwarte Water. Dit komt omdat de Vecht bijna haar maximale opnamecapaciteit bereikt heeft en geen mogelijkheden heeft om sediment elders in het gebied af te zetten. De Vecht ligt te diep ingebed in het landschap, waardoor zij nergens kan sedimenteren. Het regelmatig laten overstromen van het Vechtdal is een goede manier om sediment af te zetten en te behouden. Daarnaast biedt het aanleggen van een nieuwe, verlengde en meer meanderende Vechtloop potenties om de hoeveelheid sedimentatie in het gebied te verhogen. Het weghalen van de oeververdediging tenslotte, vergroot de hoeveelheid erosie, waardoor de hoeveelheid vrijkomend sediment ook enigszins toeneemt. Dit zal niet leiden tot spectaculaire toenamen in sediment, maar het leidt wel tot een meer dynamische Vecht omdat er nu ook laterale afkalving en meanderverlegging kan plaatsvinden.

5 Conclusies

De belangrijkste bronnen van sediment in het Vechtsysteem bevinden zich in de Duitse bovenlopen, namelijk de Boven Dinkel, Boven Vecht en Steinfurter Aa. Daarna komen de Dinkel en de Regge. Binnen het systeem van de Regge is het de Linderbeek die voor de meeste sedimentaanvoer zorgt. In het noordelijke gebied van de Vecht (Drenthse keileemplateau) vindt nauwelijks erosie en sedimentatie plaats. Dit gebied is dan ook van weinig belang wat sedimenttoevoer aan de Nederlandse Vecht betreft. Ook in de Nederlands-Duitse hoofdloop van de Vecht wordt weinig sediment gegenereerd, zij fungeert meer als doorvoerkanaal.

Door het herbebossen van de Duitse bovenlopen nemen de sedimentatie en erosie in deze gebieden sterk af. Hierdoor neemt de erosie stroomafwaarts licht af. Door een sterke afname in sedimenttoevoer echter, neemt het erosieoverschot stroomafwaarts in de Duitse Vecht sterk toe. Ook in de Nederlandse Vecht neemt het erosieoverschot toe, maar in vele mindere mate dan in de Duitse Vecht. Waarschijnlijk heeft de Nederlandse Vecht al bijna haar maximum aan sedimentverzadiging bereikt en wordt het overschot in het Zwarte Water geloosd. Dit overschot fungeert als een soort buffer om bovenstroomse tekorten deels te compenseren.

Omdat het Nederlandse deel van de Vecht deels afhankelijk is van wat er in Duitsland gebeurt, wordt aangeraden het Nederlandse natuurbeleid af te stemmen op de Duitse situatie.

Om meer sediment in de Nederlandse Vecht te behouden, wordt aanbevolen een aantal ingrepen uit te voeren. Deze omvatten het aanleggen van een nieuwe Vechtloop, het weghalen van de oeververdediging en het toestaan van inundaties in het Vechtdal. Zonder overstromingen blijft er nauwelijks sediment liggen omdat de Vecht bijna alles op het Zwarte Water loost.

LAPSUS is een geschikt model om op de schaal van een stroomgebied inzichtelijk te maken waar zich de meest belangrijke oppervlakteprocessen afspelen. Het model is blijkt minder geschikt om geomorfologisch-fluviatiele processen goed in beeld te brengen.

6 Suggesties voor verder onderzoek

1. Uitvoering veldwerk dat erop gericht is om kwantitatieve data van sedimentfluxen van de Vecht te verzamelen. Dit kunnen metingen aan de rivier zelf zijn (opgelost stofgehalte, gehalte sediment in de bedding) of meer geologisch getinte metingen. Hierbij kan gedacht worden aan 137-Cesium dateringen aan oeversedimenten om de erosie- en sedimentatiesnelheden van het hele stroomgebied te bepalen. Zonder deze data is het niet mogelijk om kwantitatieve modeleeroefeningen aan het sedimentatiegedrag van de Vecht te doen.

2. Verder uitwerken van het effect van verschillende landgebruiksscenario's op het erosie- en sedimentatiegedrag van de Vecht. Dit onderzoek heeft laten zien dat landgebruiksveranderingen een belangrijke rol kunnen spelen in deze dynamiek en dat LAPSUS goed in staat is deze veranderingen door te berekenen. Op deze manier kunnen bijvoorbeeld de effecten van veranderend agrarisch natuurbeheer of omzetting van landbouwgronden naar natuur goed onderzocht worden.

3. Toepassing van een hydrologisch-geomorfologisch model op stroomgebiedsniveau. LAPSUS heeft een aantal effecten zoals het afkalven van rivieroevers door rivieren, niet kunnen simuleren. Daar deze potentieel bijdragen aan een verandering in sedimentbudget, is het van belang deze bijdrage middels een modelstudie te kwantificeren.

Literatuur

Asselman, N.E.M., H. Middelkoop and P.M. van Dijk, 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, p. 3225-3244.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1984. Geologische Übersichtskarte 1:200.000, CC 3902 Lingen (Ems). Hannover, Duitsland.

Gaast, J.W.J. van der, H.R.J. Vroon en M. Pleijter, 2006. De grondwaterdynamiek in het waterschap Regge en Dinkel. Alterra rapport 1335, ISNN 1566-7197. Alterra, Wageningen.

Gaast, J.W.J. van der, H.Th.L, Massop, 2008. De hydrologie voor het beheersgebied van waterschap Velt en Vecht: een karakterisering op basis van karteerbare kenmerken. Alterra rapport 1686, ISNN 1566-7197, Alterra, Wageningen.

Hoffmann, T., G. Erkens, K.M. Cohen, P. Houben, J. Seidel and R, Dikau, 2007. Holocene floodplain sediment storage and hillslope erosion within the Rhine catchment. *The Holocene* 17, 1, p. 105-118.

Maas, G.J. en B. Makaske, 2009. Sedimentatie in beekdalen. Ongepubliceerde gegevens.

Massop, H.Th.L., P.J.T. Bakel, T. van Kroon, J.G. Kroes, A. Tiktak en W. Werkman, 2005. Op zoek naar de 'ware' neerslag en verdamping: toetsing van de met het STONE 2.1-instrumentarium berekende verdamping aan literatuurgegevens en aan regionale waterbalansen en de gevoeligheid van het neerslagoverschot op de uitspoeling van nutriënten. Alterra rapport 1158, ISNN 1566-7197, Alterra, Wageningen.

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), 2008. Jahresbericht 2007, Norden, Niedersachsen.

Schoorl, J.M., M.P.W. Sonneveld and A. Veldkamp, 2000. Three-dimensional landscape process modelling: the effect of DEM resolution. *Earth surface processes and landforms* 25, p. 1025-1034.

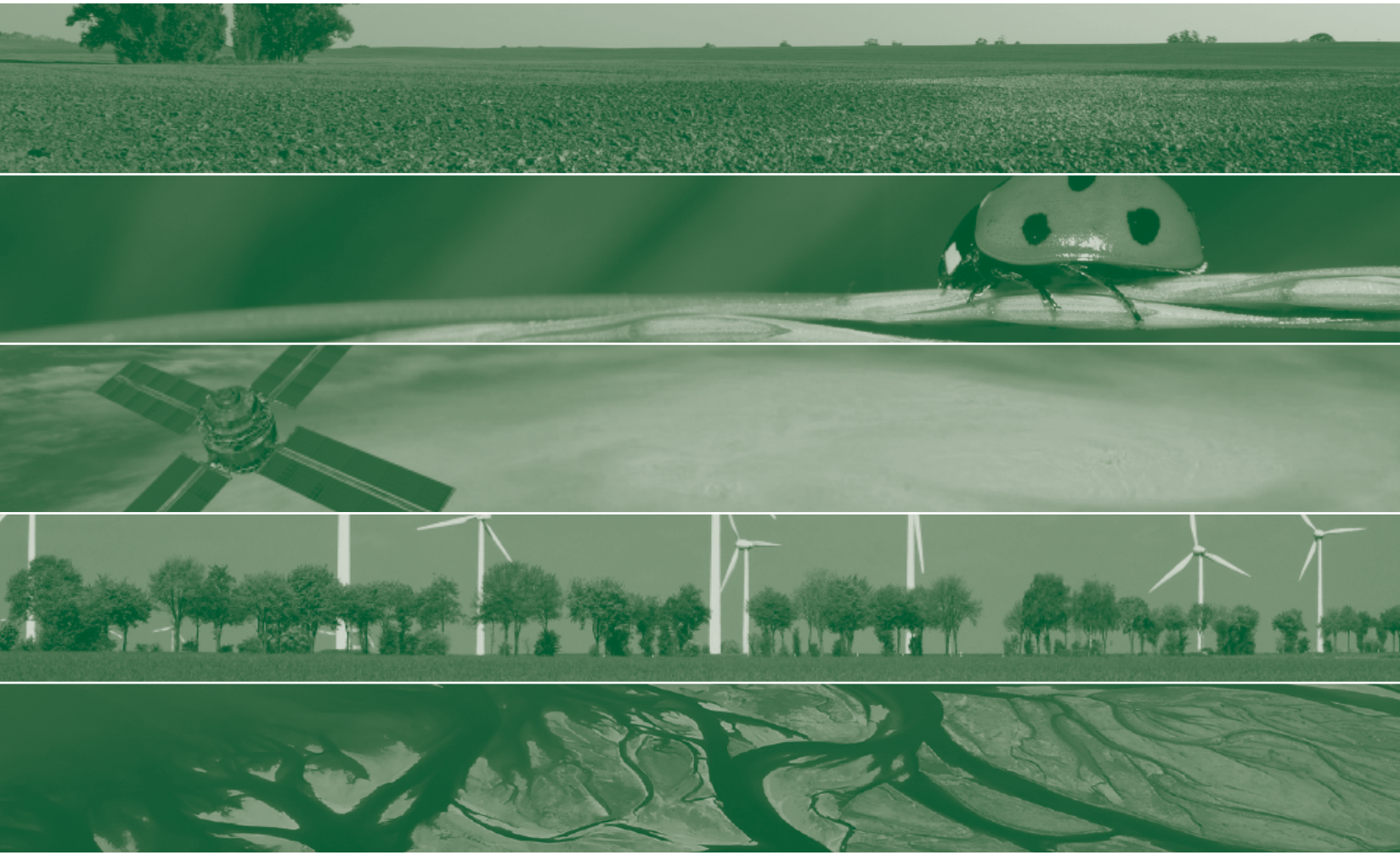
Schoorl, J.M., A. Veldkamp and J. Bouma, 2002. Modelling water and soil redistribution in a dynamic landscape context. *Soil sci. soc. Am. J.*, 66, p. 1610-1619.

Stiboka, 1979. Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000. Kaartbladen 34 west, 34 oost en 35. Stiboka, Wageningen.

Stiboka, 1990. Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000. Kaartbladen 61-62. Staringcentrum, Wageningen.

Wolfert, H., A. Corporaal, G. Maas, K. Maas, B. Makaske en P. Termes, 2009. Toekomst van de Vecht als een halfnatuurlijke laaglandrivier. Alterra-rapport 1897, ISSN 1566-7197, Alterra, Wageningen.

Wösten, J.H.M, G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. de, Stolte, 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Alterra rapport 153, ISNN 1566-7197, Alterra, Wageningen.



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is ‘To explore the potential of nature to improve the quality of life’. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra is hèt kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

Meer informatie: www.alterra.wur.nl