

VU Research Portal

Simulating discharge and sediment yield characteristics in the Meuse basin during the late Holocene and 21st Century

Ward, P.J.

2009

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Ward, P. J. (2009). *Simulating discharge and sediment yield characteristics in the Meuse basin during the late Holocene and 21st Century*. PrintPartners Ipskamp.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

Samenvatting / Dutch summary

Achtergrond

De verwachting is dat toekomstige klimaatverandering grote gevolgen zal hebben voor stroombekkens over de hele wereld, waaronder veranderingen in gemiddelde afvoer en overstromingsfrequentie van rivieren en veranderingen in de intensiteit van bodemerosie en het transporteren van sedimenten naar rivieren. De resultaten van recente met computermodellen uitgevoerde simulaties laten zien dat de gevolgen van toekomstige klimaatverandering relatief groot zouden kunnen zijn in Europa, met in Noordwest-Europa tijdens de winter een toename van neerslag van tussen de 5% en de 20%. Veranderingen in de hydrologie van een stroombekken zijn echter niet alleen afhankelijk van het klimaat, maar ook van landgebruik. Landgebruikveranderingen zijn het gevolg van complexe interacties tussen fysische, socio-economische en politieke processen, inclusief klimaatverandering. Het is tegenwoordig algemeen aanvaard dat afnames in het areaal bos in het verleden hebben geleid tot significante toenames van rivierafvoer en bodemerosie op meerdere plekken ter wereld.

In Nederland wordt het belang van onderzoek naar de invloed van klimaatverandering op de hydrologie al sinds de late jaren tachtig erkend. In het Maasbekken is het belang van dergelijk onderzoek alleen maar toegenomen sinds de grote overstromingen van 1993 en 1995. In die jaren trad de Maas buiten haar oevers wat leidde tot grootschalige overstromingsschade in de aangrenzende landen. Om een voorbeeld te noemen: de directe financiële schade als gevolg van de overstromingen van 1993 kwam alleen al in Nederland uit boven de €100 miljoen. Sindsdien zijn tal van studies uitgevoerd om de veranderingen in de hydrologie van het Maasbekken gedurende de laatste eeuw te onderzoeken. Deze studies laten zien dat, hoewel de jaargemiddelde afvoer van de Maas redelijk stabiel is gebleven tijdens de 20^e eeuw, de grootte van de maximale afvoer per jaar significant hoger is sinds halverwege de jaren tachtig. Daarnaast zijn meerdere hydrologische modellen gebruikt om de gevolgen van toekomstige klimaatverandering op de hydrologie van de Maas te onderzoeken. De resultaten van deze studies laten, als gevolg van de verandering in het klimaat, een toename zien in de overstromingsfrequentie in de 21^e eeuw, vooral in het winter halfjaar (november t/m april). Tot nu toe is relatief weinig onderzoek uitgevoerd naar de gevolgen van landgebruikveranderingen in het Maasbekken, mede doordat het areaal bos relatief stabiel gebleven is in de laatste eeuw.

Zowel in het Maasbekken als in andere middelgrote en grote bekkens is weinig onderzoek verricht met betrekking tot de invloed van klimaat- en landgebruikveranderingen op bodemerosie en het transport van geërodeerde sedimenten naar rivieren op de schaal van het gehele stroomgebied. Deze processen zijn echter wel belangrijk op de politieke agenda op lokaal, landelijk en Europees niveau. Bovendien kunnen deze processen tal van milieuproblemen veroorzaken. Bodemerosie op agrarisch land heeft meerdere nadelige on-site gevolgen, zoals op de korte termijn het verlies van de bovenlaag en afnemende oogsten, en op de lange termijn afnemende productiviteit. Het verplaatsen van geërodeerd bodemmateriaal naar rivieren vormt ook een grote bron van nutriënten, pesticiden en zware metalen, wat nadelig kan zijn voor de waterkwaliteit in rivieren en estuaria. Tevens kan het transporteren van geërodeerde sedimenten grote gevolgen hebben voor de morfologie van rivierbeddingen en het ecologisch functioneren van overstromingsvlaktes. Veranderingen in bodemerosie en het transporteren van geërodeerde sedimenten naar rivieren kunnen worden onderzocht door het analyseren van veranderingen in sedimentlast (de hoeveelheid sediment dat in een bepaalde tijdsperiode langs een bepaald punt van een rivier stroomt).

Tot op heden hebben studies naar de veranderingen van Maasafvoer en sedimentlast (op de schaal van het gehele bekken) ofwel gekeken naar afvoerreeksen van de laatste eeuw, ofwel gebruik gemaakt van hydrologische modellen die gekalibreerd zijn op metingen van die periode om veranderingen in de 21^e eeuw te simuleren. Dit levert echter problemen op voor het bestuderen van veranderingen op de lange termijn (bijv. perioden van honderd tot duizend jaar). Ten eerste zijn nauwkeurige metingen van de

dagelijkse Maasafvoer pas sinds 1911 beschikbaar en voor sedimentlast pas sinds 1995. Deze meetreeksen zijn te kort om de invloed van klimaatveranderingen op de lange termijn te bestuderen. Ten tweede zijn de resultaten van deze modellen niet gevalideerd tegen perioden waarin de leefomgeving anders was dan die van de laatste eeuw. Daarnaast is het bosareaal van het Maasbekken relatief stabiel gebleven gedurende de laatste eeuw, waardoor het moeilijk is om de gevolgen van grootschalige landgebruik-verandering te bestuderen.

Een manier om de veranderingen op de lange termijn wel te onderzoeken is het bestuderen van veranderingen in het hydrologische systeem tijdens een periode voordat metingen verricht zijn. Dit vakgebied heet paleohydrologie, waarvan het belang nog is verwoord in het meest recente rapport van de 'Intergovernmental Panel on Climate Change'. De resultaten van paleohydrologische studies kunnen een dataset opleveren waartegen modelresultaten gevalideerd kunnen worden op duizendjarige tijdschalen. Het simuleren van paleoafvoeren maakt het ook mogelijk om de gevolgen van lange termijn klimaatveranderingen op rivierafvoer te analyseren, evenals de gevolgen van meer omvangrijke veranderingen in klimaat en landgebruik dan die van de laatste eeuw. Bovendien, door afvoeren en sedimentlast te simuleren voor perioden waarin de invloed van de mens op de leefomgeving gering was, is het mogelijk de gevolgen van menselijke activiteiten te bestuderen ten opzichte van de natuurlijke situatie. Het modelleren van afvoeren en sedimentlast tijdens het Holoceen op de schaal van gehele stroombekkens is echter nog niet goed ontwikkeld. Voor zover mij bekend zijn nog voor geen enkele stroombekken ter wereld simulaties uitgevoerd met een ruimtelijke verdeling op hoge resolutie voor perioden tijdens het late Holoceen. Het ontwikkelen van zulke modellen is een interessante uitdaging, en zou kunnen leiden tot een beter inzicht in de relatieve invloed van klimaat- en landgebruikveranderingen op rivierafvoeren.

Onderzoeksdoel en onderzoeksvragen

Om in te spelen op de bovengenoemde vraagstukken, zijn de belangrijkste doelen van deze Ph.D. studie om lange termijn trends en veranderingen in de afvoer, overstromingsfrequentie en sedimentlast van de Maas te bestuderen tijdens het late Holoceen en de 21^e eeuw, als gevolg van natuurlijke en antropogene veranderingen in klimaat en landgebruik, én om de relatieve invloed van deze factoren ten opzichte van elkaar te analyseren. Om deze doelen te verwezenlijken zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. Kunnen we een gekoppelde klimaat-hydrologische modelleringaanpak ontwikkelen om lange termijn veranderingen in paleoafvoeren te simuleren? In hoeverre kunnen geologische en geomorfologische gegevens (zgn. proxy data) gebruikt worden om de bruikbaarheid van dergelijke modellen te analyseren als gereedschap voor het reconstrueren van paleoafvoeren?
2. Hoe is de afvoer en de overstromingsfrequentie van de Maas veranderd tussen een periode waarin de natuurlijke klimaatforceringen vergelijkbaar waren met die van vandaag en de invloed van de mens op landgebruik minimaal was (4000-3000 BP, 'before present', d.w.z. de jaren voor 1950 na Chr.), en een periode die beïnvloed is door antropogene veranderingen in landgebruik (1000-2000 na Chr.) en de menselijke uitstoot van broeikasgassen en sulfaataërosolen (postindustriële revolutie)? Welke factoren veroorzaken deze veranderingen?
3. Wat zijn de relatieve invloeden van de te verwachten klimaat- en landgebruikveranderingen op de afvoer en overstromingsfrequentie van de Maas tijdens de 21^e eeuw? Hoe vergelijken deze veranderingen zich met de natuurlijke en antropogene veranderingen op de lange termijn in het late Holoceen?
4. Wat voor gevolgen hebben klimaat- en landgebruikveranderingen gehad op bodemerosie en sedimentlast in het Maasbekken tijdens het late Holoceen? Wat voor gevolgen kunnen we verwachten in de 21^e eeuw?

Antwoorden op de onderzoeksvragen

Het gebruik van een gekoppeld klimaat-hydrologisch model om paleoafvoer te analyseren

Voor zover mij bekend zijn voorafgaand aan deze studie geen onderzoeken uitgevoerd om paleoafvoeren te simuleren voor het Holoceen met gebruik van een ruimtelijk verdeeld hydrologisch model. Voordat een gedetailleerd model kon worden opgezet voor de Maas, was daarom de eerste stap in dit promotieonderzoek (Hoofdstuk 2) een model met een lage ruimtelijke resolutie ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) en een maandelijkse tijdstap op te zetten om de paleoafvoeren van 19 rivieren te simuleren (Amazone, Donau, Ganges, Kongo, Krishna, Lena, Maas, Mackenzie, Mekong, Mississippi, Murray-Darling, Nijl, Oder, Rijn, Sacramento-San Joaquin, Syr Darja, Volta, Wolga, Zambezi). Dit is uitgevoerd als pilotstudy om de bruikbaarheid van deze aanpak te bestuderen met betrekking tot het evalueren van lange termijn veranderingen in paleoafvoeren. Het klimaatmodel ECBilt-CLIO-VECODE is offline gekoppeld met het hydrologische model STREAM om de afvoer van deze rivieren te simuleren tijdens drie perioden, namelijk Vroeg Holoceen (9000-8650 BP), Mid Holoceen (6200-5850 BP) en Recent (1750-2000 na Chr.). De resultaten van de simulaties zijn vervolgens vergeleken met schattingen van paleoafvoeren op basis van multi-proxy data beschikbaar in de literatuur (bijv. geologisch, geomorfologisch, etc.), om te bepalen in hoeverre de modelresultaten hiermee overeen kwamen. Voor elk stroombekken zijn de proxy data geclassificeerd als *goed*, *redelijk* of *slecht*. De classificatie heeft betrekking op de betrouwbaarheid van de data om de feitelijke veranderingen in de paleoafvoeren in de bovengenoemde stroombekkens en perioden weer te geven. Voor de simulaties waarvoor de proxy data als *goed* of *redelijk* werden geclassificeerd, kwamen de modelresultaten in 72% van de gevallen volledig overeen met de proxy data. Bovendien kwamen de resultaten van 92% van die simulaties redelijk overeen met de proxy data. De overeenkomsten waren vooral sterk in het geval van Europese bekkens beïnvloed door maritieme klimaten, en in het geval van subtropische bekkens beïnvloed door de moessons van het noordelijke halfrond.

Omdat het gekoppelde klimaat-hydrologische model succesvol is toegepast voor het simuleren van de paleoafvoeren van deze rivieren, is het vervolgens toegespitst op de Maas (Hoofdstuk 3). De spatiale resolutie is verhoogd tot $2' \times 2'$ (ongeveer 2.4 km x 3.7 km) en een dagelijkse tijdstap is gebruikt om veranderingen in overstromingsfrequentie te kunnen simuleren. Ten opzichte van het mondiale model, waarin enkel natuurlijke veranderingen in landgebruik als gevolg van klimaatveranderingen zijn voorgeschreven, is voor het Maasmodel aandacht besteed aan de antropogene veranderingen in landgebruik tussen 4000 BP en het heden. De gesimuleerde veranderingen in afvoer en overstromingsfrequentie uit het hogere resolutie Maasmodel komen overeen met kwalitatieve resultaten uit multi-proxy data.

Deze toepassingen van het gekoppelde model laten zien dat de methode een bruikbaar gereedschap kan vormen om lange termijn veranderingen in paleoafvoer te analyseren. Geologische en geomorfologische reconstructies van paleoafvoer maken het mogelijk om de resultaten van hydrologische modellen te verifiëren voor perioden waarin de leefomgeving anders was dan tegenwoordig. Daarmee is de betrouwbaarheid van deze modellen verhoogd met betrekking tot hun geschiktheid voor het simuleren van de effecten van toekomstige klimaat- en landgebruikveranderingen.

Late Holoceen afvoer en overstromingsfrequentie van de Maas: gevolgen van klimaat- en landgebruikverandering

Het gekoppelde klimaat-hydrologische model is gebruikt om de dagelijkse afvoer van de Maas te simuleren voor twee perioden: 4000-3000 BP en 1000-2000 na Chr. (Hoofdstuk 3). De periode 4000-3000 BP is gebruikt als 'natuurlijk' referentiekader. In deze periode was menselijke activiteit in het bekken gering. De natuurlijke klimaatforceringen waren vergelijkbaar met die van vandaag en het gebied was nog

(bijna) volledig bebost. De periode 1000-2000 na Chr. kenmerkt zich door veranderingen in het hydrologische systeem door landgebruikveranderingen (ontbossing, herbebossing, veenontginning, ruralisatie, verstedelijking), en als gevolg van menselijke uitstoot sinds het industriële tijdperk ook een toename van het gehalte aan broeikasgassen en sulfaataërosolen in de atmosfeer. Door de afvoeren en overstromingsfrequenties van deze twee perioden te vergelijken is het dus mogelijk om de invloed van menselijke veranderingen in landgebruik en klimaat te analyseren.

Uit de resultaten van deze studie blijkt dat zowel de gemiddelde afvoer als de overstromingsfrequentie van de Maas significant zijn toegenomen in de periode tussen het natuurlijke referentiekader 4000-3000 BP en het laatste millennium. De gemiddelde afvoer is toegenomen met 6.6% tussen 4000-3000 BP ($244.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en 1000-2000 na Chr. ($260.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$); de sterkste toename vond plaats in het zomer halfjaar (mei t/m oktober) (+21.6%). De herhalingstijd van afvoeren groter dan $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (vergelijkbaar met die tijdens de overstromingen van 1926 en 1993) nam af van 77 jaar in de periode 4000-3000 BP tot 65 jaar in de periode 1000-2000 na Chr. Op deze tijdschaal zijn de toenames in afvoer en overstromingsfrequentie bijna volledig het resultaat van veranderingen in landgebruik, met name door het afnemen van de evapotranspiratie als gevolg van de opgetreden ontbossingen. Op deze duizendjarige tijdschaal hebben klimaatveranderingen geen significante invloed gehad op de afvoer van de Maas. Tussen de 19^e en 20^e eeuw heeft de invloed van klimaatverandering de invloed van landgebruikveranderingen echter overweldigd. Hoewel evapotranspiratie hoger lag in de 20^e eeuw dan in de 19^e eeuw (als gevolg van herbebossing en de toename van de temperatuur), was de gemiddelde afvoer in de 20^e eeuw hoger ($270 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) dan in alle voorafgaande eeuwen, en zelfs 2.5% hoger dan tijdens de 19^e eeuw. Bovendien kwamen hoge afvoeren van minstens $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ bijna twee keer zo vaak voor tijdens de 20^e eeuw dan tijdens het natuurlijke referentiekader 4000-3000 BP. De versterkte toenames in afvoer en overstromingsfrequentie tussen de 19^e en 20^e eeuw zijn bijna volledig het gevolg van een aan het versterkte broeikaseffect gerelateerde stijging van het jaarlijkse (en vooral winterse) neerslag totaal.

De resultaten van Maasafvoer uit het mondiale model (Hoofdstuk 2) laten zien dat lange termijn veranderingen in orbitale parameters (de baan van de aarde rond de zon) hebben geleid tot weinig verandering in afvoer tussen de perioden 9000-8650 BP, 6200-5850 BP en 1750-2000 na Chr. De resultaten van het gedetailleerde Maasmodel (Hoofdstuk 3) laten ook zien dat de natuurlijke veranderingen in het klimaat tussen de perioden 4000-3000 BP en 1000-2000 na Chr. weinig invloed hadden op de afvoer van de Maas. Doordat antropogene landgebruikverandering niet werd meegenomen in het mondiale model, zijn de gevolgen hiervan niet gesimuleerd tussen het Mid Holoceen en recente tijdsperioden in laatstgenoemde model configuratie.

Verandering in de afvoer en frequentie van hoge afvoeren van de Maas tijdens de 21^e eeuw

De dagelijkse afvoer van de Maas is gesimuleerd voor de 21^e eeuw (Hoofdstuk 4). De forceringen gebruikt in het klimaatmodel waren gebaseerd op de 'Special Report on Emission Scenarios' (SRES) van het 'Intergovernmental Panel on Climate Change'. SRES scenario's A2 en B1 zijn gebruikt omdat dit respectievelijk een van de meest extreme en een van de minst extreme scenario's zijn (wat betreft de concentratie CO₂ in de atmosfeer tegen 2100 na Chr.). Ze kunnen daarom gebruikt worden om de gevolgen van klimaatverandering te analyseren onder een grote range mogelijke veranderingen. Voor landgebruik in de 21^e eeuw is gebruik gemaakt van twee scenario's uit het EURURALIS 2.0 project; de 'Continental Market' en 'Global Cooperation' scenario's. De mogelijke socio-economische ontwikkelingen waarop deze scenario's zijn gebaseerd (de zogenaamde concept storylines) corresponderen respectievelijk met die van de A2 en B1 scenario's van de SRES (en zijn dus zo genoemd in dit proefschrift), hoewel de concept storylines breder getrokken zijn om specifiek rekening te houden met landgebruik vraagstukken en Europees agrarisch beleid. Deze scenario's laten relatief weinig verandering in landgebruik zien tussen de 20^e en 21^e eeuw. De meest significante verandering, vergeleken met de 20^e

eeuw, is een toename van het areaal bos met 2% onder scenario B1 (en daarmee samen een afname in het areaal agrarisch land van ca. 2%).

De resultaten voor de 21^e eeuw vertonen een toename van de jaarlijkse temperatuur, neerslag en afvoer tot waarden ver boven de waarden die gesimuleerd zijn voor de perioden 4000-3000 BP en 1000-2000 na Chr. De toenames in jaargemiddelde afvoer tussen de perioden 1950-2000 na Chr. en 2050-2100 na Chr. (+16.6% voor A2 en +12.7% voor B1) zijn groter dan de toename in jaargemiddelde afvoer over de hele periode 4000-3000 BP tot 1950-2000 na Chr. (+10.0%). Bovendien is de herhalingstijd van hoge afvoeren groter dan 3000 m³ s⁻¹ (wat vergelijkbaar is met de afvoer tijdens de overstromingen van 1926 en 1993) toegenomen van eens per 40 jaar tijdens de 20^e eeuw tot eens per 20 jaar in de 21^e eeuw onder scenario A2, en eens per 25 jaar onder scenario B1. De gesimuleerde toenames in jaargemiddelde afvoer en overstromingsfrequentie zijn significant groter onder scenario A2 dan onder scenario B1. Desalniettemin zijn de toenames tussen de 20^e en 21^e eeuw onder het meer optimistische B1 scenario groot en statistisch significant. Op deze tijdschaal is de invloed van de gematigde landgebruikverandering, gesimuleerd voor de 21^e eeuw, klein. De toenames in afvoer en overstromingsfrequentie zijn bijna volledig het resultaat van de gesimuleerde veranderingen in het klimaat. Tussen de periode 4000-3000 BP en de 20^e eeuw is weinig verandering waargenomen in de herhalingstijd van extreme afvoeren (herhalingstijd 1250 jaar), waarbij de grootschalige ontbossing van het bekken slechts een geringe invloed had op dergelijke gebeurtenissen. Voor de 21^e eeuw worden echter, vooral als resultaat van de toename van neerslag tijdens de winter, toenames verwacht onder beide scenario's.

De sedimentlast van het Maasbekken: de invloed van klimaat- en landgebruikverandering in het late Holoceen en de 21^e eeuw

Om de invloed van lange termijn veranderingen in klimaat en landgebruik op de sedimentlast van de Maas te bestuderen is gebruik gemaakt van het hellingerosie- en sedimentatie model WATEM/SEDEM. Hiermee is de sedimentlast berekend per periode van 50 jaar (Hoofdstuk 6). Veranderingen in het klimaat (namelijk de erosiviteit van de neerslag) zijn berekend aan de hand van de resultaten uit het klimaatmodel ECBilt-CLIO-VECODE, en veranderingen in landgebruik zijn gebaseerd op historische documenten en projecties voor de 21^e eeuw uit het EURURALIS project. De sedimentlast van de Maas is significant toegenomen gedurende het late Holoceen. Tijdens het natuurlijke referentiekader 4000-3000 BP bleef de gemiddelde 50-jr sedimentlast redelijk constant (gemiddeld ca. 92,000 Mg a⁻¹). De gemiddelde sedimentlast in het laatste millennium (306,000 Mg a⁻¹) is meer dan het drievoud van dat van 4000-3000 BP. De 50-jr sedimentlast is verre van constant geweest gedurende de laatste 1000 jaar en laat een significant opwaartse trend zien tussen de 11^e en 19^e eeuw tot een piek van ca. 388,000 Mg a⁻¹ in de 19^e eeuw. Deze resultaten laten hetzelfde patroon zien als het beperkte aantal geomorfologische studies die uitgevoerd zijn in de regio. Op een duizendjarige tijdschaal is het overgrote deel van deze toename het gevolg van menselijke veranderingen in landgebruik, vooral het vervangen van bos met akkerland. In de 20^e eeuw resulteerden herbebossing en urbanisatie in een afname in gesimuleerde sedimentlast tot ca. 281,000 Mg a⁻¹. Dit resultaat is in tegenspraak met twee eerder uitgevoerde studies, die stellen dat de sedimentlast toenam tussen de late 19^e en late 20^e eeuw. In Hoofdstuk 5 laat ik zien dat de toename, opgetekend in laatstgenoemde studies, net zo goed het gevolg kan zijn van jaarlijkse variabiliteit of de methoden gebruikt in die studies en geen bewijs vormt voor een structurele toename in sedimentlast. Het is echter wel mogelijk dat de bedijking van de Maas tussen Namen en Luik tijdens de 20^e eeuw wel geleid heeft tot een toename van de sedimentlast in die periode. Om te onderzoeken wat voor invloed de bedijking heeft gehad op de sedimentlast zou het nuttig zijn om gedetailleerde geomorfologische analyses uit te voeren die kijken hoe de sedimentatie van de overstromingsvlakte is veranderd tijdens de laatste eeuw.

De resultaten voor de 21^e eeuw zijn sterk afhankelijk van de gebruikte scenario's (klimaat en landgebruik). Relatief sterke toenames in de erosiviteit van de neerslag, gesimuleerd voor de 21^e eeuw onder scenario's A2 en B1, leiden tot toenames in sedimentlast vergeleken met de 20^e eeuw van respectievelijk

12% en 8%. De gebruikte landgebruikscenario's leiden echter tot een afname in sedimentlast van respectievelijk 26% en 46%, vooral als gevolg van het vervangen van akkerland door weide en grasland. Het netto effect in de 21^e eeuw is dus een toename van de sedimentlast in vergelijking met de sedimentlast van de 20^e eeuw.

De resultaten van een gevoeligheidsanalyse laten zien dat, hoewel landgebruikverandering de grootste invloed heeft op lange termijn veranderingen in sedimentlast, de gevoeligheid van sedimentlast voor veranderingen in het klimaat toeneemt naarmate het areaal ontboste land toeneemt.

Slotconclusies

Veranderingen in landgebruik en klimaat hebben beiden een grote invloed op de afvoer, overstromingsfrequentie en sedimentlast van de Maas. In de laatste 4000 jaar heeft het grootschalig ontbossen van het bekken geleid tot substantiële toenames in deze drie parameters, terwijl op een duizendjarige tijdschaal (natuurlijke) veranderingen in het klimaat slechts een secundaire rol hebben gespeeld. Terwijl ontbossingen hebben geleid tot een toename in de frequentie van hoge afvoeren in het late Holoceen, hebben ze geringe invloed gehad op de meest extreme afvoeren (bijv. hoge afvoeren met een herhalingstijd van 1250 jaar en langer). In de 21^e eeuw nemen de gesimuleerde waarden voor de jaarlijkse temperatuur en neerslag toe tot waarden ver boven die van de laatste 4000 jaar. Als gevolg hiervan worden verdere toenames verwacht in afvoer en de frequentie van hoge afvoeren, zelfs voor de meest extreme overstromingen. De gevolgen van de verwachte landgebruikveranderingen hierop zijn gering. Landgebruik blijft echter een dominante rol spelen in bodemerosie en sedimentlast. Ondanks een relatief grote toename in de neerslagerosiviteit in de 21^e eeuw ten opzichte van de 20^e eeuw, laat ons model een afname zien in de sedimentlast van de Maas. Dit komt omdat de verwachte toenames als gevolg van een toename in neerslagerosiviteit kleiner zijn dan de verwachte afnames als gevolg van de gesimuleerde veranderingen in landgebruik (vooral het vervangen van akkerland door weide en grasland). Zelfs kleine modificaties in landgebruik kunnen grote veranderingen in sedimentlast veroorzaken. Bovendien neemt de gevoeligheid van sedimentlast voor veranderingen in het klimaat toe naarmate het areaal beboste land afneemt.

Implicaties voor het waterbeheer

Grootschalige veranderingen in het areaal bos in een stroombekken kunnen grote gevolgen hebben voor afvoer, overstromingsfrequentie, bodemerosie en sedimentlast. Grootschalige herbebossing van het Maasbekken in de 21^e eeuw wordt echter niet verwacht omdat de economische vraag naar land groot is en er veel aandacht wordt besteed aan het behouden van cultuur-historische landschappen. Hoewel het potentiële gebruik van herbebossing als maatregel tegen overstromingen beperkt is in het Maasbekken, kan het vervangen van slechts enkele percentages van het totaaloppervlak akkerland door bos grote voordelen opleveren voor bodemerosie en sedimentlast. De invloed van herbebossing op de timing van piekafvoeren (als gevolg van het vertragen van afvoersnelheden) is niet onderzocht in dit proefschrift.

Hoewel de invloed van de verwachte landgebruikveranderingen voor de 21^e eeuw op de frequentie van hoge afvoeren klein is, is dit niet per se het geval voor het overstromingsrisico. Analyses van overstromingsrisico's moeten ook de potentiële schade als gevolg van eventuele overstromingen in beschouwing nemen. Dit kan sterk afhankelijk zijn van veranderingen in landgebruik, en dan met name urbanisatie. Het is daarom van belang dat er, naast de frequentie van hoge afvoeren, ook studies worden uitgevoerd om de invloed van veranderingen in landgebruik (en klimaat) op overstromingsrisico's te berekenen.

Veranderingen in afvoer, overstromingsfrequentie en sedimentlast in de 21^e eeuw zijn allemaal afhankelijk van het gebruikte klimaatscenario. Zelfs onder het relatief optimistische B1 scenario zijn de gesimuleerde toenames in afvoer en overstromingsfrequentie groot voor de komende eeuw. Daaruit volgt

dat deze toenames mogelijk onvermijdelijk zijn, zelfs wanneer een gecoördineerde en onmiddellijke actie op mondiale schaal zou worden ondernomen om de uitstoot van broeikasgassen te mitigeren. Dit onderstreept de noodzaak van aanpassingsmaatregelen om de kans op overstromingen in de toekomst te verminderen. Dergelijke strategieën moeten robuust zijn met betrekking tot hun flexibiliteit in de toekomst, moeten expliciet kunnen omgaan met onzekerheden en moeten voordelen opleveren onder verschillende scenario's van de toekomst. Multifunctionele landgebruiksplanning, waarbij het landgebruik in overstromingsrisicogebieden in overeenstemming is met tijdelijke inundaties, kan hierin een sleutelrol spelen. Een voorbeeld hiervan is de Grensmaas waar momenteel grindwinning plaatsvindt in een gebied van ca. 1100 ha. om het rivierbed te verbreden en een meer esthetisch landschap te creëren. Behalve de voordelen voor natuurbehoud en toerisme, zal dit leiden tot minder kans op wateroverlast door een vergroting van de afvoercapaciteit van de rivier en extra gebieden voor waterretentie tijdens hoge afvoeren.

De gesimuleerde afname van de sedimentlast van de Maas in de 21^e eeuw (in vergelijking met de 20^e eeuw) zou voordelig kunnen zijn voor een aantal reeds lopende en geplande overstromingsmaatregelen. In een internationaal actieplan tegen overstromingen dat in 1998 door de aangrenzende landen is opgesteld zijn bijvoorbeeld maatregelen opgenomen om de kwetsbaarheid van het bekken voor overstromingen te verminderen, inclusief de constructie van retentiebekkens, de constructie of het herstel van overstromingsvlaktes, en het vergroten van de afvoercapaciteit door het verbreden van het rivierbed en overstromingsvlaktes. Een gevolg van een afname van de sedimentlast van de Maas zou kunnen zijn dat minder baggerwerkzaamheden nodig zijn om deze maatregelen in stand te houden.

Volgens de huidige regelgeving in Nederland moeten de waterkeringen een bepaalde waterstand kunnen weren, de zogenaamde maatgevende waterstand. De maatgevende waterstand is een waterstand met een bepaalde herhalingsperiode (in jaren). Deze herhalingsperiode is op dit moment eens per 1250 jaar voor het bedijkte deel van de Maas, en eens per 250 jaar voor het onbedijkte deel. Sinds de introductie van de Wet op de Waterkeringen in 1995 moet de maatgevende waterstand elke vijf jaar opnieuw beoordeeld worden. Momenteel gebeurt dit aan de hand van de maatgevende afvoer (d.w.z. de afvoer bij Borgharen met een herhalingsperiode van eens per 1250 jaar) en wordt geschat op basis van de statistische extrapolatie van gemeten afvoerreeksen. De resultaten van deze studie laten echter zien dat de afvoer geassocieerd met deze herhalingsperiode in de toekomst zal stijgen, waardoor schattingen gebaseerd op gemeten afvoerreeksen te laag zullen zijn. Het gebruik van multi-ensemble simulaties van afvoer, zoals gedaan is in deze studie, zou dit mogelijk kunnen ondervangen en gebruikt kunnen worden om de maatgevende afvoer te schatten onder verschillende scenario's van toekomstige klimaat- en landgebruikveranderingen.

De implicaties die voortvloeien uit deze studie zijn niet alleen van belang voor het Maasbekken, maar ook voor stroomgebieden over de gehele wereld waar grote veranderingen in de afvoer worden verwacht.

Eén van de grote voordelen van het gebruik van gekoppelde modellen om afvoer, overstromingsfrequentie en sedimentlast te simuleren op duizendjarige tijdschalen is dat het mogelijk is om de relatieve invloed van klimaat- en landgebruikverandering uit te splitsen. Deze methode staat toe om de invloed van menselijke activiteiten te analyseren tegen een natuurlijk referentiekader. Dit is niet mogelijk wanneer alleen naar gemeten en/of gesimuleerde reeksen van de laatste of huidige eeuw wordt gekeken. Bovendien kunnen de resultaten van de modellen worden geverifieerd tegen bewijzen uit geomorfologische en geologische bronnen voor perioden waarin de leefomgeving anders was dan die van tegenwoordig. Om deze redenen is deze aanpak een goede methode om de invloed van veranderingen in klimaat- en landgebruik op afvoer, overstromingsfrequentie, en sedimentlast te bestuderen.