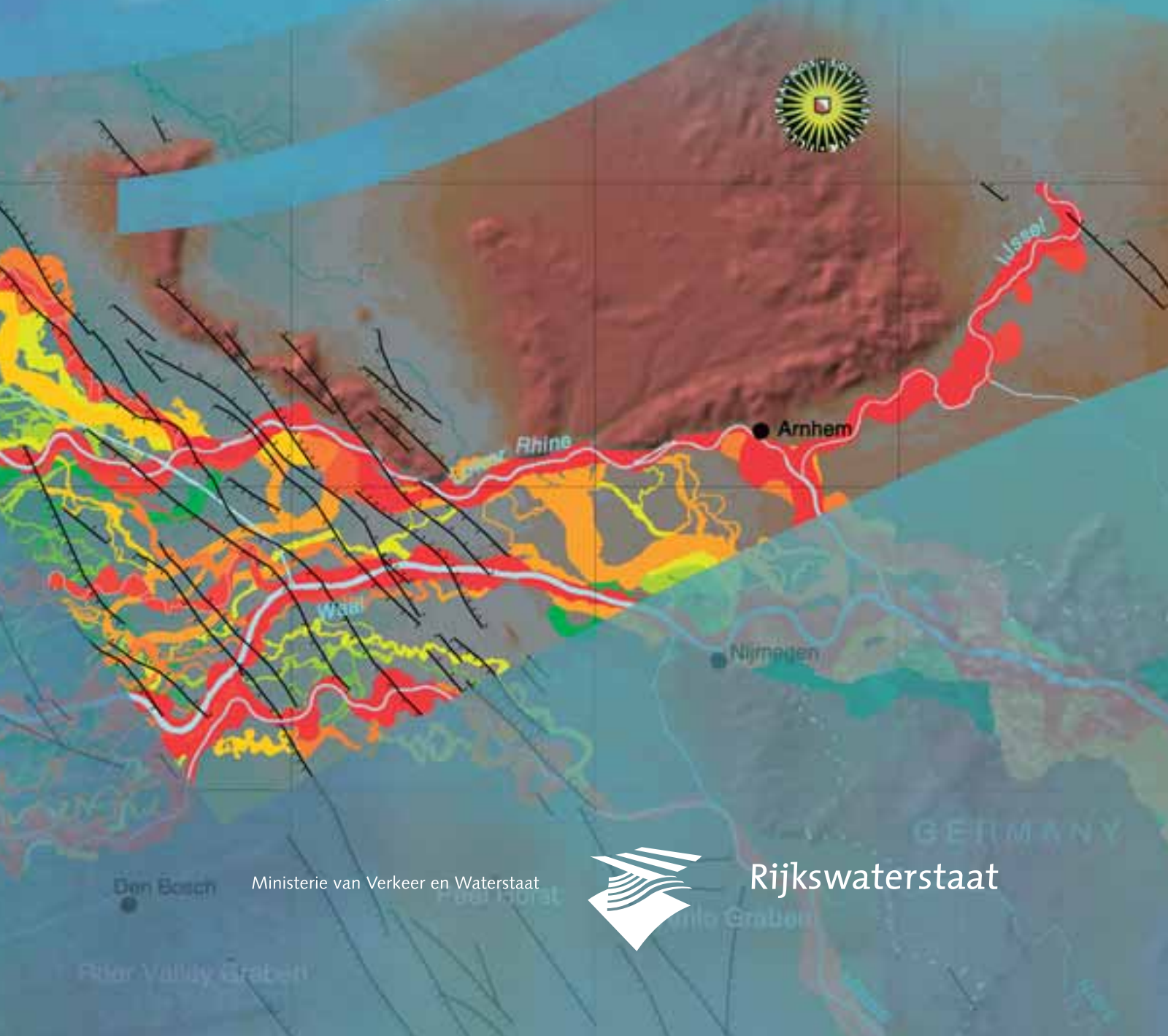


Paleogeografie en veiligheid tegen overstromen

De bruikbaarheid van inzichten in de ontwikkeling van de Nederlandse delta in de laatste 5000 jaar voor het kwantitatief begrenzen van overstromingsmagnitudes en -frequenties.

RWS RIZA rapport 2007.016



Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Rijkswaterstaat



Universiteit Utrecht

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Rijkswaterstaat

Paleogeografie en veiligheid tegen overstromen

**De bruikbaarheid van inzichten in de ontwikkeling van
de Nederlandse delta in de laatste 5000 jaar
voor het kwantitatief begrenzen
van overstromingsmagnitudes en –frequenties.**

Colofon

Dit is een uitgave van Universiteit Utrecht en Rijkswaterstaat
Februari 2007

Voor meer informatie: Universiteit Utrecht – Dept. Fysische Geografie
Telefoon: 030 – 253 5774 (K.M. Cohen); 030 – 253 5772
(E. Stouthamer)
Rijkswaterstaat RIZA/RIKZ
Telefoon: 0320 – 298341 (secretariaat)/070-3114229 (Q.J.Lodder)

Uitgevoerd door: Dr. K.M. Cohen ¹
Drs. Q.J. Lodder ²

Met medewerking van: Mw. Dr. E. Stouthamer, Dr. H.J.A. Berendsen (†14 mei 2007),
Dr. H. Middelkoop, Dr. W.Z. Hoek, Dr. M.G. Kleinhans ¹.

1 Universiteit Utrecht, Faculteit Geowetenschappen, Departement Fysische Geografie.

2 Rijkswaterstaat RIZA, afdeling Veiligheid, Lelystad.

Druk: Thieme Deventer

Document: RWS RIZA RAPPORT 2007.016
ISBN NUMMER 9789036913867

Rapportage vooronderzoek Het rapport geeft een stand van zaken van afgerond en lopend onderzoek. Bij verwijzing naar onderdelen van dit rapport die op publicaties ‘in voorbereiding’ gebaseerd zijn, dient vooraf met de auteur contact op genomen te worden.

RWS Kenmerk: ATB10050206/WRV/Van Essen

UU Kenmerk: ES/RWS/06/12-9

Management Samenvatting

Inleiding

Nederland vormt het gebied waar de grote rivieren de Rijn en de Maas in de Noordzee uitmonden. Hoe veilig het bedijkte deel van Nederland is tegen overstromingen wordt hoofdzakelijk bepaald door de frequentie van extreem hoge afvoeren van de grote rivieren en extreem hoge stormvloeden van de Noordzee. De Wet op de waterkering uit 1996 [^{1,2}] schrijft voor dat dijkeringen berekend moeten zijn op waterstanden met een gemiddelde overschrijdingskans - per jaar – gelijk aan de veiligheidsnorm. Deze veiligheidsnorm is 1/10.000 tot 1/2000 per jaar voor door stormvloeden bedreigde gebieden (bijvoorbeeld de Randstad en de Zuid-Hollandse Eilanden) en 1/1250 voor met rivieroverstromingen bedreigde gebieden (bijvoorbeeld het Land van Maas en Waal).

De waterstanden behorende bij de veiligheidsnorm worden elke 5 jaar door Rijkswaterstaat (RWS) gepubliceerd in het hydraulische randvoorwaardenboek, het eerstvolgende randvoorwaardenboek wordt naar verwachting in 2007 gepubliceerd. De 'toetspeilen' in deze randvoorwaardenboeken, zijn locale specificaties van het Maatgevend Hoogwater (MHW), op verschillende plekken stroomafwaarts langs rivierenlopen en in de delta. Bij het bepalen van toetspeilen is het van cruciaal belang te weten wat de kans van voorkomen (overschrijdingskans) van extreme afvoeren en stormvloeden is. Ter bepaling van overschrijdingskansen maakt RWS gebruik van statistische analyses, die gevoed worden met gemeten piekafvoeren en stormvloedhoogten. Hiertoe heeft RWS de beschikking over een meetreeks van ongeveer 100 jaar (zowel voor stormvloeden als voor afvoeren). Deze meetreeksen zijn in feite te kort om rechtstreeks de gezochte extreme afvoeren en stormvloeden met een overschrijdingskans van 1/1250 tot 1/10.000 per jaar te bepalen. Om toch te komen tot de benodigde kansen van waterstanden en afvoeren behorende bij de veiligheidsnorm, wordt er, noodgedwongen, gebruik gemaakt van statistische extrapolatie. Een inherent gevolg van statistische extrapolatie is dat aan de resulterende overschrijdingskansen aanzienlijke onzekerheidsmarges kleven. De onzekerheid in overschrijdingskansen kan worden verminderd door gebruik te maken van aanvullende informatiebronnen. In het verleden is hiervoor reeds gekeken naar historische afvoeren en overstromingen zoals vermeld in bijvoorbeeld stadskronieken. Een tot nog toe ongebruikte bron van informatie ligt opgeslagen in de Nederlandse ondergrond.

De afzettingen van de Rijn, de Maas en de Noordzee vormen samen een sedimentair archief dat vooral is opgebouwd ten gevolge van overstromingen vanuit de rivieren en vanuit zee. Onder de talloze overstromingen zijn ook gevallen geweest, die de meest extreme

overstromingen van de laatste millennia representeren. Deze overstromingen zijn het gevolg van rivier afvoeren en stormvloeden van de orde van grootte waar we in Nederland ons veiligheidsbeleid op baseren. Het sedimentaire archief biedt in potentie de mogelijkheid tot uitbreiding van de “meetreeks” van rivierafvoeren en stormvloeden tot ver buiten het bereik van de tot nu toe gebruikte metingen.

Het vaststellen van de piekafvoer- en overstromingsgeschiedenis van de Rijn over een voldoende lange periode eindigend met de huidige situatie is niet alleen van belang voor de waarborging van de huidige veiligheid tegen overstromen. Die geschiedenis functioneert namelijk ook als ‘nulmeting’ voor toekomstige ontwikkelingen: als uitgangssituatie bij het doorrekenen van klimaatveranderingsscenario’s. Het vaststellen van de uitgangssituatie is een basale stap voor projecties naar de toekomst. Voor extreme afvoeren kon die stap op basis van gemeten piekafvoeren niet gemaakt worden, omdat de meetreeks daarvoor te kort is. Als uit het sedimentaire archief een nulmeting voor extreme afvoeren afgeleid kan worden die de onzekerheidsmarges op de uitgangssituatie inperkt, dan werkt dit ook verbeterend door in toekomstvoorspellingen.

Doelstelling

Paleogeografie is de wetenschap van het beschrijven van de landschapsontwikkeling op basis van de opbouw van de ondergrond en de dynamiek van het voormalige landschap. Haar kennis en methodieken kunnen worden ingezet voor de reconstructie van overstromingen in de Nederlandse delta in het recente geologische verleden. Dit vooronderzoek is een inventarisatie van de bruikbaarheid van de huidige paleogeografische inzichten voor de verbetering van de veiligheid tegen overstromen, en een verkenning van de mogelijkheden dit inzicht op korte termijn te vergroten.

De inventarisatie heeft tot doel:

1. Inzichtelijk te maken welke mogelijkheden kennis en inzicht in de paleogeografie van Nederland biedt voor het verbeteren van de veiligheid tegen overstromen;
2. Een overzicht geven van de huidige kennis op het gebied van extreme overstromingen in de laatste 5000 jaar;
3. Inzichtelijk te maken wat op korte en langere termijn te verwachten is van paleogeografische resultaten, voor herhalingsfrequentieschattingen van piekafvoeren.
4. Het doen van een schatting van de verwachte inspanningen en doorlooptijd, bij voorgestelde aanpakken van gekoppeld onderzoek naar overstromingen en veiligheid.

Resultaten van het vooronderzoek

Uit de paleogeografie van de Nederlandse delta blijkt dat in Nederland meerdere overstromingen zijn voorgekomen van een grotere omvang,

dan bekend is uit de moderne meetreeks of historische gegevens. Afzettingen van bovengemiddeld grote overstromingen kunnen met zekerheid teruggevonden worden in het sedimentaire archief. Dit biedt mogelijkheden de frequentie van extreme overstromingen ten opzichte van normale overstromingen te reconstrueren. Een zeer beperkt aantal overstromingen, vooral van Rijntakken, biedt ook de mogelijkheid de afvoer ten tijde van de overstroming te kwantificeren.

Voor rivieroverstromingen tijdens extreme afvoeren zijn de reconstructie mogelijkheden met paleogeografische methoden kansrijker dan voor stormvloedreconstructie, om twee hoofdredenen: (1) Bij rivieroverstromingen is de bron van de overstroming altijd duidelijk - de ligging van de riviergeulen is exact bekend - en dit vergemakkelijkt de reconstructie van overstromingsgrootte uit gegevens op bekende afstand van toenmalige riviergeulen. Bij stormvloeden is het zwaartepunt van de overstroming afhankelijk van toevalligheden in windrichtingen en weerspatronen en voor iedere grote storm anders en dit bemoeilijkt reconstructie aanzienlijk. (2) Het detail in beschikbare paleogeografische reconstructies voor de periode 5000 tot 1000 jaar terug, is voor het rivierengebied groter dan voor het kustgebied. Hierdoor zijn in het rivierengebied gerichte strategieën voor afvoerreconstructie mogelijk, terwijl in het kustgebied nog explorerend en prospectief onderzoek nodig zou zijn.

Op dit moment zijn er echter nog geen concrete reconstructies beschikbaar, van de kwantitatieve grootte, noch van de herhalingstijd van optreden, van afvoeren die leidden tot extreme overstromingen uit het recente geologische verleden.

De informatie uit de paleogeografie is op dit moment niet direct geschikt om te betrekken in de statistische extrapolaties ter onderbouwing van de toetspeilen in het kader van de Wet op de waterkering. Het is echter de verwachting dat dit met aanvullend onderzoek op de middellange termijn wel mogelijk is. Hiertoe is in dit vooronderzoek een 2-voudige aanpak geformuleerd. De aanpak richt zich op:

1. Het kwantificeren van één specifieke extreme paleo-overstroming (in het IJsseldal).
2. Het verkrijgen van een deltadekkende reeks grote tot extreme paleo-overstromingen.

Aanpak 1 levert een gedetailleerde beschrijving op van één van de grootste afvoeren die de Rijn heeft gekend. De Gelderse IJssel is een zeer jonge rivier, waarvan het ontstaan gekoppeld is aan een extreme overstroming. Deze extreme overstroming trad rond 500 jaar na Christus op. Zij was naar verwachting (blijkens ongepubliceerd onderzoek, Cohen, in voorb.) van de orde van grootte behorend bij herhalingstijden tussen de 1/500 en 1/1500 jaar, dat wil zeggen groter dan enige historisch beschreven of gemeten afvoer. Toen deze afvoer zich voordeed, ontstonden meerdere doorbraakgeulen in het gebied ten noorden van de Oude IJssel (Doetinchem-Doesburg). De grootste van die geulen bleef permanent water voerend en dit

leidde tot het vormen van de Gelderse IJssel. De Rijndelta breidde zich daarmee uit langs de ooststrand van de Veluwe om voortaan deels uit te monden in de toenmalige Zuiderzee (nu IJsselmeer). Het gedetailleerd beschrijven van deze extreme afvoer, inclusief doorrekenen met numerieke modellen, levert één belangrijke extreme “meting” ten behoeve van de piekafvoerstatistiek. Daarnaast kan de beschrijving dienen ter bevordering van de bewustwording van het gevaar van overstroming in Nederland. De beschrijving laat immers zien dat extreme afvoeren en overstromingen in Nederland echt voorkomen. Dat deze bewustwording wenselijk is blijkt wel uit de discussie over de door ‘Ruimte voor de Rivier’ gehanteerde lange termijn doelstelling van 18.000 m³/s, o.a. in de Eerste Kamer (Nov. 2006).

Aanpak 2 levert een deltadekkende reeks van grote en extreem grote paleo-overstromingen op. Deze aanpak beoogt de overstromingen als sedimentlaagjes te herkennen op hiervoor geschikte locaties in het bovenstroomse deel van de delta (zie Fig. 9) en van deze laagjes in het laboratorium eigenschappen te meten die aan de grootte van de overstroming te relateren zijn (met name op grond van schommelingen in korrelgrootteverdelingen). Hiermee kunnen paleo-overstromingen naar grootteklasse worden ingedeeld. Uitgaande van het principe dat grote overstromingen vaker voor komen dan extreem grote overstromingen, kan hier statistiek op worden bedreven. Het doel van Aanpak 2 is het afnemende verloop van de kansfunctie uit de herhalingstijden af te leiden. De resulterende kansfunctie kan in de statistische extrapolaties van de huidige meetreeks worden betrokken. Dit zal de onzekerheidsmarges op de voorspelde 1/1250 afvoer van de Rijn aanzienlijk reduceren.

Aanpak 1 en 2 zijn sterk complementair. Beiden vereisen een gerichte veldwerkperiode met name voor monsternamen (t.b.v. laboratoriumanalyse en datering, Aanpak 1 & 2) en voor het in detail uitkarteren van enkele IJsseldoorbraakgeulen (Aanpak 1): de dwarsdoorsnede hiervan moet zo nauwkeurig mogelijk worden aangepakt. Een deltadekkende database met grondboringen van de Rijn-Maas delta is reeds beschikbaar. Er is bovendien uitstekend bekend waar en wanneer rivierverleggingen plaatsvonden en daardoor waar in welke tijd registratie van piekafvoeren moet hebben plaatsgevonden. Nieuw benodigde gegevens kunnen hierdoor in beperkte tijd zeer gericht verzameld worden. De veld- en analysewerkzaamheden die voor beide aanpakken nodig zijn, zijn per aanpak van de grootte van een promotie- of postdoc-onderzoek (2 onderzoekers; totale kosten ~1.100 k€; Appendix 2). De doorlooptijd van beide aanpakken is 4 jaar (simultaan). De aanpakken kunnen na 1 tot 2 jaar resulteren in voor publieksvoorlichtingdoeleinden bruikbare beschrijvingen van de overstroming van de IJssel en van grote overstromingen van de Rijn in het algemeen.

Beide aanpakken hebben een innovatief karakter doordat ze verschillende werkvelden en technologieën/invalshoeken/methodieken binnen het thema 'delta-ontwikkeling' aan elkaar koppelen. Het zijn daarmee onderzoeken die vanuit een samenwerking tussen Universiteit Utrecht, Deltares (het delta-instituut i.o.) en eventuele derden ingestoken zouden kunnen worden, met RWS als vraagsturende opdrachtgever.

NB.: Dit rapport geeft een stand van zaken van afgerond en lopend onderzoek. Bij verwijzing naar onderdelen van dit rapport die op publicaties 'in voorbereiding' gebaseerd zijn, dient vooraf met de auteur contact op genomen te worden.

.....

¹ Wet op de waterkering, Staatsblad 1996, 8. ISSN 0920-2064, 9 januari 1996

² Wet tot wijziging van de Wet op de waterkering en intrekking van de Deltawet grote rivieren, de Deltawet, de Deltaschadewet, de Wet schade oesterkwekers, de Vergunningwet Westerschelde, de Zuiderzeewet en de Zuiderzeesteunwet. Eerste Kamer, vergaderjaar 2004-2005, 29 747, A; 29 maart 2005.

Inhoudsopgave

Management Samenvatting	3
Inhoudsopgave	9
1. Inleiding	11
1.1 Doelstelling	12
1.2 Paleogeografie: verder terug dan de meetreeks	14
1.3 Leeswijzer, Opzet van het vooronderzoek	16
2. Uitwerking van de probleemstelling	19
2.1 Overstromingsonderzoek in aanvulling op bestaand paleogeografisch onderzoek	19
2.2 Extrapolatieverbetering met paleogeografische resultaten	20
2.3 Selectie van locaties voor overstromingsreconstructies	22
3. De ondergrond van de delta als overstromingsarchief	25
3.1 Landschapsontwikkeling en klimaatschommeling: 5000 jaar variaties in overstromingsgevoeligheid	26
3.2 Zonering van overstromend Nederland	27
3.3 Rivieroverstromingen: het meest bovenstroomse deltagebied	29
3.4 Problematiek van stormvloedreconstructies: verschillen tussen getijde- en riviersedimentatie	31
4. Reconstructiemogelijkheden voor overstroomd oppervlak, waterstandshoogte en overstromingsfrequentie	33
4.1 AANPAK 1 - Kwantificeren van een specifieke paleo-overstroming (case-study)	33
4.2 AANPAK 2 - Deltadekkende inventarisatie geulopvullingen (frequentie analyse)	38
4.3 Complementaire methodieken naast Aanpak 1 en 2	48
4.4 Reconstructiemogelijkheden van lagere prioriteit	55
5. Statistische integratie van overstromingskansen uit directe metingen en paleogeografische reconstructie	59
5.1 Bayesiaanse statistiek	59
5.2 Is de statistische overstromingskans constant over 5000 jaar?	60
6. Conclusies	63
6.1 Kansen voor verbetering veiligheidsinschattingen	63
6.2 Mitsen en maren; wetenschappelijke onderbouwing	65
6.3 Meerwaarde van voorgesteld onderzoek	68
Voetnoten	69
Referenties	71
Appendix 1: Historische stormvloeden in Nederland (bloemlezing)	75
Historische 'extreme' stormvloeden in N. Nederland, 9 ^e -13 ^e eeuw AD	75
Historische 'extreme' stormvloeden in N. Nederland, 14 ^e -16 ^e eeuw AD	76
Appendix 2: Naar een paleooverstroming projectvoorstel	77
Opzet projectvoorstel	77
Voorbeeld inrichting onderzoek	78
Indicatie benodigde budgetten	78
Flowcharts Aanpak 1 en Aanpak 2	80

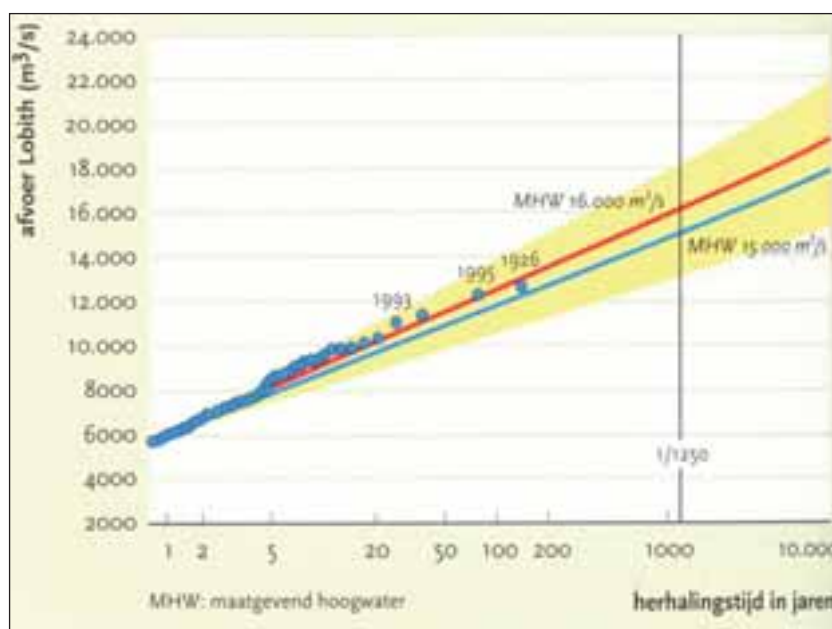
1. Inleiding

Nederland is het mondingsgebied van de grote rivieren Rijn en Maas in de Noordzee. Hoe veilig het huidige bedijkte landschap in Nederland tegen overstromen is (bij geldende dijkhoogten en onderhoudscondities), wordt hoofdzakelijk bepaald door de frequentie van extreem hoge afvoeren van de grote rivieren en extreme hoge (storm)vloeden van de Noordzee. Beide typen overstromingen zijn bedreigingen voor de veiligheid. De Wet op de waterkering uit 1996 (Staatsblad 1996, #8) schrijft voor dat dijkeringen berekend moeten zijn op waterstanden met een gemiddelde overschrijdingskans – per jaar – gelijk aan de veiligheidsnorm. Deze veiligheidsnorm is 1/10.000 tot 1/2000 jaar voor door stormvloeden bedreigde gebieden (bijvoorbeeld de Randstad en de Zuid-Hollandse Eilanden) en 1/1250 voor door rivier afvoer bedreigde gebieden (bijvoorbeeld het Land van Maas en Waal).

De waterstand bij maatgevend hoogwater (MHW, ook wel: toetspeil) is essentieel voor het toetsen van de veiligheid van bestaande en te ontwerpen waterkeringen. Op dit moment zijn in de toetsingspraktijk gebruikte maatgevende waterstanden en debieten gebaseerd op statistische analyses die gevoed worden met gemeten afvoeren en stormvloedhoogten vanaf het begin van de 20ste eeuw en extrapolaties daarvan. Deze meetreeksen zijn eigenlijk te kort om de grootte van extreme afvoeren behorende bij de in de wet gestelde herhalingsfrequenties vast te kunnen stellen (Fig. 1).

Figuur 1

De herhalingsjijd van piekafvoeren (jaarlijks hoogst gemeten afvoer) en het gebrek aan waarnemingen van extreme afvoeren (RWS). De onzekerheidsmarge voor extreme afvoeren (met 1/1250 herhalingsjijd) leidend tot een maatgevend hoogwater (MHW) langs de Rijn volgt uit statistische extrapolatie van waargenomen afvoeren in de laatste 150 jaar. Herberekening na het optreden van hoogwaters in 1993 en 1995 resulteerde in een ophoging van MHW, omdat de schatting voor de 1/1250 jaar afvoer van 15.000 naar 16.000 m³/s werd bijgesteld.



Het is daarom wenselijk de meetreeksen aan te vullen met andere onderzoeksresultaten, die de onzekerheidsmarges van de geschatte maatgevende afvoeren kunnen inperken. Het rapport richt zich

vooral op reconstructie van afvoeren van de Rijn, omdat verwacht wordt dat hiervoor het meest direct resultaten te behalen zijn. Op overstromingsreconstructies van kleinere rivieren (bijv. Maas) en stormvloedten ligt geen nadruk – wel wordt op onderdelen aangegeven of de beschouwingen en voorgestelde methoden ook op stormvloedten en kleinere rivieren van toepassing zouden zijn.

Er zijn meerdere onderzoeksmethoden waarmee aanvullende informatie kan worden verkregen voor het inschatten van de hoogte van MHW en de maatgevende afvoer waarbij dit optreedt. Zo kan er met rekenmodelvoorspellingen onderzocht worden hoe groot de maatgevende afvoer theoretisch maximaal zou kunnen zijn gegeven de grootte van het stroomgebied en haar klimaat (bijvoorbeeld door de afvoer bij extreme combinaties van weerspatronen door te rekenen; RWS-RIZA & KNMI, 1996). Het alternatief is onderzoek uit te voeren waarbij de meetreeks naar het verleden wordt verlengd, waardoor de frequentie van optreden van grote afvoeren beter bekend wordt. Dergelijk onderzoek zou vragen moeten beantwoorden zoals *“Wat waren de meest extreme hoogwaters uit de laatste 2000-5000 jaar?”* en *“Zijn deze hoogwaters in grootte vergelijkbaar met een MHW, zoals dat gemiddeld eens in de 1250 jaar verwacht mag worden op te treden?”* Dergelijk onderzoek is het wetenschapsterrein van de Paleogeografie aan de Universiteit Utrecht (als onderdeel van het vakgebied Aardwetenschappen: Fysische Geografie, Geologie). De haalbaarheid en bruikbaarheid van paleogeografisch onderzoek voor het verbeteren van de kennis van extreme overstromingen is het onderwerp van dit rapport.

Het vaststellen van de piekafvoer- en overstromingsgeschiedenis van de Rijn over een voldoende lange periode eindigend met de huidige situatie is niet alleen van belang voor de waarborging van de huidige veiligheid tegen overstromen. Die geschiedenis functioneert namelijk ook als ‘nulmeting’ voor toekomstige ontwikkelingen: als uitgangssituatie bij het doorrekenen van klimaatveranderingsscenario's. Het vaststellen van de uitgangssituatie is een basale stap voor projecties naar de toekomst. Voor extreme afvoeren kon die stap op basis van gemeten piekafvoeren niet gemaakt worden, omdat de meetreeks daarvoor te kort is. Als uit het sedimentaire archief een nulmeting voor extreme afvoeren afgeleid kan worden die de onzekerheidsmarges op de uitgangssituatie inperkt, dan werkt dit ook verbeterend door in toekomstvoorspellingen.

1.1 Doelstelling

Dit vooronderzoek heeft als doel vast te stellen in hoeverre twee tot nog toe tamelijk gescheiden invalshoeken op extreme overstromingen in Nederland samen zijn te brengen, om zo een beter onderbouwde inschatting van de veiligheid voor overstroming te verkrijgen. Dit kan bereikt worden door inzichtelijk te maken welke mogelijkheden kennis en inzicht in de paleogeografie van Nederland biedt voor het verbeteren van de veiligheid tegen overstromen. Er dient te

worden vastgesteld of statistische berekening van kansen op extreme afvoeren/overstroming zijn te verbeteren door gebruik te maken van sedimentaire informatie zoals ontsloten door karteringen van de delta en haar ondergrond ('paleogeografie') en op welke termijn die verbetering haalbaar zouden zijn.

Het vooronderzoek stelt zich daarom ten doel:

- 1. De koppelingsmogelijkheden tussen 'paleogeografie' en 'maatgevende afvoeren' te inventariseren, met als uitgangspunt dat zulke afvoeren ooit al eens zijn opgetreden en dus uit het sedimentaire archief gereconstrueerd kunnen worden.**
- 2. De stand van zaken te geven wat betreft de kennis van extreme overstromingen uit de laatste 5000 jaar, geïllustreerd met enkele concrete voorbeelden.**
- 3. Een stappenplan te maken dat beoogt in toekomstig onderzoek maximaal profijt te hebben van de wederzijdse invalshoeken.**
- 4. Een inschatting van te verwachten opbrengst van dergelijke stappen te maken**
- 5. Een inschatting van hiertoe te verrichten inspanningen (doorlooptijd) te maken.**

Het rapport beperkt zich specifiek tot de mogelijkheden van overstromingsreconstructies in het meest recente geologische verleden. Dat is een tijdvak waarvan het sedimentaire archief geologisch jong is en nog redelijk compleet en wijdverbreid. De gunstige staat van preservatie maakt jonge geologische archieven in principe geschikt voor de reconstructie van timing en grootte van specifieke overstromingen uit het verleden. De zeespiegel- en klimaatomstandigheden waren in de laatste 5000 jaar betrekkelijk constant: dat wil zeggen de klimaat variaties waren subtieler dan in de 10.000 jaar er voor (toen de omslag van de laatste ijstijd naar de huidige tijd plaatsvond) en de relatieve zeespiegelstijging in Nederland was vooral het gevolg van de bodemdaling van West Nederland en daardoor betrekkelijk gering (zie § 3.1). Wel nam in de laatste 5000 jaar door landbouw in het achterland de sedimentlast van de Rijn gestaag toe, waardoor sedimentatie in het bovenstroomse deel van de delta versnelde. Verder was er aanzienlijke landschapsverandering door direct menselijk ingrijpen (dijkenbouw vanaf de middeleeuwen, riviernormalisatie in de laatste eeuw). Dit maakt de frequentie/ magnitude reconstructies voor de laatste 5000 jaar representatief voor de huidige situatie en relevant voor overstromingskansberekeningen.

Opzet van het onderzoek

Bij de uitvoering van het onderzoek zijn de volgende fasen doorlopen.

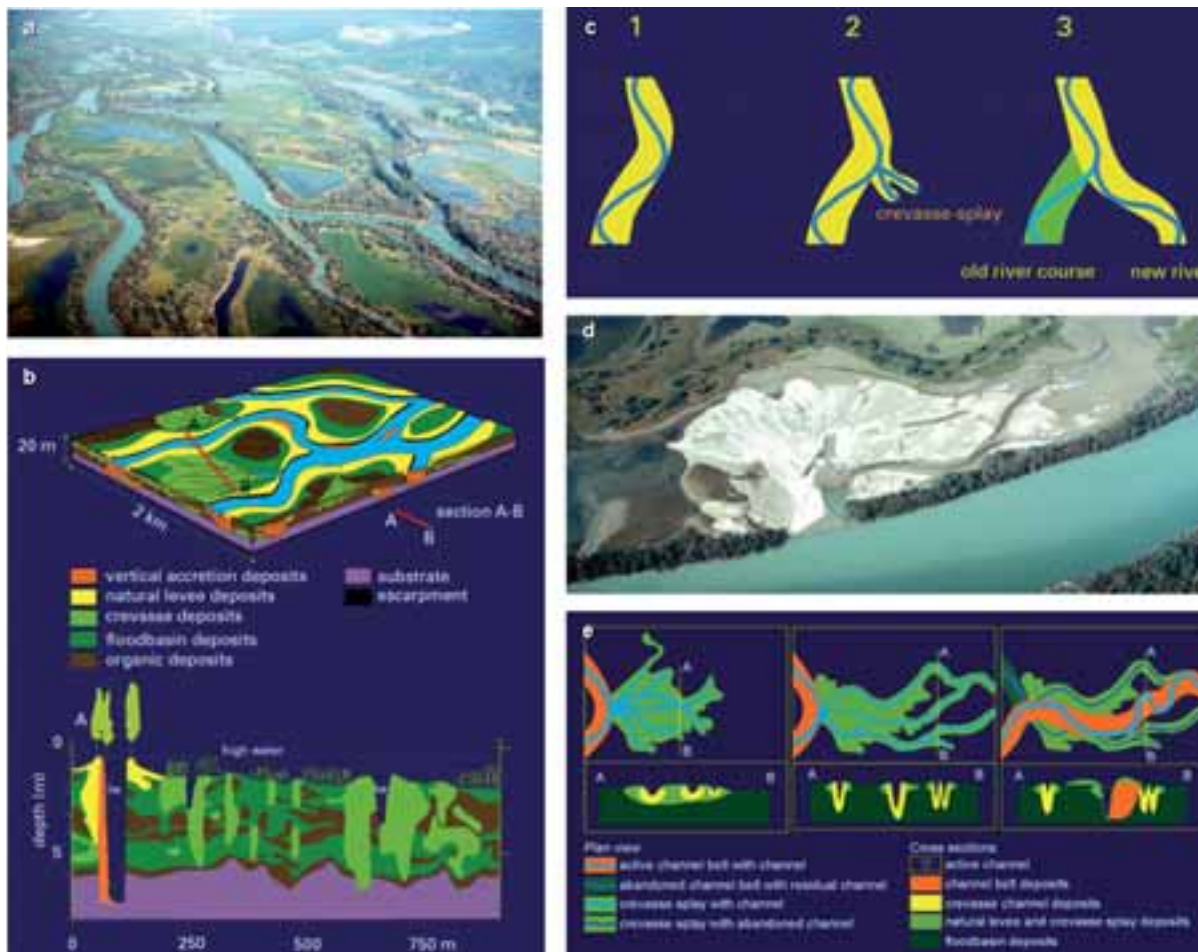
- 1. Oriënterende gesprekken: Q.J. Lodder, K.M. Cohen, W.Z. Hoek (mei-aug. 2006)**
 - Uitwisseling van inhoudelijke aandachtspunten en verwachtingen.
- 2. Offerering en aanvang vooronderzoek: Q.J. Lodder, E. Stouthamer (sept. 2006)**
- 3. Expert meeting op de Universiteit Utrecht (26 sept 2006)**

-
- Aanwezig: Q.J. Lodder, V. Beijl (RWS-RIZA); K.M. Cohen, E. Stouthamer, H. Middelkoop, W.Z. Hoek en M.G. Kleinhans (UU).
4. Verzamelen relevante bestaande onderzoeksresultaten en -methoden: K.M. Cohen
 5. Onderbouwen kansrijke aanpakken, die in het specifieke geval van de Rijn-Maas delta frequentie- en magnitudereconstructies opleveren: K.M. Cohen
 6. Conceptrapportage: K.M. Cohen (okt. 2006)
 7. Commentaarrondes n.a.v. concept rapportage: K.M. Cohen (nov. 2006).
 - Invalshoek / Uitgangspunten / Aanpakken (H. Berendsen, H. Middelkoop)
 - Inkadering / Statistiek (Q.J. Lodder, E. Stouthamer)
 8. Eind rapportage: K.M. Cohen (15 dec. 2006)
 9. Eindredactie: K.M. Cohen, E. Stouthamer (jan. 2007)
 10. Expert meeting naar aanleiding van rapport (1 mrt. 2007)
 - Aanwezig: Q.J. Lodder (RWS-RIZA/RIKZ); K.M. Cohen, E. Stouthamer, H.J.A. Berendsen, W.Z. Hoek (UU).
 - Commentaar ontvangen buiten de meeting: H. Middelkoop, M.G. Kleinhans.
 11. Oplevering rapport in druk (mrt. 2007)

1.2 Paleogeografie: verder terug dan de meetreeks

Voor de reconstructie van overstromingen met magnitudes die binnen de directe meetreeksen niet (of nauwelijks) voorkomen wordt gebruik gemaakt van de sedimentaire archieffunctie van het landschap en de ondiepe ondergrond (Fig. 2). Het reconstrueren van landschapsdynamiek in het geologische verleden is het vakgebied van de 'paleogeografie'. Deze discipline kent een lange onderzoekstraditie in de Nederlandse delta, onder andere vanuit de Universiteit Utrecht (Departement Fysische Geografie) en vanuit de voormalige Geologische Dienst (tegenwoordig TNO Bouw en Ondergrond). Figuur 3 toont de reikwijdte van jong-geologische sedimentaire archieven en paleogeografische reconstructie technieken, vergeleken met directe metingen en op historische gegevens gebaseerde reconstructies.

Paleogeografische studies maken gebruik van observaties, technieken en concepten uit disciplines zoals sedimentologie, proceskunde, hydrologie, stratigrafie, palynologie en archeologie, en integreren dit tot landschapsreconstructies in series kaarten en profielen (Fig. 2) en beschrijven de ontwikkeling van het landschap in een gebied door de tijd. De reconstructie wordt vervolgens gebruikt om de effecten van specifieke processen in het landschap (bijv. extreme overstromingen) te isoleren van effecten van andere processen. Paleogeografie is niet het doel op zich, maar het middel om het sedimentaire archief te ontsluiten ('de opbouw van de delta begrijpen') en het startpunt om specifieke verschijnselen te reconstrueren ('individuele overstromingen aan kunnen wijzen').

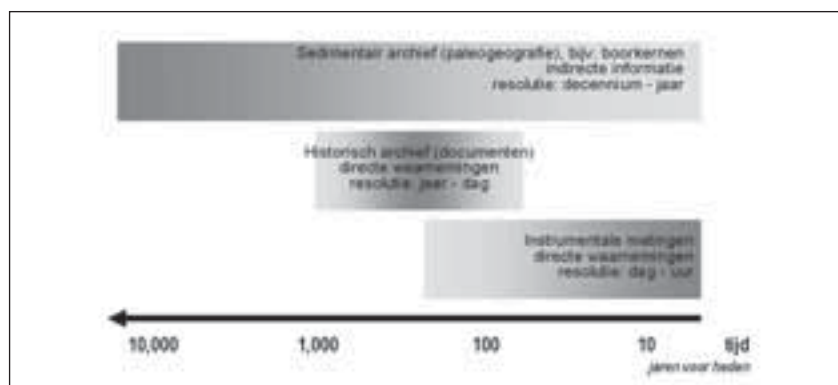


Figuur 2

Voorbeelden van paleogeografische reconstructie concepten (Berendsen & Stouthamer, 2001; <http://www.geo.uu.nl/fg/palaeogeography>). Linker kolom: het gebruik van moderne analogen [(a), (d); Columbia River, Canada] bij de interpretatie van sedimentopvolgingen in de ondergrond [(b)]; blokdiagrammen en profielen; Rijn-Maas delta]. Rechter kolom: de toepassing van proceskennis [(c)]; crevassewaaivorming als eerste fase van het ontstaan van een nieuwe rivierloop: het verschijnsel avulsie] bij de verklaring van gekarteerde patronen [(e); sedimentaire producten rondom locaties van rivierloopverlegging: avulsie-punten).

Figuur 3

Reikwijdte van informatiebronnen voor klimaat- en overstromings-reconstructies (naar Glaser & Stangl, 2004)



1.3 Leeswijzer, Opzet van het vooronderzoek

In voorgesprekken en in de eerste expert-meeting zijn de uitgangspunten geformuleerd (probleemdefinitie). De uitgangspunten zoals bepaald door de expertgroep hebben hun weerslag gevonden in de hoofdstukindeling van dit rapport. Aan bod komen:

- Hoe paleogeografisch onderzoek naar overstromingen in de Rijn-Maas delta te plaatsen is binnen het spectrum van lopend onderzoek en onderzoeksresultaten van het laatste decennium, om daar optimaal van te profiteren (§ 2.1).
- Welk concreet resultaat paleogeografisch onderzoek op zou moeten leveren ter inperking van de onzekerheidsmarge rondom de grootte van de maatgevende afvoer (§ 2.2).
- Welke onderdelen van het geologische archief het meest geschikt zijn voor de reconstructie van overstromingen door rivieren en welk onderdeel voor de reconstructie van stormvloed. Een belangrijk aspect is dat zowel de grootte als de herhalingstijden van als extreem te beschouwen paleo-overstromingen gereconstrueerd moeten worden. Er zijn diverse invalshoeken mogelijk: sommige leveren informatie over frequenties, andere leveren groottes van specifieke overstromingen (§ 2.3).

Op basis van die uitgangspunten:

- Is het delta gebied onderverdeeld in drie zones, met onderling sterk verschillende overstromingsdynamiek (in de natuurlijke situatie van de laatste 5000 jaar). Deze zonering begrenst tot hoever landinwaarts de ondergrond van de delta potentieel bruikbaar is voor stormvloedreconstructie, en tot hoever kustwaarts rivieroverstromingen als apart van stormvloed te onderscheiden zijn (§ 3).
- Is een beknopte samenvatting geschreven van de paleogeografische ontwikkelingsgeschiedenis van de Rijn-Maas delta in de laatste 5000 jaar. Hierin is de rol van overstromingen in de beschreven sedimentatiemilieus en de opbouw van de delta steeds aangestipt (§ 3).
N.B.: Het rapport geeft een stand van zaken van afgerond en lopend onderzoek. Bij verwijzing naar onderdelen van dit rapport die op publicaties 'in voorbereiding' gebaseerd zijn, dient vooraf met de auteur contact op genomen te worden.

Er zijn twee aanpakken uitgewerkt die voor rivieroverstromingen de gewenste aanvulling op de meetreeks kunnen leveren (§ 4). De statistische verwerking van resultaten zoals verwacht uit Aanpak 1 en Aanpak 2 wordt beschouwd in § 5.

- Aanpak 1 betreft de detail-reconstructie van één paleo-overstroming van ca. 1500 jaar geleden, waarbij de huidige Gelderse IJssel als nieuwe rivierloop ontstond ten gevolge van een waterscheidingdoorbraak. Aanpak 1 heeft als doel de grootte van de afvoer bij deze overstroming te reconstrueren. Aanpak 1 gebruikt naast reconstructie technieken zoals kartering en datering, numerieke modellering voor paleo-afvoerschatten (§ 4.1).
- Aanpak 2 betreft een extensieve boorcampagne naar restgeulopvullingen in het bovenstroomse deel van de Rijn-Maas

delta (Overbetuwe, Gelderse Poort, Niederrhein: rondom de 'apex' van de delta). Aanpak 2 heeft als doel frequentie-verdelingen van bovenmodaal grote overstromingen te reconstrueren. Deze aanpak gebruikt een netwerk van boorkernen van specifieke locaties, op bekende afstand van riviertakken van bekende ouderdom. Aanpak 2 combineert laboratoriumanalyse, GIS -analyse, numerieke modellering en multivariate statistiek (§ 4.2).

2. Uitwerking van de probleemstelling

2.1 Overstromingsonderzoek in aanvulling op bestaand paleogeografisch onderzoek

De afzettingen van de Rijn, de Maas en de Noordzee kust (waaronder voormalige lagunes) vormen een complex sedimentair archief. De afzettingen zijn gevormd bij steeds wisselende waterstanden, inclusief waterstanden behorende bij extreme afvoeren die leidden tot sedimentaire gebeurtenissen (*events*). Dit sedimentaire archief kan ingezet worden bij de beantwoording van veiligheidsvraagstukken, inzake de bescherming van Nederland tegen overstromingen. Het is zinvol paleogeografisch onderzoek naar overstromingen te beschouwen als een uitbreiding op bestaande onderzoeksresultaten en lopend onderzoek naar de opbouw van de Nederlandse delta. De kennis van de natuurlijke omstandigheden in de Nederlandse delta en het kustgebied is in de afgelopen decennia ver ontwikkeld. Het bereikte overzicht en de dichtheid van observaties ter onderbouwing is uniek in de wereld en deze uitgangssituatie schept de verwachtingen voor de mogelijkheden om ook paleo-overstromingen in de Nederlandse delta te kunnen reconstrueren.

De belangrijkste uitdaging van paleogeografisch onderzoek naar individuele overstromingen – en de reden dat op voorhand geen kant en klare resultaten uit paleogeografische studies over te nemen of af te leiden zijn – is dat het zeer hoge eisen stelt aan de mate van detail van de gereconstrueerde situaties. Die hoge eisen betreffen zowel het vervolgen van afzettingen van specifieke overstromingen, als de datering daarvan: het moet niet alleen zeker zijn dat op meerdere plaatsen een laagje overstromingsafzettingen wordt aangetroffen, maar ook dat het overal een-en-dezelfde overstroming betreft. Niet onbelangrijk is hierbij dat de belangrijkste dateringstechniek (^{14}C methode) in de regel een onzekerheid van 100-200 jaar heeft wat betreft de exacte ouderdom. Het nemen van series dateringen perkt deze onzekerheid iets in, voor de gunstigste gevallen tot maximaal 50 jaar op locaties met continue sedimentatie. Dit maakt het 'exact' dateren van frequenter terugkerende verschijnselen (zoals 1/50 jr overstromingen) zo goed als onmogelijk. Het benodigde detail voor studies naar individuele overstromingen is groter dan dat wat direct verkregen kan worden uit bestaande paleogeografische studies. Kansrijk paleogeografisch onderzoek naar frequenties en magnitudes van overstromingen zal daarom hoog moeten inzetten op dateringsresolutie en bovendien worden toegepast op die locaties waar effecten van kleinere overstromingen uit te sluiten zijn, zodat zeldzamere, grotere overstromingen als zodanig herkend kunnen worden. Voor de meest extreme overstromingen zal dat makkelijker zijn dan voor matig-grote overstromingen: verwacht mag worden dat grotere overstromingen, grotere hoeveelheden sediment mobiliseerden

en relatief dikke afzettingen produceren (ten opzichte van kleinere overstromingen op dezelfde locatie), wat herkenning zou bevorderen. Figuur 4 vat deze mogelijkheden en onmogelijkheden van het sedimentaire archief als aanvulling op hoogwatermeetreeksen samen.

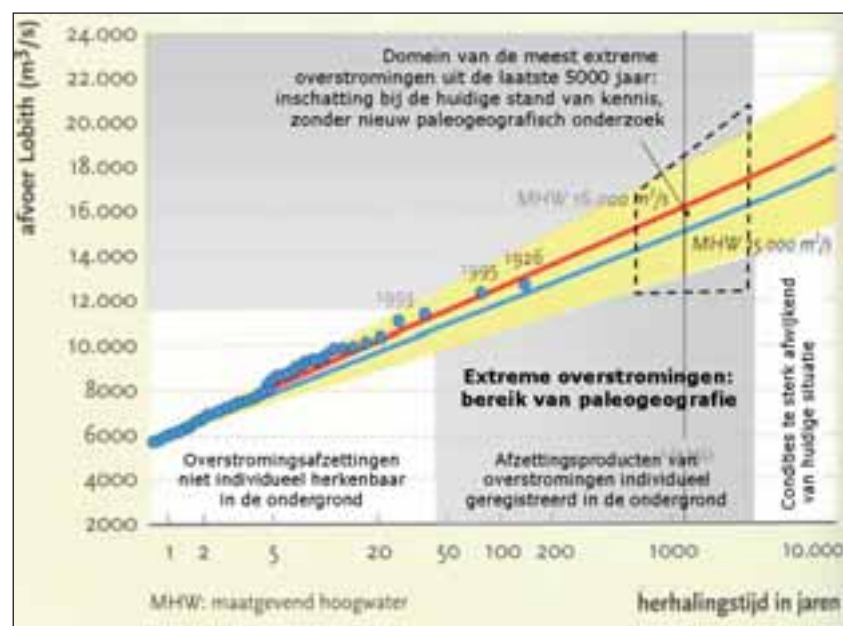
Paleogeografisch onderzoek heeft zich tot nog toe dan ook vooral gericht op ruimtelijke trends (het uitbreiden van de delta) en het actief worden en verlaten van riviertakken in de delta (karteren van zandbanen in de ondergrond, dateren van het begin en het einde van de activiteit van iedere tak). De aanwezigheid van dergelijke resultaten biedt overzicht van rivierdynamiek op deltaschaal (trends in geulverplaatsing en -verlegging, opslibbing van oeverwallen en overstromingsvlakten). Dit is een belangrijke randvoorwaarde voor het reconstrueren van overstromingen en maakt het mogelijk een gerichte onderzoeksaanpak voor het reconstrueren van paleo-overstromingen te formuleren, en daarvoor de kansrijkheid en benodigde tijdsinvestering onderbouwd in te schatten.

2.2 Extrapolatieverbetering met paleogeografische resultaten

De huidige wijze van vaststellen van het MHW ('Toetspeilen' uit de Hydraulische randvoorwaarden 1996, 2001 en 2006; Ministerie van Verkeer en Waterstaat), gebeurt op grondslag van het werk van de Boertien Commissie. Het vastgestelde MHW is sterk het resultaat van een op statistische aannames gebaseerde extrapolatie. De extrapolatie naar herhalings tijden groter dan 1/50 jaar staat of valt met de gehanteerde kansverdelingsfunctie. Feitelijk is de herhalings tijd ook voor de grootste gemeten afvoeren onzeker: de herhalings tijd die aan de 1926, 1993 en 1995 hoogwaters wordt toegekend (Fig. 1) wisselt sterk met de aangenomen kansverdelingsfunctie. Omdat het in de praktijk onduidelijk is welke kansverdelingsfunctie hierbij gehanteerd moet

Figuur 4

Bereik (grijs) waarbinnen paleogeografisch onderzoek nieuwe kennis kan opleveren ten aanzien van afvoergroottes en herhalings tijdsrelaties. Verder als Figuur 1.



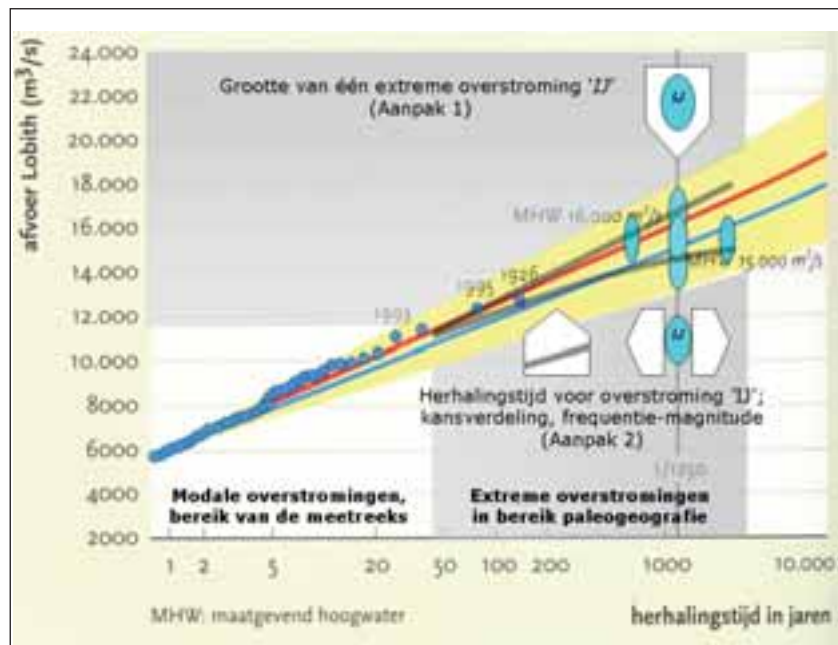
worden, zijn de extrapolaties voor meerdere kansverdelingsfuncties doorgerekend. De onzekerheidsmarge rondom de afvoer-herhalingstijd relaties is het ongewogen resultaat van deze serie extrapolaties (Figuren 1, 4 & 5).

In dit vooronderzoek is voor twee manieren van toepassing nagegaan, hoe paleogeografisch onderzoek kan bijdragen aan toetsing en verbetering van bovengenoemde statistische extrapolaties.

1. Er kunnen extra punten (grootte, bijbehorende herhalingstijd) aan de grafiek toe worden gevoegd, zo mogelijk voor een afvoer met 1/1250 herhalingstijd. Het reconstrueren van de grootte van een paleo-overstroming is overigens alleen in uniek-gunstige gevallen mogelijk - er is vermoedelijk slechts één Rijn-Maas delta casus die hiervoor geschikt is. Deze casus is overstroming 'IJ' in Figuur 5 en vormt de basis voor Aanpak 1 in § 4.1.
2. Er kan onderzoek gedaan worden naar de zeldzaamheid van de meest extreme afvoeren (klasse $>14.000 \text{ m}^3/\text{s}$) ten opzichte van matig extreme afvoeren (klasse $12.000\text{-}14.000 \text{ m}^3/\text{s}$) en normale hoge afvoeren (klasse $10.000\text{-}12.000 \text{ m}^3/\text{s}$). Hiervoor moet het sedimentaire archief van de laatste millennia systematisch worden geanalyseerd. Deze analyse moet de vorm van de kansverdelingsfunctie in het paleogeografische bereik vaststellen (Fig. 5). Hiertoe moeten paleo-overstromingen ter classificatie op volgorde van relatieve grootte gerangschikt worden. Dit is veel werk, en uitgewerkt als Aanpak 2 in § 4.2. Het is niet nodig iedere overstroming individueel te kwantificeren. Dat zou ook een onmogelijke opdracht zijn.

Figuur 5

Concrete doelstelling voor paleogeografisch onderzoek: (1) het kwantificeren van de grootte van een geselecteerde extreme overstroming (overstroming 'IJ'); (2) het vaststellen van de herhalingstijd van verschillende klassen grotere overstromingen. Verder als Figuur 1 en 4.



Het eerste type resultaat (Aanpak 1) beperkt het aantal mogelijke kansverdelingen en reduceert daarmee de onzekerheidsmarge bij herberekening van de grootte van de maatgevende afvoer (1/1250 afvoer). Het reconstrueren van de grootte van een afvoer gebaseerd

op paleogeografische gegevens zal minder nauwkeurig zijn dan direct gemeten afvoeren. De onzekerheidsmarge op de afvoerreconstructie kan in de MHW berekeningen meegewogen worden. Zolang deze kleiner is dan het huidige onzekerheidsinterval (13,000-18,000 m³/s voor 1/1250 afvoer) is een verbeterde MHW schatting te verwachten. Het doel van Aanpak 1 moet dan ook zijn een extreme afvoer van orde grootte 12,000-18,000 m³/s met een nauwkeurigheid van ca. 1000 m³/s te kwantificeren. De herhalingstijd bij deze afvoer blijft dan nog een onbekende (net zoals de herhalingstijd van de 1995 of 1926 overstroming onbekend is ondanks dat ze gemeten zijn).

Het tweede type resultaat (Aanpak 2) is juist gebaseerd op herhalingstijden van afvoeren van toenemende grootte. Het biedt de mogelijkheid in een herberekening de verschillende kansverdelingsalternatieven gewogen mee te nemen. In zo'n kansverdelingsberekening zijn de Aanpak-2 resultaten te beschouwen als aanvullende 'voorinformatie' en als zodanig verwerkbaar met Bayesiaanse statistische technieken (Chbab e.a. 2000; Chbab & Van Noortwijk, 2002; zie § 4.3.3 en § 5). Ten opzichte van de huidige berekeningen zonder informatie in het bereik 1/100-1/1250 herhalingstijd, zal een berekening met informatie in dit bereik de onzekerheidsmarge rondom de afvoer-herhalingstijdsrelatie inperken.

Aanpak 1 en Aanpak 2 (§ 4, Appendix 2) zijn sterk complementair waar het het inschatten van de herhalingstijd van extreme afvoeren van gekwantificeerde grootte betreft.

2.3 Selectie van locaties voor overstromingsreconstructies

In potentie kunnen overstromingsreconstructies de onzekerheid in de herhalingsfrequenties van overstromingen voor extreem grote magnitudes verkleinen (§ 2.1, 2.2) – mits hiervoor geschikte situaties in het sedimentaire archief beschikbaar zijn. Uit de huidige stand van paleogeografische kennis zou moeten volgen welke gelegenheid tot overstromingsreconstructie de ondergrond van de delta biedt:

- *Is er een extreme overstroming uit de laatste millennia die wijdverbreid genoeg gereconstrueerd kan worden, zodat de grootte van de overstroming kwantitatief kan worden geschat?*
- *In welke elementen uit de sedimentaire opbouw van de ondergrond (welk type facies, welke subonderdeel van het voormalige riviersysteem) zijn grote overstromingen individueel herkenbaar geregistreerd? Is de kennis van die elementen van voldoende detailniveau?*

Vanuit sedimentair perspectief zijn verschillende groepen afzettingen te onderscheiden. Afzettingen van 'in de rivier' (pakketten beddingafzettingen) zijn minder geschikt voor overstromingsreconstructie, omdat 'in de rivier' altijd wel water stroomt en sedimenteren en eroderen van afzettingen voortdurend plaats vindt, of er nu hoge afvoer, extreme afvoer of gemiddelde afvoer condities heersen.

Afzettingen van 'langs de rivier' (pakketten oeverwalafzettingen) zoals tegenwoordig in uiterwaarden zijn al meer geschikt, omdat hier alleen tijdens overstromingen noemenswaardige erosie- en sedimentatie-activiteit plaatsvindt. Toch zijn individuele overstromingen ook binnen dergelijke pakketten nauwelijks te herkennen. Allereerst bestaat er geen eenduidige relatie tussen afvoergrootte in de rivier en de dikte van de afzettingen die lokaal 'toevallig' bereikt wordt. Daarnaast verstoren zaken als bodemvorming, landbouw (ploegen) en uitdroging de gelaagdheid in de afzettingen, zowel direct langs als op grotere afstand van de rivieren (in de Nederlandse poldersituatie zelfs in tamelijk extreme mate). Als het gaat om het tellen van extreme overstromingen zijn natte, zo min mogelijk verstoorde afzettingenmilieus op relatief grote afstand van actieve rivieren het meest geschikt. Op deze plaatsen komt het tijdens normale overstromingen niet tot nauwelijks tot sedimentatie. Maar grote overstromingen zijn de uitzondering op die regel en daardoor op specifieke locaties juist wel als afzonderlijke laagjes herkenbaar. Vooral bij het formuleren Aanpak 2 vormt bovenstaande beschouwing een belangrijk uitgangspunt.

In de ondergrond zijn alleen **sedimentaire eigenschappen** direct waar te nemen. Voorbeelden hiervan zijn: de dikte en ruimtelijke verspreiding van overstromingsafzettingen, hoogte van voorkomen van afzettingen, korrelgrootte van dunne overstromingslaagjes ten opzichte van achtergrond sedimentatie, maar ook de fossielinhoud waaronder bijvoorbeeld dateerbaar organisch materiaal. Om de sedimentaire eigenschappen om te zetten in gewenste parameters zoals 'de grootte van de afvoer die de afzetting vormde', zijn berekeningen nodig. Dergelijke berekeningen vereisen verder nog wel aanvullende randinformatie ('*Wat was de locatie van rivierlopen ten tijde van een serie overstromingsafzettingen? – 'Is het duidelijk dat dit een overstroming was die in de hele delta invloed had, of zou het een lokale overstroming van een veel beperkter gebied zijn?'*') en het doen van hydrodynamische vereenvoudigingen (*Welke numerieke schematisatie dient te worden gebruikt? Hoe moet onbekendheid van de bodemruwheid worden verdisconteerd?*). Dit zijn echter berekeningsvereisten die ook in niet-paleogeografische toepassingen veelvuldig aan de orde zijn geweest, en waarvoor dus antwoorden en probleemomzeilende strategieën bestaan. De berekeningsvereisten hebben hun weerslag op het paleogeografisch onderzoek dat tot overstromingsreconstructie kan leiden.

3. De ondergrond van de delta als overstromingsarchief

De rol van overstromingen in de paleogeografische reconstructies is enigszins onderbelicht in de bestaande literatuur over de ontwikkeling van de delta in Nederland. Studies richtten zich in de regel op het identificeren van lange termijn trends en het eindresultaat van lange reeksen overstromingen, waarbij individuele overstromingen in de regel niet expliciet werden bediscussieerd. Toch zijn de effecten van individuele overstromingen wel degelijk zeer bepalend geweest voor de opbouw van de delta, vooral wat betreft de heterogeniteit van de delta ondergrond (facies verschillen, facies distributie).

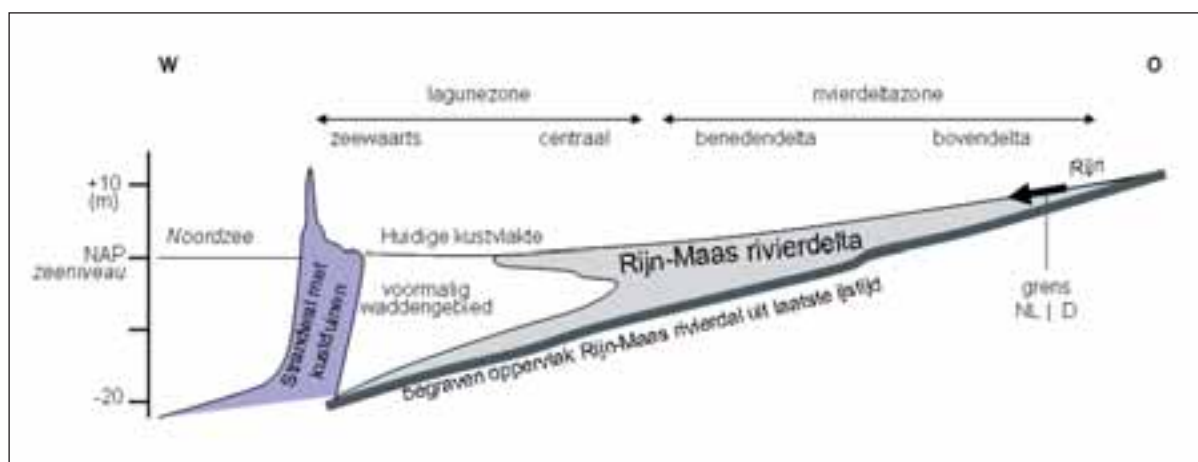
Met de huidige kennis⁵ over de opbouw van de ondergrond kan voor grote delen van Nederland tot in hoge mate van detail worden aangegeven, voor het recente geologische verleden:

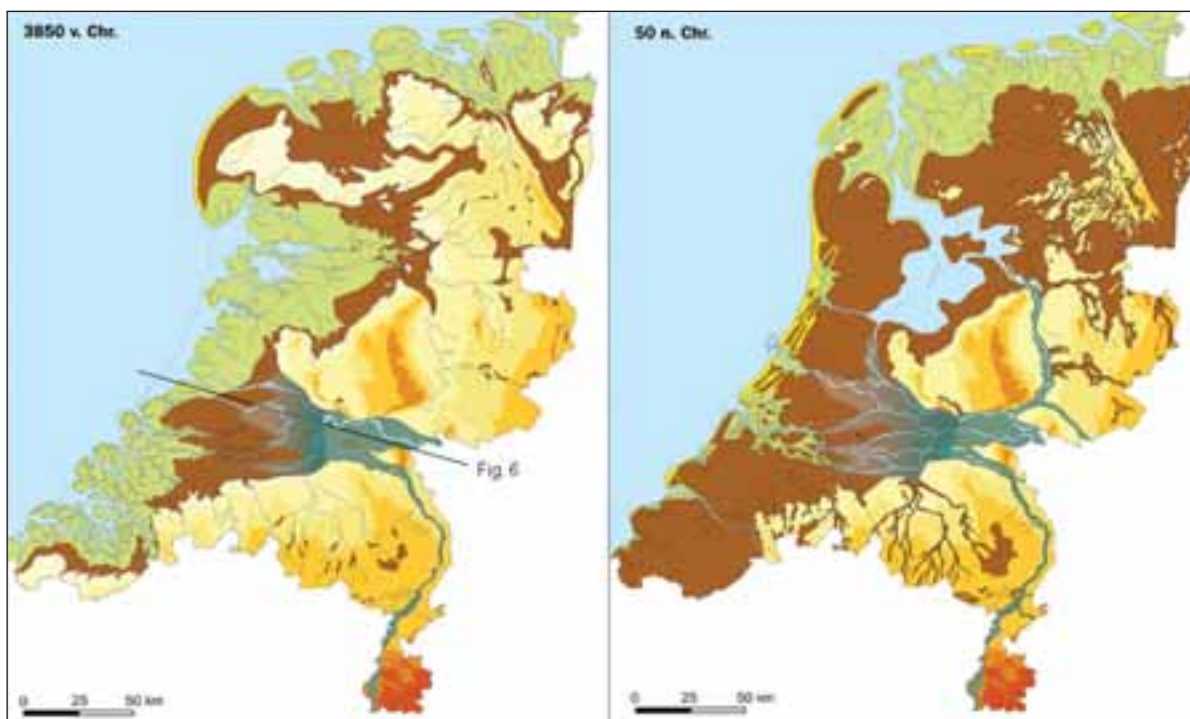
- Waar lagen gedurende de laatste 5000 jaar voormalige rivierlopen, oeverwallen, overstromingskommen, riviermondingen, zegaten, waddegebieden, open lagunes, kustmoerassen en dergelijke;
- Wanneer en hoe lang zulke onderdelen van de zich ontwikkelende delta actief waren;
- Wat de sturende factoren zijn die de trends in de delta ontwikkeling verklaren.

De Rijn-Maas delta is wereldwijd de best bestudeerde delta. Dat wil zeggen: het is het meest nauwgezet bestudeerde deltagebied, met het dichtste en best dekkende netwerk van grondboringen en dateringen. De verworven inzichten in deltaopbouw onder invloed van rivieractiviteit en kustvormende processen zijn voor de Nederlandse delta dus zeer robuust met veldgegevens onderbouwd. De kwaliteit van gegevens is voor alle onderdelen van de delta hoog: zowel van de strandwallen en duinen aan de kust zelf, als voor het binnenlandse, door rivieren gedomineerde deel van de delta. De Rijn-Maas delta is wat sedimentatie betreft vooral een laguneopvullend systeem, relatief beschermd door een barrierekust (back-barrier delta, Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen, 2005; Erkens e.a. 2006 - Fig. 6, 7).

Figuur 6

Schematische Oost-West doorsnede van de Nederlandse delta. Zie Figuur 7 voor locatie.





Figuur 7

Paleogeografische situatie van Nederland ca. 5000 jaar geleden (3850 v. Chr.) en ca. 2000 jaar geleden (50 n. Chr.). Licht groen: waddegebieden en estuaria; Bruin: veengebieden, moerassen; Blauwgroen: Riviersedimentatiegebied. Geel/bruin/rood: relatief hoog gelegen gebied, buiten overstromingsbereik. Naar TNO-B&O overzichtskaarten (www.noaa.nl / www.dinoloket.nl; Vos & Zeeberg, in voorbereiding; Ook: De Mulder e.a., 2003).

3.1 Landschapontwikkeling en klimaatschommeling: 5000 jaar variaties in overstromingsgevoeligheid

Bij de reconstructie van reeksen extreme afvoeren op basis van het sedimentaire archief, moet er rekening gehouden worden met mogelijke 'sluipende' trends. Een fictief voorbeeld hiervan is: in de periode 5000-3000 jaar geleden, leidde een afvoer $>7.000 \text{ m}^3/\text{s}$ tot afzettingen die we als extreem herkennen t.o.v. het achtergrond signaal van normale overstromingen; terwijl in de periode 3000-1000 jaar geleden pas een afvoer $>9.000 \text{ m}^3/\text{s}$ tot van het achtergrondsignaal te onderscheiden afzettingen leidde. Bij het opzetten van onderzoek moet er daarom voor gewaakt worden dat er een voldoende hoeveelheid gegevens verzameld wordt, zodat getoetst kan worden of de afvoerreeks 'homogeen' is of dat zij inderdaad de op onderdelen vermoede interne trends vertoont. Zulke 'interne consistentie checks' zijn alleen zinnig als én over de hele breedte van de delta gegevens worden verzameld én over een voldoende lange tijdsperiode. Er is een compleet beeld van extreme overstromingen nodig voordat trendanalyse zin heeft. Op beperkte steekproeven alleen (een deelgebied, een kort tijdvak) is geen interne consistentie controle mogelijk.

Dit vooronderzoek heeft betrekking op overstromingen over de laatste 5000 jaar, omdat die periode wat betreft klimaatschommelingen en snelheid van relatieve zeespiegelstijging wat betreft gemiddelden en variabiliteit als vergelijkbaar met de huidige tijd gesteld kan worden. Absolute zeespiegelstijging/-daling was in de afgelopen 5000 jaar zeer beperkt. Er is wel sprake van relatieve zeespiegelstijging langs de kust, omdat West Nederland gestaag daalt ten opzichte van Oost Nederland (Cohen, 2003). De zeespiegelstijging bedraagt zo'n 3 m over de

afgelopen 5000 jaar (~2 meter tussen 5000 en 3000 jaar geleden, en 1 meter in de laatste 3000 jaar; Cohen, 2005) wat relatief gering is, vergeleken met de 10.000 jaar ervoor. Ook klimaatsschommelingen waren beperkt in magnitude, zeker vergeleken met de perioden 15000-10000 en 10000-5000 jaar voor heden (Hoek, 1997; Berendsen & Stouthamer, 2001). Wel was er sterk toenemende invloed door menselijke ingrepen in het achterland. Er was een aanzienlijke toename van de sedimentlast aan klei en silt in de periode 3000-1000 jaar geleden ten opzichte van 5000-4000 jaar geleden (Erkens e.a., 2006). De grootte en timing van de sedimentlast-verandering toont de gestaag toenemende invloed van de mens op sediment en afvoer van de rivieren aan, die de invloed van de subtiële natuurlijke klimaatsfluctuaties ver overstijgt (Erkens e.a., 2006). Deze verandering kan zeker verondersteld worden invloed te hebben gehad op de overstromingsdynamiek, zowel langs directe weg (sneller afstromen van water, hogere piekafvoeren) als langs indirecte weg (verhoogde sedimentlast en daardoor veranderlijk riviergedrag). De gevoeligheid van het deltagebied voor overstromingen is over de laatste 5000 jaar dus niet constant te noemen, maar er is goed bekend wat er hoe veranderd is. Met name in het bovenstroomse deel van de delta mag verwacht worden dat een geleidelijke verandering in de registratie (afzettingen, preservatie) van overstromingen te relateren is aan de toenemende sedimentlast, maar het is vooralsnog onduidelijk hoe groot het effect van voortschrijdende sedimentatie op frequentie-magnitude relatie van overstromingen zal zijn.

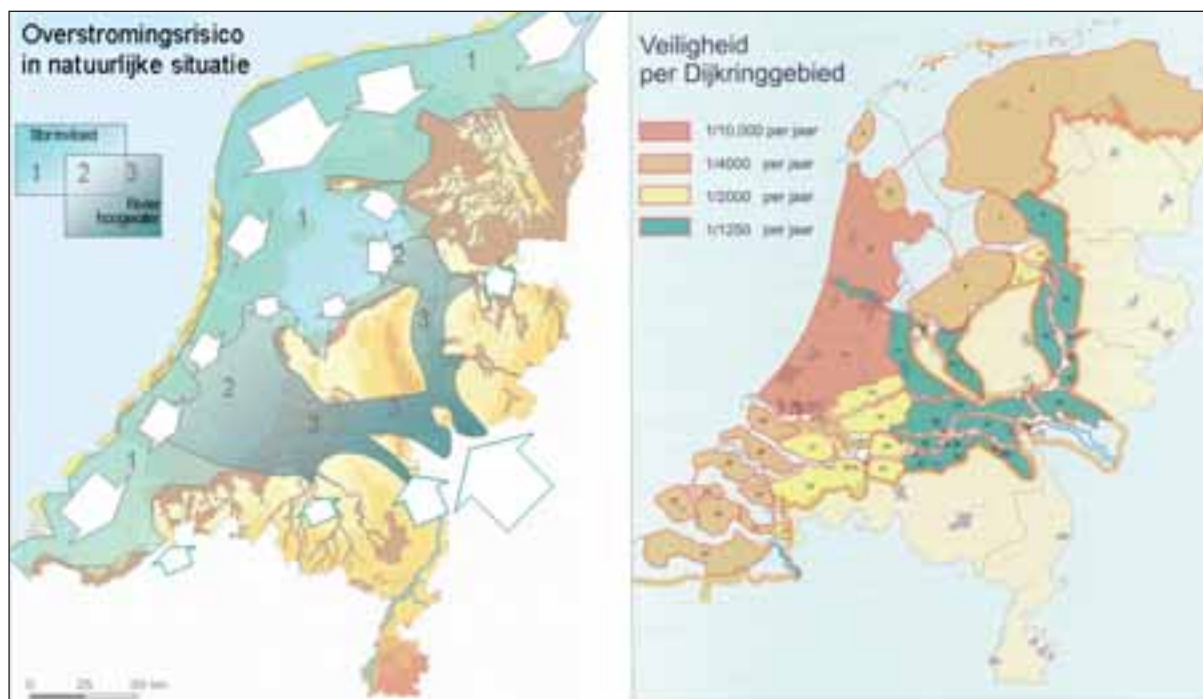
3.2 Zonering van overstromend Nederland

Achter de strandwallen, is op basis van de paleogeografie van de laatste 5000 jaar een driedeling in landschapzones te maken, die functioneel is voor het reconstrueren van paleo-overstromingen (Fig. 8).

1. Zeewaartse lagunezone (getijde bekkens, estuaria, 'achter de strandwal')
2. Centrale lagunezone (zoetwater getijde, veenmoerassen, lagunemeren)
3. Rivierdeltazone (riviertakken, stroomruggen, komgebieden)

In de rivierdeltazone zijn extreme rivierafvoeren en in de zeewaartse zone zijn zee-inbraken de respectievelijke primaire oorzaken van overstromingen. De centrale lagunezone is een gebied met vergelijkbaar sterke impact van beide vormen van overstroming. De meest extreme overstromingen in dit gebied zijn in het algemeen een combinatie van storm en verhoogde afvoer. Zo heeft theoretisch de combinatie van een 1/100 jaar stormvloed en een 1/100 jaar piekafvoer een 1/10.000 jaarlijkse herhalingskans (bij volledige onafhankelijkheid van de kans op optreden van beide typen overstromingen).

De rivierdeltazone heeft zich de laatste 5000 jaar in benedenstroomse richting ten koste van de centrale zone uitgebreid (Tielerwaard, Culemborgerwaard, Vijfheerenlanden, Zuid-West Utrecht). De zone



Figuur 8

Natuurlijk overstromingsrisico (links, achtergrond als Fig. 7; situatie 800 jr n. Chr.) en wettelijk genormeerde veiligheid per dijkkringgebied (rechts; Wet op de waterkering)

heeft zich in dezelfde periode ook in bovenstroomse richting uitgebreid. Haar tegenwoordige stroomopwaartse grens ligt net voorbij de Duits-Nederlandse grens in het traject Emmerich-Rees-Wesel (Fig. 8).

Voor de rivierdeltazone geldt met betrekking tot paleogeografische ontwikkeling en overstromingsdynamiek:

- De rivierdeltazone kent vooral in de laatste 5000 jaar aanzienlijke sedimentatie. In de loop van de tijd vormen zich minder lokale organische afzettingen (steeds minder veen), doordat er steeds meer clastisch materiaal uit het achterland aangevoerd wordt en in de delta sedimenteert (met name steeds meer klei en silt).
- De rivierdelta kreeg een toenemende last aan suspensief transport (klei, silt) uit het achterland te verwerken. Zandtransport en -sedimentatie vindt vooral plaats in de geulen en komt vooral van direct stroomopwaarts. De omgewerkte hoeveelheden zand per tijdseenheid zijn als min of meer constant te beschouwen.
- Het is duidelijk dat de geulpatronen gedurende de laatste 5000 jaar veranderen van brede geulen met meanders in een rivierdal situatie, naar splitsende meanderende riviertakken van iets geringere breedte en iets andere meandergolflengte (Berendsen & Stouthamer, 2001). Het is niet duidelijk in hoeverre de patroonverandering het gevolg is van delta-sedimentatie alleen, of dat er ook een subtiel effect van veranderende gemiddelde afvoer uit af te leiden zou zijn.
- De rivierdelta is in vroeg historische tijden bedijkt en vanzelfsprekend veranderde dit de overstromingsdynamiek drastisch. Kleinere overstromingen worden vanaf dan door steeds betere dijken gekeerd, extreme afvoeren bleven tot zo'n 150 jaar geleden tot overstromingen leiden. Vooral ijsdammen, maar ook andere oorzaken zoals kwel, slecht onderhoud, ondermijning van schoordijken, hebben tot dijkdoorbraken en middelgrote

overstromingen geleid. Dijkdoorbraken zeggen daarom op voorhand weinig over de grootte van rivierafvoeren.

De zeewaartse helft van de lagunezone omvat de getijdebekkens en estuaria direct achter de strandwallen en zeegaten. In de estuaria monden grotere en kleinere riviertakken uit. De getijdebekkens hebben een landinwaarts vertakkend netwerk van geulen en krekens en zijn met open zee verbonden door zeegaten die de strandwal doorsnijden. **De centrale lagunezone** wordt vooral gekenmerkt door veengebieden en relatief beperkte invloed zowel 'vanuit zee' als 'vanuit het rivierdal in het achterland'. Deze zone is buiten het bereik van Rijn of Maastakken tot verder landinwaarts ontwikkeld (in Noord Nederland; rondom de voormalige Zuiderzee en de Waddenzee; bijvoorbeeld: Reise, 2005) dan binnen het bereik van deze rivieren (Midden Nederland: wel in het Groene Hart, niet in de Nederbetuwe).

Voor de lagunezone (zeewaartse en centrale deel) geldt met betrekking tot paleogeografische ontwikkeling en overstromingsdynamiek:

- De strandwal van Noord- en Zuid-Holland is van 5000-2000 jaar geleden een regressief (zeewaarts groeiend, zelfsluitend) systeem. De huidige kustlijn vormt zich in de laatste 2000 jaar, waarbij een deel van de strandwal afslag onderging en zich de huidige kustduinen (Jonge Duinen) vormden.
- In het lagunesysteem ontwikkelden zich tussen 5000-2000 jaar geleden veenkussens, maar in de laatste millennia is dit landschap drastisch veranderd door menselijk ingrijpen (selnering, copeontginningen, inpolderingen) en door inbraken vanuit zee (bijvoorbeeld: het Almere werd de Zuiderzee).
- Door middeleeuwse afgraving van veen / turfwinning werd het opgevolde lagunegebied kwetsbaarder voor grootschalige overstroming, wat ook de aandacht voor dijken en veiligheidswetgeving historisch heeft gestuurd.

Appendix 1 geeft een overzicht van historisch bekende stormvloeden. Met de tijd veranderende afzettingskarakteristieken maken dat ook het type locaties dat beschikbaar is voor overstromingsreconstructies varieert, zowel in de ruimte als terug in de tijd. Dit is als uitgangspunt genomen in de verdere onderverdeling van de beschouwde periode en bij de selectie van locaties voor Aanpak 1 en Aanpak 2.

3.3 Rivieroverstromingen: het meest bovenstroomse deltagebied

Gekoppeld aan de paleogeografische zonering (§ 3.2), zijn er topografische verschillen binnen de delta en deze maken dat de herkenbaarheid van extreme overstromingen ten opzichte van normale grote overstromingen beter is in de rivierdeltazone dan in de lagunezones.

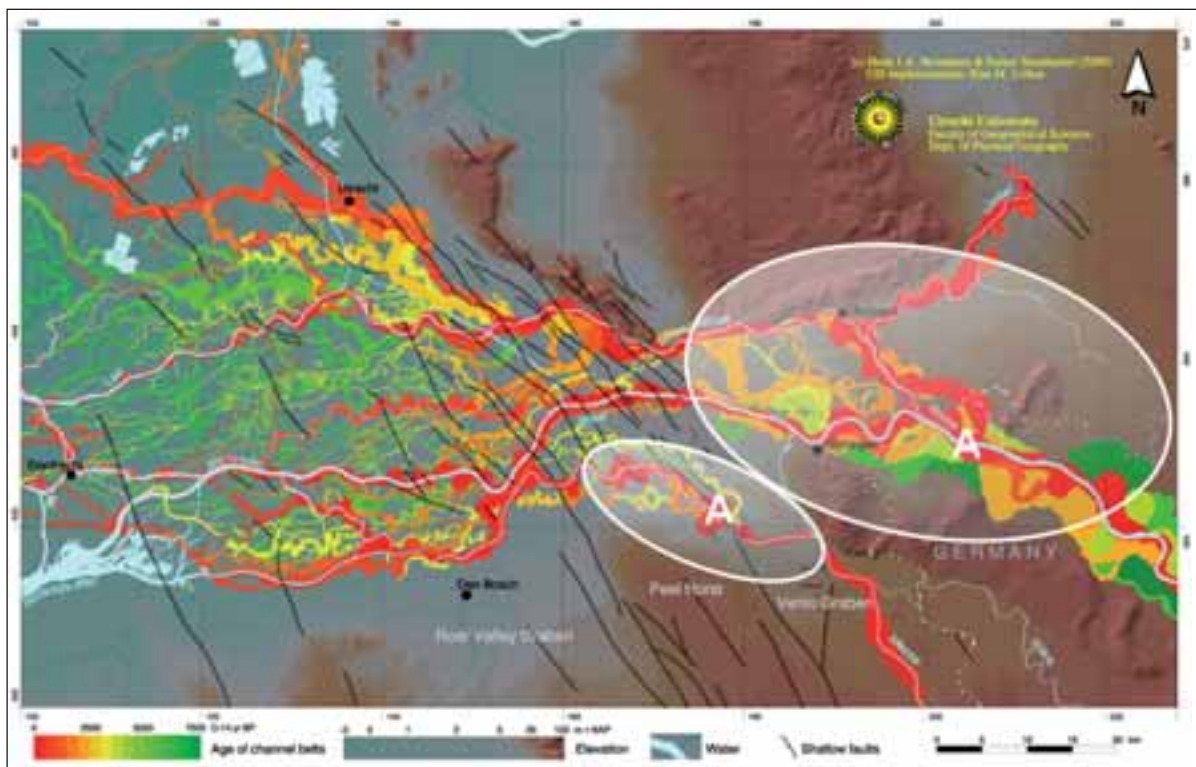
De lagunezone bergt bij extreme overstromingen (stormvloed, al dan niet gelijktijdig met rivier piekafvoer) veel meer water dan tijdens normale overstromingen, maar dit leidt vooral tot een sterk

vergroot overstroomd oppervlak en niet tot al te zeer verhoogde waterstanden in dit deel van de delta (behoudens op doorbraakpunten en in zeegaten), ten opzichte van normaal overstromingspeil. Dit is vooral het gevolg van het ontbreken van geologisch overgeërfd reliëf dwars op de strandwal. Slechts oeverwallen van grotere rivierlopen zoals de Oude Rijn en Merwede hebben enig scheidend vermogen voor stormvloed en vanuit het noorden en zuiden. Overstromingsafzettingen in de lagunezone zijn daardoor moeilijk op te splitsen in afzettingen van modale afvoer en hoogwaters ('normaal najaarsweer', 'gewone stormen', modale jaarlijkse piekafvoer) en afzettingen van extreme stormvloed.

In de rivierdeltazone is er meer scheidend reliëf binnen het overstromingsgebied in de vorm van stroomruggen⁶ van recent verlaten rivierlopen en oeverwallen langs actieve geulen (Fig. 9). Dit leidt tot natuurlijke compartimentering ('kommen') van het overstroomde gebied bij normale overstromingen. Alleen bij extreme overstromingen worden ook de stroomruggen door de waterstand overtopt. Op enige afstand van de actieve geulen zijn in de kommen de effecten van bovenmodale en extreme afvoer als afwijkingen van de normale toestand (langjarig achtergrondsignaal, normale overstromingen) te onderscheiden, bijvoorbeeld omdat de afzettingsslaagjes dikker zijn en van gemiddeld grovere korrelgrootte. Aanpak 2 (§4.2) heeft het maken van dit onderscheid als uitgangspunt. Het effect van extreme overstromingen ten opzichte van normale overstromingen is in het rivierengebied vermoedelijk beter te herkennen dan in het kustgebied.

Met name de Rijn bovendelta (de rivierdeltazone stroomopwaarts van Rhenen, tot aan Rees in Duitsland, Fig. 9) wordt geflankeerd door geologisch overgeërfd reliëf in de vorm van stuwwallen en met dekzand overstoven terrassen uit de laatste ijstijden. Dit reliëf is een restrictie voor de breedte van het overstroomde gebied bij grotere en extreme overstromingen. Dit maakt dat waterstandsverschillen van extreme t.o.v. normale grote piekafvoer er groter zijn, dan dat ze benedenstrooms zijn. Om deze reden is de bovendelta beter geschikt voor overstromingsreconstructie dan de benedendelta.

Een bijkomend voordeel voor overstromingsreconstructies in de bovendelta, is dat de afvoer er minder gesplitst is dan benedenstrooms. Het meest bovenstroomse splitsingspunt kan beschouwd worden als de 'apex' (stroomopwaarts beginpunt) van de delta (Fig. 8). De afvoer behorende bij MHW's worden dan ook betrokken op de ongedeelde Rijngeul, zoals die op het apexpunt ('Lobith') de delta binnen komt. Het huidige Nederlands-Duitse grensgebied is in de laatste 5000 jaar steeds het delta-apexgebied geweest. In dit gebied is het zekerder dat in het sedimentaire archief geregistreerde overstromingen daadwerkelijk piekafvoer van de Rijn betroffen. Ver stroomafwaarts van de apex is het denkbaar dat geregistreerde overstromingen slechts een lokale oorsprong hebben (jongere riviertakken met nog onderontwikkelde oeverwallen overstroomd al bij relatief lage piekafvoer, langer actieve riviertakken met meer ontwikkelde oeverwallen overstroomd pas bij relatief hoge piekafvoer).



Figuur 9

Stroomruggen in de rivierdeltazone: ligging en ouderdom (Berendsen & Stouthamer, 2001). Witte ellipsen markeren het bovendeltagebied van de Rijn respectievelijk de Maas, rondom de delta apex ('A', meest bovenstroomse voormalige splitsingpunt van Rijn respectievelijk Maas).

Ook de Maas heeft haar eigen apex-punt in de Nederlandse delta. Het Maas delta-apexgebied lag in de laatste 5000 jaar in het zuidoosten van het Land van Maas en Waal en het oostelijke deel van de Maaskant. Het feit dat de Maas haar delta met de Rijn deelt, zorgt voor een complexe overstromingsdynamiek in het zuidwestelijke deel van de rivierdeltazone. Hier treedt opstuwing van water in confluierende riviertakken op, doordat piekafvoeren van Maas en Rijn vaak asynchroon optreden. Dit kan lokale overstromingen van Maasgeulen tijdens Rijn hoogwater en omgekeerd tot gevolg hebben. In de huidige situatie, is de waterstand in de Waal vrijwel altijd hoger dan die van de Maas; maar in de periode 5000-2000 jaar geleden waren rijntakken in dit deel van de delta minder groot en kwam de Maas-stuw-Rijntak situatie mogelijk vaker voor. Voor de reconstructie van specifiek door piekafvoeren uit het Maasstroomgebied veroorzaakte overstromingen, is in de delta alleen het Maas delta-apexgebied geschikt. Dit vooronderzoek concentreert zich op overstromingsreconstructie van de Rijn. Het is mogelijk in Aanpak 2 (§ 4.2) ook naar overstromingen van de Maas uit te breiden, door het Maas delta-apexgebied in de veldcampagne en analyse op te nemen. Zie § 4.4 voor alternatieve mogelijkheden tot overstromingsreconstructies, onder andere in het Maasdal bovenstrooms van de delta.

3.4 Problematiek van stormvloedreconstructies: verschillen tussen getijde- en riviersedimentatie

Waar in de getijdebeïnvloede zones overstroming een dagelijks terugkerend en daardoor regelmatig fenomeen is, met voorspelbare

hoogte, geldt voor het rivierengebied dat overstromingen en afvoervariaties van seizoenale aard zijn en van nature onregelmatig in frequentie. Dit gaat op voor zowel de grotere rivieren Rijn en Maas, als voor kleinere rivieren als Schelde en Overijsselse Vecht, ondanks de verschillen in type weer-'events' die de rivierafvoervariaties over grote resp. kleine stroomgebieden veroorzaken. Maar de duur van inundatie en de hoeveelheid instromend water is per terugkerende rivieroverstroming groter dan per individuele getijgolf, en daardoor worden er bij rivieroverstromingen grotere hoeveelheden sediment over een groter gebied afgezet. Bij getijde-overstromingen is bovendien sprake van in- en uitstromen, waardoor hetzelfde sediment vaker recirculeert. In rivierkommen is retourstroming beperkt tot de benedenstroomse rand van de kom, en zakt de waterstand na een overstroming langzamer waardoor afgezet materiaal veelal direct preserveert en waardoor sequenties van rivierafzettingen, op enige afstand van geulen, veelal als continu beschouwd kunnen worden.

Verschillen in frequentie, duur en magnitude van de overstromingen maken dat rivier- en getijde-gedomineerde afzettingen buiten de eigenlijke geulsystemen duidelijk van elkaar verschillen wat betreft sedimentatiesnelheden, frequentie van sedimentaire hiaten, bodemvorming (rijping) en bioturbatie, ondanks het feit dat de sequenties relatief continu zijn. De verschillen in continuïteit van sequentie tussen rivier- en getijde-gedomineerde beddingafzettingen, i.e. in voormalige geulen, zijn subtieler. Binnen geulsystemen domineert omwerking: hier is het overgrote deel van het sediment dat in een uiteindelijk verlaten geullichaam ligt opgeslagen net voor het verlaten raken voor het laatst omgewerkt. Alleen de laatste fase van activiteit blijft dus min of meer continu bewaard. Zowel voor getijde- als voor riviergeulen geldt dat naar mate een geul langer bestaat heeft, het grootste deel van de bestaansduur niet of slechts zeer fragmentair als sedimenten is gepreserveerd. Daarom zijn sequenties van beddingafzettingen zeer beperkt bruikbaar als sedimentair archief.

4. **Reconstructiemogelijkheden voor overstroomd oppervlak, waterstandshoogte en overstromingsfrequentie**

In dit hoofdstuk wordt een selectie van reconstructiemogelijkheden voor paleo-overstromingen gepresenteerd. Het betreft die methoden / locaties / invalshoeken waarvan het expert panel verwacht dat op overzienbare termijn⁷ (2007-2010), concrete resultaten behaald kunnen worden, omdat ze aansluiten bij recentelijk afgerond en op dit moment lopend onderzoek.

4.1 AANPAK 1 - Kwantificeren van een specifieke paleo-overstroming (case-study)

In gunstige gevallen, veroorzaakten extreme overstromingen markante (grootschalige) paleogeografische veranderingen en zijn daarmee individueel karteerbaar. Dit is met name het geval voor die overstromingen waarbij radicale rivierverleggingen optraden naar nieuwe gebieden (deltautuitbreiding). Mits niet al te zeer verstoord door latere overstromingen en laterale erosie/omwerking, bieden dergelijke cases van 'eerste overstroming in een nieuw gebied' de mogelijkheid (a) de grootte van het overstroomde gebied te reconstrueren, (b) de waterdieptes over het overstroomde gebied te reconstrueren, inclusief het waterspiegelverhang in het overstroomde gebied; (c) lokaal de dimensies van geulen toegeschreven aan de overstroming te bepalen. In combinatie kunnen deze gegevens gebruikt worden voor de gewenste (§ 2) debietschattingen bij de paleo-overstroming.

- Waterspiegelhoogte kan afgeleid worden uit de hoogte waarop langs de rand van het overstroomde gebied afzettingen van de overstroming worden aangetroffen. Verder kan de waterhoogte afgeleid worden uit de top van crevassewaaiers die aan de overstroming worden toegeschreven. Met name de overstroming die leidde tot de vorming van de Gelderse IJssel (Fig. 10) is zeer bruikbaar als casus in een dergelijke studie. Dit omdat deze casus (de IJssel-avulsie) een bijzondere avulsie in de deltageschiedenis was, die niet alleen met oeverwaldoorbraak maar ook met doorbraken van wind-duingordels en dekzandruggen op afstand van de Rijn hoofdgeul gepaard ging (Cohen, in voorb.).
- De maaiveldhoogte van direct voor de overstroming kan op basis van bodems e.d. direct onder overstromingsafzettingen worden afgeleid. In veengebieden (delen van het IJsseldal tussen Deventer en Zwolle) kan dit gecomplementeerd worden met grondwaterspiegels gereconstrueerd uit veendateringen. Het IJsseldal stroomafwaarts van Deventer, was voor het ontstaan van de Gelderse IJssel een laagveengebied en de maaiveldhoogte ter plaatse kwam vrijwel overeen met de toenmalige grondwaterspiegel (Cohen, in voorb.).
- Op locaties waar zich doorbraakgeulen door dekzandruggen vormden, zijn uit de versnijdingspatronen ook waterspiegelhoogtes

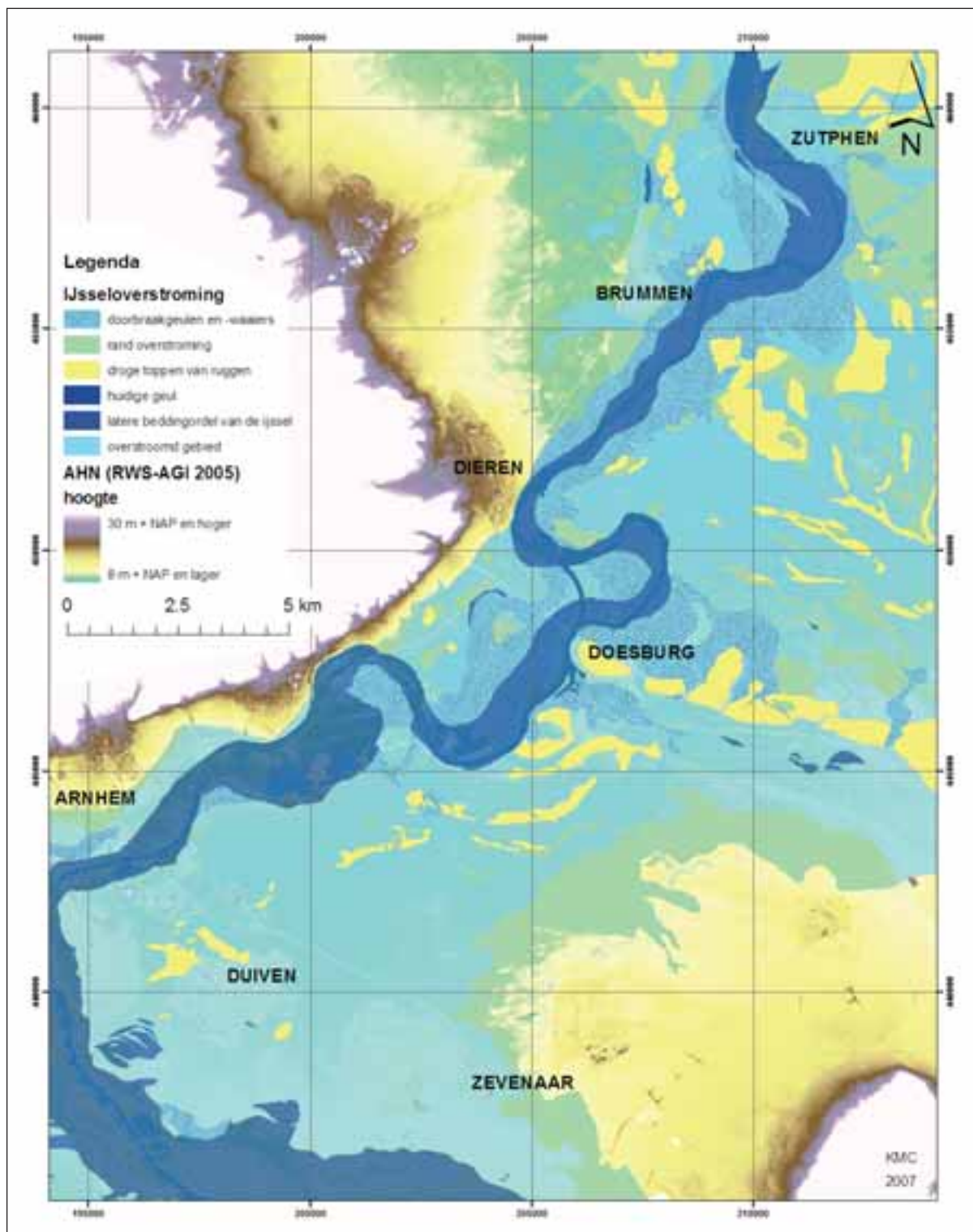
af te schatten. De huidige databases met boringen, gecombineerd met het hoge resolutie Actuele Hoogtebestand Nederland (AHN, RWS-AGI, 2005; Fig. 13) maken het mogelijk de gemiddelde waterdiepte over grote gebieden onderbouwd te schatten (Cohen, in voorb.).

- Uit maaiveldhoogte en waterspiegelhoogte volgt de waterdiepte tijdens de overstroming.
 - o Als over de volle breedte van (een segment van) het overstroomde gebied waterdieptes zijn gereconstrueerd (inclusief verhangen en locaties en dieptes van geulen), kan vervolgens de magnitude van de overstroming worden afgeschat op basis van beddinggeometrie (natte doorsnede, in dwarsprofiel) en waterspiegelverhang (in de lengterichting).
 - o In de berekeningsmethoden voor paleo-afvoeren uit beddinggeometrie en verhang, dient ook de bodemruwheid gespecificeerd te worden (Kleinhans, UU). Dit laatste is in veel toepassingen een probleem, omdat bijvoorbeeld de exacte korrelgrootte van het voormalige beddingmateriaal veelal onbekend is en daaraan gerelateerd ook de optredende bodemvormen (ribbels, duinen). In het geval van de IJsselavulsie en haar doorbraakgeulen en -waaiers door dekzandruggen en duingordels, is dit veel minder een probleem, onder andere omdat de doorbroken strata redelijk homogeen van korrelgrootte zijn en met boringen in de directe omgeving van de doorbraak locatie prima te reconstrueren zijn (Cohen, UU).
 - o In het geval van afvoerreconstructies behorende bij doorbraakgeulen, biedt het volume sediment in de uitspoelingswaaiers een tweede mogelijkheid op de afvoerschatting op basis van de geulgeometrie en een cross-check op de aannames over beddingmateriaal (Kleinhans, UU), en daarmee een belangrijke controle van de afvoerschatting.

De schattingen kunnen worden gecomplementeerd en verder gekwantificeerd met model berekeningen voor individuele crevasses (de diepte van de crevassegeulen volgt uit boorgegevens). In het geval van de IJsselavulsie, is het mogelijk het overstroomde gebied in compartimenten op te splitsen (doorgebroken duingordel nabij Doesburg, doorgebroken dekzandrug nabij Zutphen, doorgebroken dekzandrug nabij Deventer) en de crevasseberekningen voor een aantal transecten stroomafwaarts van elkaar uit te voeren (Kleinhans, UU), en daarmee de consistentie van de reconstructie te controleren.

Benadrukt dient te worden dat er gegeven de bijzondere omstandigheden van de IJssel-overstroming, op meerdere manieren controles op de consistentie van de afvoerschatting mogelijk zijn (doorbraakgeullichaam vs. waaierdimensie; cascade van doorbraaklocaties). Deze controlemogelijkheden maken de afvoerschattingen op paleogeografische basis tot 'echte' onafhankelijke schattingen. De voorgestelde aanpak is daarom te prefereren boven het simpelweg toepassen van empirische verbanden voor recente rivieren op een oude situatie, wat slechts onverifieerbare resultaten zou opleveren.

Zie Appendix 2 voor projectomschrijving, inschatting van tijd en middelen en een flowchart voor de voorgestelde aanpak.



Figuur 10

Reconstructie van de overstroming van een deel van het oostelijke rivierengebied, ten tijde van de IJssel avulsie (Cohen, in voorb.). Gebruikt kaartmateriaal: AHN 25x25 m (RWS-AGI, 2005); Stroomruggen GIS (Berendsen & Stouthamer 2001, herzien); Zanddiepte kaart 'IJsseldal' (Cohen, in voorb; uitbreiding op Berendsen e.a. 2001).

4.1.1 Kanttekeningen / te overwinnen problemen bij Aanpak 1

Er is maar een zeer beperkt aantal 'cases' die voor Aanpak 1 in aanmerking komen. Een principe van sedimentaire preservatie van gebeurtenissen is het volgende: Des te langer een extreme overstroming geleden is, des te meer vergelijkbaar extreme overstromingen er sindsdien in hetzelfde gebied zijn opgetreden. Dit principe maakt dat herkenning van oudere grote overstromingen moeilijker is dan van even grote recente overstromingen. Alleen het geval van een eerste en tot nog toe enige extreme overstroming van een nieuw gebied (volgend uit de bekende paleogeografie) biedt de ideale preservatie-condities die nauwkeurige reconstructie mogelijk maken.

De 'Gelderse IJssel' avulsie is veruit de beste kandidaat, om meerdere redenen:

- omdat het een relatief recente gebeurtenis is (rond 500 n. Chr);
- *én* omdat deze avulsie een nieuw deltagebied innam;
- *én* omdat afzettingen van voor de aanwezigheid van de IJssel, zeker stroomafwaarts van Zutphen, zeer duidelijk van de IJssel afzettingen daar bovenop te onderscheiden zijn;
- *én* omdat het een waterscheidingsdoorbraak betrof, waarbij zich niet alleen crevasse-geulen en crevassewaaiers langs bestaande riviergeulen vormden, maar zich ook crevassegeulen en -waaiers vormden op doorbraaklocaties door dekzandruggen en windduincomplexen. Hierdoor is er de mogelijkheid 'per compartiment' crevasses door te rekenen, op meerdere plekken stroomafwaarts langs de Gelderse IJssel.

De IJsselavulsie wijkt op deze vier aspecten af van avulsies binnen de delta: sediment ontsnapt uit het deltagebied van voor het ontstaan van de IJssel. Buiten het IJsseldal, i.e. in de Betuwe, het Gelderse Poort gebied, de Tielerwaard) zijn reconstructie mogelijkheden aanzienlijk beperkter.

De veronderstelde simultane ouderdom van de aan de IJsselavulsie toegeschreven crevasses volgt uit de gangbare conceptuele modellen (bijvoorbeeld Fig. 2c-e; Smith e.a., 1989; Stouthamer, 2001) voor het ontstaan van een rivierverlegging (lopend onderzoek; K.M. Cohen, E. Stouthamer, W.Z. Hoek, H.J.A. Berendsen, UU). Datering van de individuele crevasses is noodzakelijk ter bevestiging/ontkrachting/verfijning van dit conceptuele model. Reeds lopend onderzoek zal een deel van deze dateringen opleveren (Cohen, in voorb.) maar voor de schatting van paleoafvoeren zal een aanvullende dateringscampagne nodig zijn. Mogelijk volgt hieruit dat de avulsie van de IJssel zich in meerdere stappen voltrok, dat wil zeggen dat de verschijnselen niet één zeer extreme, maar enkele bovengemiddelde tot extreme afvoeren betrof (binnen het tijdvak 2000-1000 jaar BP). Dit zou afvoerberekeningen aan deze casus compliceren.

Voor het specifieke geval van de IJsseloverstroming dient gerealiseerd te worden dat ook buiten het door de IJssel ingenomen gebied, een behoorlijk sedimentair effect verwacht moet worden, dat wil zeggen

dat deze ook in gebieden zoals de Betuwe te herkennen zou moeten zijn. Het is belangrijk de overstroming ook daar te reconstrueren om de afvoerschattiing te kunnen complementeren, omdat slechts een deel van de totale Rijn-afvoer via de IJssel afwaterde. Op strategische locaties in de centrale delta (bijv. destijds verlandende restgeulen, crevassecomplexen tussen Linge en Waal) zal onderzoek gedaan moeten worden waarbij kandidaat-overstromingsniveaus gericht worden gedateerd. Hiervoor kunnen detailobservaties in archeologische studies, bijvoorbeeld die van tijdens de aanleg van de Betuwelijn, overigens een belangrijk startpunt zijn.

Er moet, los van de afvoer door het IJsseldal, met name bepaald worden, wat de Rijn-afvoer was op het moment net voor de IJsseldoorbraak (die de kritieke waterstand veroorzaakte die direct daarna de doorbraak forceerde). Infeite is dit de schattiing van de piekafvoer in de bovendelta (bovenstrooms van de afsplitsing) die voor de beoogde maatgevende-afvoerschattiing gewenst wordt. Het gaat er hierbij om vast te stellen welke afvoer nodig was om die kritieke waterstand te bereiken die blijkens de paleogeografische reconstructie de doorbraak door de rand van delta geforceerd moet hebben. Hierbij speelt de inzet van numerieke modellering een belangrijke rol (zie § 4.3.1). Het vereist ook aanvullende paleogeografische reconstructie buiten het eigenlijke IJsselgebied. Verwacht wordt dat hiervoor gebruik gemaakt kan worden van resultaten uit Aanpak 2 (zie § 4.2 en § 4.4) en resultaten uit lopend onderzoek in dat gebied (gebiedskartering en karakterisering riviersedimentbudgetten voor de laatste 5000 jaar; traject Wesel-Emmerich, Erkens, in voorb.; Overbetuwe: Gouw & Erkens, 2007).

Uit het reconstrueren van de IJssel-overstroming alleen volgt nog niet de bijbehorende herhalingstijd. De vraag 'of het een 1/2000 of een 1/500 afvoer was?' is niet op te lossen door deze overstroming te dateren en de bijbehorende afvoer te bepalen. Daarom is parallel een tweede aanpak nodig (Aanpak 2: frequentie analyse), die inzicht op moet leveren in de frequentie van extreme overstromingen in bijvoorbeeld het bovenstroomse deel van de latere IJsselloop (gebied Arnhem-Duiven-Doesburg). De consistentie van de frequentieanalyse voor die specifieke locatie dient binnen Aanpak 2 gecontroleerd te worden. Dit kan door te toetsen (§ 4.2) of de frequentieanalyse op meerdere locaties overeenkomende resultaten geeft (in de IJsselbovenloop, én in het Niederrheingebied, én in de Overbetuwe, én in de Liemers).

4.1.2 Principe van Aanpak 1 ook toepasbaar in stormvloedstudies?

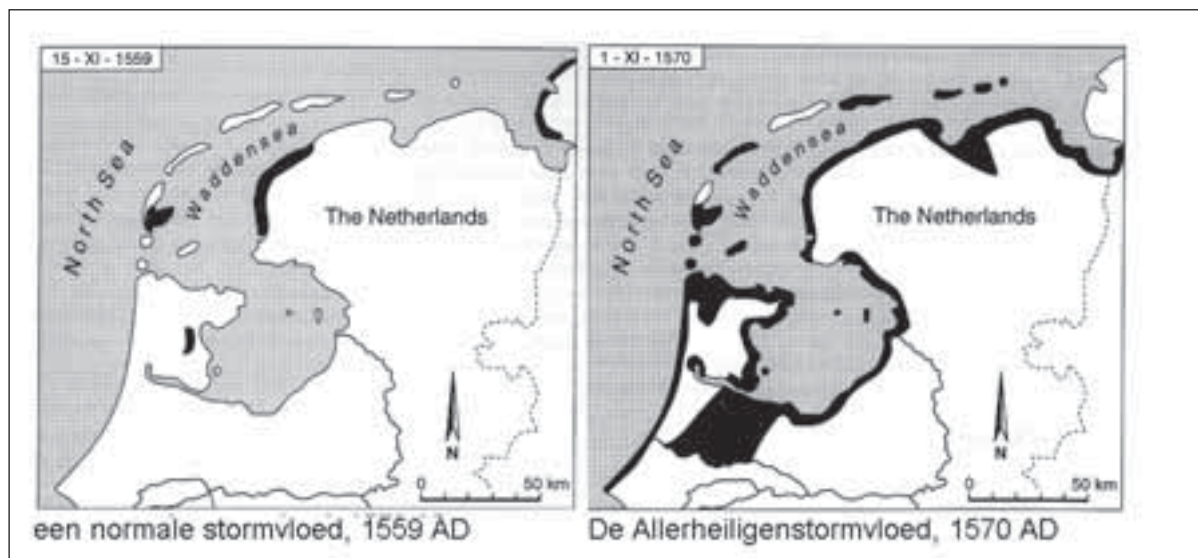
Het hierboven besproken voorbeeld is voor een extreme rivieroverstroming. Het paleogeografische principe dat de 'meest recente - grootste' gebeurtenis van voor de bedijking en moderne meetreeks ook de 'meest wijd verbreid - best gepreserveerde' gebeurtenis zal zijn, gaat ook op voor stormvloeden. Van voor 1000 jaar geleden, is op dit moment geen specifieke extreme stormvloed

aan te wijzen die als ideale case zou kunnen fungeren. Weliswaar zijn bovengemiddeld grote stormvloed in afzettingen herkend (erosievlakken, onderbrekingen in de veengroei, kleilaagjes) in de centrale lagunezone, maar het is onduidelijk welke van deze niveaus bij 'normale' stormvloed horen, en welke zo wijdverbreid zijn dat ze aan een 'extreme' stormvloed zouden zijn toe te schrijven.

Uit het historische tijdvak zijn wel enkele bovenmatig grote stormvloed bekend (overzicht in Appendix 1), zoals de Allerheiligenvloed (1570 n. Chr., Fig. 11). Vanuit preservatie-optiek hebben middeleeuwse stormvloedcases (1500-400 jaar BP) het probleem dat hun afzettingen zeer ondiep liggen en in latere eeuwen sterk door grondwaterverlaging (verdroging, oxidatie) en landbouw (ploegen) grotendeels vernietigd zijn. Op basis van historische gegevens lijkt dit een goede case en lokaal (onder gunstige depositie en preservatie omstandigheden) kunnen sedimentologische, micro-palynologische en dateringstudies wel voor kwantificering van deze stormvloed bruikbare resultaten opleveren - maar regionaal paleogeografisch onderzoek zal op deze casus vermoedelijk maar zeer beperkt nieuw inzicht opleveren.

Figuur 11

Impact van een historische extreme stormvloed (1570 n. Chr) vergeleken met een normale stormvloed (1559 AD), volgens Oost (1995). Reconstructie op basis van historische bronnen (Gottschalk, 1975), en lokaal bevestigd door archeologische studies (Oost, 1995).



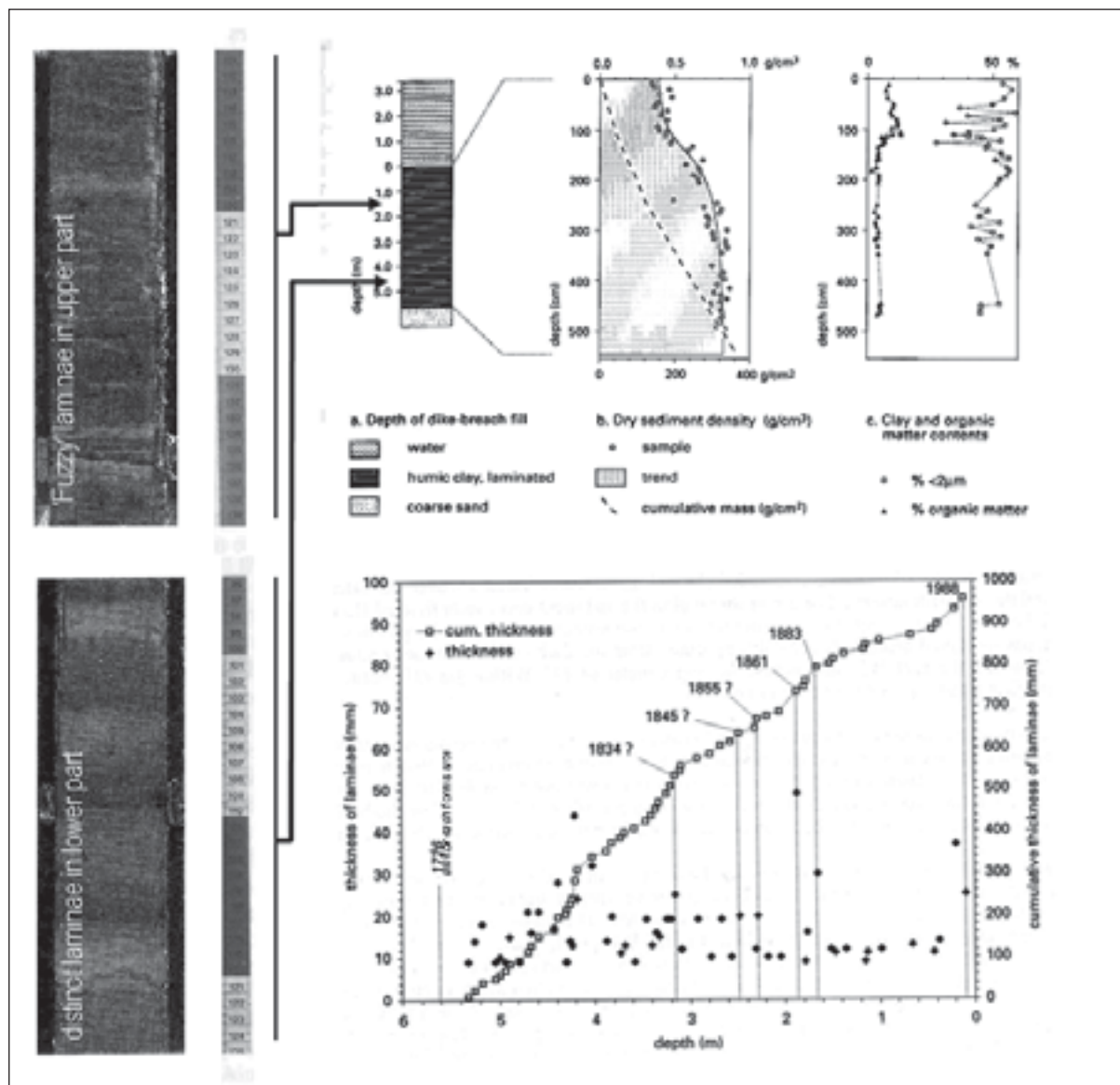
4.2 AANPAK 2 - Deltadekkende inventarisatie geulopvullingen (frequentie analyse)

In de rivierdeltazone (§ 3.2) vormen de opvullingen van restgeulen en afgesneden meanderbochten op enige afstand van actieve rivierlopen sedimentaire archieven waar sedimentatie tijdens bovengemiddeld grote overstromingen afwijkt van perioden daartussen (zoals in Fig. 12; Middelkoop, 1997). De locatie van restgeulen is zeer goed bekend op basis van boringen en gedetailleerde digitale hoogtebestanden (AHN, RWS-AGI, 2005; Fig. 13). Het ontstaan van restgeulen is gekoppeld aan het avulsie proces (stroomgordel verlegging, Fig. 2). Wanneer een nieuwe rivierloop zich pas net gevormd heeft, kan nog aanzienlijke klastische opvulling van de restgeul van de in onbruik

Figuur 12

Voorbeeld van de registratie van overstromingen in restgeulen, hoefijzmeren en dijkdoorbraakgaten, op enige afstand van de actieve rivier (Middelkoop 1997:89-105; zijn Fig. 4.3, 4.6 en 4.11). Het betreft de opvulling van een dijkdoorbraakgat ('wiel') in de uiterwaard bij Wamel dat zich in 1726 AD vormde. In de huidige situatie ontvangt dit wiel pulsen suspensief getransporteerd sediment bij afvoeren vanaf 7900 m³/s bij Lobith.

geraakte rivierloop plaatsvinden. Deze situatie lijkt gemiddeld zo'n 400 jaar te duren (Stouthamer, 2001) en wordt beschouwd als de avulsie-duur. Daarna blijft binnen de verlaten beddinggordel veelal een (meanderende) restgeul over, met min of meer stagnerend water. Nabij de avulsie-locatie raakt de verlaten geul overwegend clastisch opgevuld (proximale facies), maar op grote afstand overheerst organische en fijn klastische opvulling (distale facies). **Incidenteel, d.w.z. tijdens grote overstromingen, bereikt meer en grover klastisch materiaal de distale restgeullocaties. Het doel van Aanpak 2 is deze incidenten te documenteren (tellen, dateren) en uiteindelijk als een samengestelde continue tijdreeks te analyseren.** De samengestelde continue tijdreeks bestaat daarbij uit opeenvolgende en elkaar gedeeltelijk overlappende records uit individuele restgeulopvullingen. Paleogeografische reconstructie is in deze aanpak van belang voor het aanwijzen van restgeullocaties (vooraf aan de analyse) en voor het inschatten van de gevoeligheid van de restgeullocatie voor registratie van danwel 'vrijwel iedere overstroming' danwel 'alleen de meest extreme overstromingen' (tijdens de analyse).

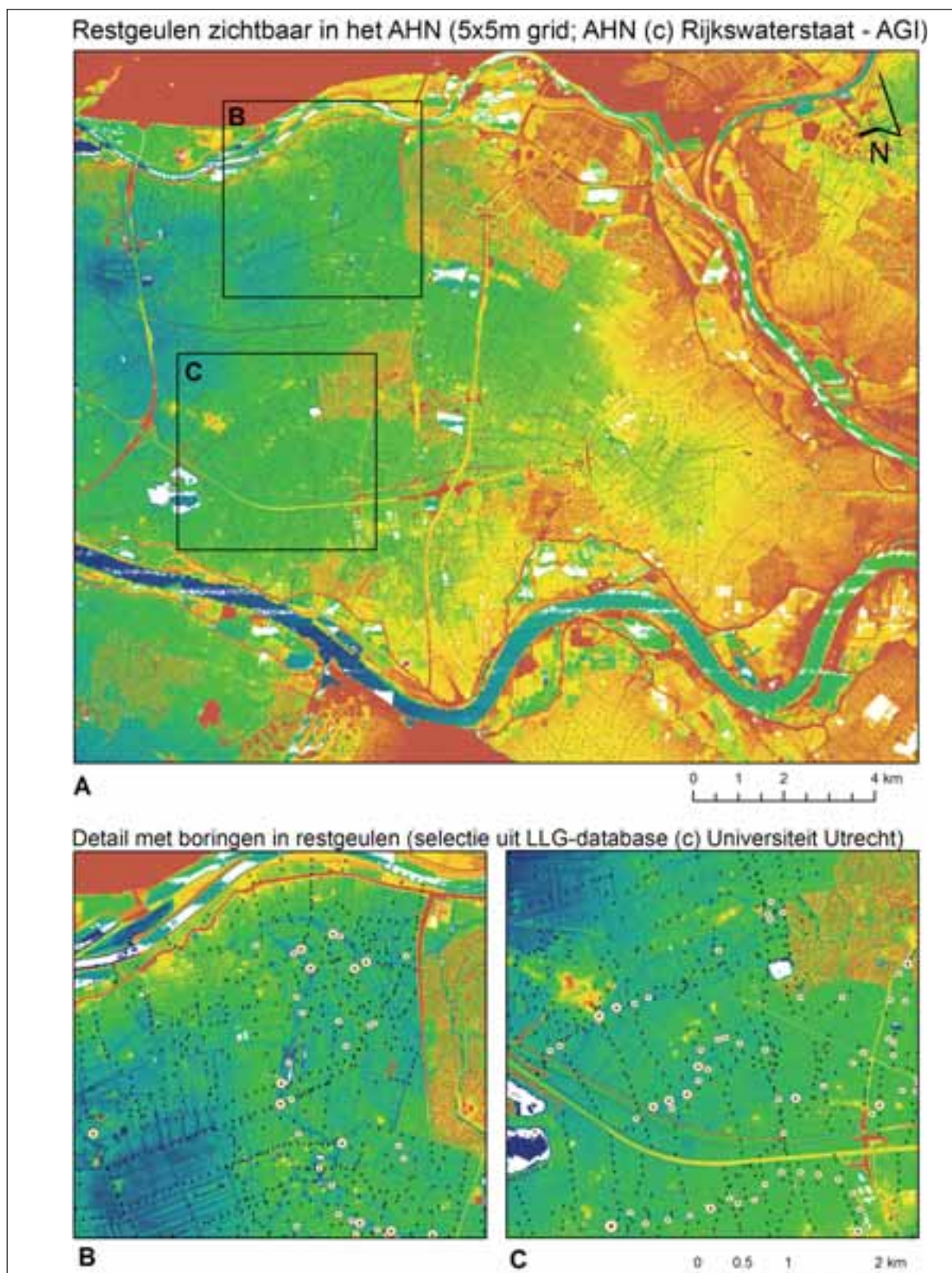


Restgeulen zijn vooral goed ontwikkeld in het benedenstroomse deel van de rivierdeltazone. Stroomopwaarts zijn restgeulfragmenten in de regel relatief kort (Fig. 13). In het Gelderse Poortgebied (Fig. 9: delta-apex, meest bovenstroomse splitsingspunten) en Niederrheingebied (direct bovenstrooms van de delta-apex) komen wel individueel afgesneden meanderbochten voor (hoefijzermere), maar nauwelijks restgeulen van meerdere meanderlengtes lang (althans, niet uit de laatste 5000 jaar). De hoofijzermere hebben veelal over een beperkt deel van hun lengte een vergelijkbare distale opvullingsfacies als de restgeulen uit de delta. Ook dijkdoorbraakgaten (veelal gevormd tussen 1500 en 1900 AD) hebben vergelijkbare opvullingen (Fig. 12). Voor deze drie typen locaties kunnen met dezelfde methodiek de frequenties van paleo-piekafoeren uit boorkernen worden geanalyseerd. 'Aanpak 2' neemt dan ook zowel restgeul- als hoofijzermere locaties in de analyse mee, en gebruikt opvullingen van wielen en de jongste restgeulen (e.g. Rijnstrangen in de Liemers) voor de koppeling met door historische waarnemingen en directe meetvakken bestreken tijdvakken.

Het documenteren van de restgeulopvullingen dient voor dit doel systematisch en in detail te gebeuren. Hiervoor geschikte gegevens zijn niet kant-en-klaar voor handen uit eerdere studies⁸. Bovendien zijn voor detailonderzoeken op restgeulen her en der steeds verschillende technieken en bemonsteringsstrategieën toegepast (voortschrijdende ontwikkelingen, verschillende onderzoeksdoelen). Er zijn moeizame conversieslagen nodig om bestaande gegevens geschikt te maken voor een systematische analyse van overstromingfrequenties.

Aanpak 2 vergt daarom het verzamelen van een aanzienlijke hoeveelheid nieuwe kernen (globale indicatie: ca. 80 kernen van circa 4 m lengte; uit ~20 restgeulen/hoefijzermere) en gestandaardiseerde beschrijving en analyse daarvan in het laboratorium (in een voldoende geoutilleerd laboratorium, met gegarandeerde verwerkingscapaciteit). Een aanzienlijk deel van de onderzoekstijd zal verstrijken met deze analyses. Daar staat tegenover dat voornamelijk de continue technieken routinematig uitgevoerd kunnen worden (mits er voldoende budget is).

- Visuele beschrijving, sedimentologie (bepalen restgeulopvullingsdeel van de kern)
- Continue bemonstering voor *Loss On Ignition* (organische stof gehalte)
- Continue bemonstering voor Laserkorrelgrootte (detail verdeling klei/silt/zand)
- Continue *core-scan* (fotografisch, Röntgenstraling, magnetisch)
- Puntbemonstering voor plantenresten (macroresten: ouderdomsbepaling ¹⁴C)
- Puntbemonstering pollen analyse (ouderdomsbepaling, milieubepaling).
- Incidentele monsternamen (bv. ²¹⁰Pb voor datering recent deel, mollusken)



Figuur 13

Gedetailleerd hoogtebeeld van een deel van de bovendelta (Overbetuwe; Nijmegen, Arnhem; Waal, Nederrijn) met daarin o.a. restgeul topografie: over meerdere km's vervolgbare geulvormige laagtes (AHN, RWS-AGI, 2005). Figuren b en c tonen de boordichtheid die aan de paleogeografische kennis van dit gebied (bijv. Berendsen & Stouthamer, 2001) ten grondslag liggen. Boringen met restgeulopvullingen (Berendsen, 2007) zijn apart aangegeven en volgen het subtiele geulrelief.

De resolutie van continue monsternamen dient voldoende fijn te zijn, om influxen die aan overstromingsgebeurtenissen gerelateerd zijn als zodanig te herkennen. In restgeulopvullingen zijn vaak een aantal influxen visueel te herkennen (vermoedelijk zijn dit de grotere overstromingen). **Gedacht wordt aan 0.5 tot 1.0 cm resolutie in de continue sampling – waardoor de kleinere influxen wegmiddelen tot een achtergrondsignaal, waarop alleen grotere influxen zich als afwijkende ‘pieken’ tonen. Dergelijke aantallen te verwerken kernen en de aantallen monsters daaruit maken deze aanpak tot een logistiek zeer groot project en vereist een gedegen voorbereiding (lab-faciliteiten en -ondersteuning vroegtijdig waarborgen, vooraankondigen).** In een zeer beperkt aantal kernen (2 à 3) kan getracht worden een nog hogere resolutie te halen, om het spectrum aan influx-magnitudes te beschrijven en een relatie voor registratie van overstromingen *in één restgeul* vast te stellen.

Los van de continue bemonstering voor de frequentie analyse van influxen, zijn dateringen van de opvullingen nodig. De huidige beschikbare dateringen hebben zich voornamelijk gericht op het dateren van het begin van restgeulopvulling (gebruikt om het avulsie moment te dateren) en het einde van de restgeulopvulling (restgeul volledig opgevuld, dan wel door een crevassegeul heringenomen; niet langer een afwijkend sedimentatiemilieu ten opzichte van de directe omgeving). Om de frequentieverdeling in de tijd te plaatsen zijn niet alleen aan top en basis, maar ook binnen het opvullingstraject dateringen nodig.

- Voor de hoeveelheid dateringen (dichtheid van puntbemonstering) speelt een rol dat de resolutie die met series ^{14}C dateringen behaald kan worden maximaal 50 jaar is (bij meerdere AMS-dateringen op de kern geselecteerd oeverplanten-macrorestmateriaal).
- Overdadig dateren (op zeer korte afstand) en technieken om de resolutie op te schroeven door gebruik te maken van de ^{14}C calibratiecurve (*wiggle matching*) zullen in rivierafzettingen in de regel niet veel toevoegen, onder andere omdat sedimentatiesnelheden niet constant kunnen worden verondersteld en omdat dateerbaar materiaal discontinue in de opvulling voorkomen.
- Een beperkt aantal ^{14}C dateringen voldoet (bijvoorbeeld 5 à 10 in een overwegend organisch restgeulopvullingstraject van 3 à 4 m dik). Uit interpolatie volgt dan een ouderdoms-diepte relatie voor de sedimentkern en de laagjes overstromingsafzettingen daarin. Bij deze interpolatie kunnen sedimenteigenschappen als indicatie voor de sedimentatiesnelheid gebruikt worden, en kan ook op alternatieve wijze gewonnen ouderdomsinformatie (bijv. pollenanalyse) betrokken worden.
- In het onderzochte tijdsbereik levert de introductie van cultuurgewassen (granen, maïs) aanvullende tijdscontrole (toepassing van bestaande biostratigrafische schema's; bijvoorbeeld: Middelkoop, 1997). Gedetailleerde pollenanalyse kan in gunstige omstandigheden een aanvullende mogelijkheid bieden om clastische influxen en achtergrond signaal van elkaar te onderscheiden (*cross check*), op basis van verschillen in assemblages ('lokaal ingevangen' versus 'van veraf ingespoeld')

en verschillen in pollendichtheid (aantal pollenkorrels per cm³, gekoppeld aan sedimentatiesnelheid).

De reden van het deltadekkend, systematisch analyseren van restgeulopvullingen die ontstaan zijn in de laatste 5000 jaar, is dat dit kwantitatieve integratie van de resultaten toestaat. **Een belangrijk onderdeel van Aanpak 2 is dan ook het in detail formuleren en uitvoeren van een multivariate classificatie procedure op de series individueel geregistreerde grotere overstromingen uit de set restgeulopvullingen.** Als input voor de classificatie dienen onder andere korrelgrootte eigenschappen (aandelen grovere en fijnere fracties), ouderdom (inclusief nauwkeurigheidsmarge) en locatie parameters (afstand tot de rivier, grootte van de meest nabije riviertak - beiden variërend in de tijd).

- Het doel is 3 tot 6 klassen van oplopende overstromingsgrootte te onderscheiden, waarbij de klassengrenzen zijn afgeleid van effectieve stromingscondities die tussen boorlocatie en geul moeten hebben geheerst (uitgaande van de valsnelheden bij diverse korrelgrootteklassen).
- De afname van het aandeel overstromingen van oplopende grootte klasse levert een kansverdeling op van herhalingstijd per magnitude klasse voor de periode dat de registratie als volledig te beschouwen is.
- Om de locatieparameters reproduceerbaar te berekenen, dient een GIS-bestand te worden aangelegd, uitgaande van bestaande GIS bestanden (zie ook 4.2.1).

Als onderdeel van het opstellen van de multivariate classificatie procedure, moeten cross-checks worden ingebouwd, bijvoorbeeld door de procedure op een willekeurig gedeelte van de dataset uit te voeren en de variatie in het eindresultaat te documenteren (gevoeligheidsanalyse). Ook dient een optimalisatie stap te worden ingebouwd. Het uitgangspunt hiervoor is dat de overstromingen van de meest extreme klasse (zoals waargenomen in restgeulen, op de grootste afstand van actieve geulen), als product van een en dezelfde extreme overstroming kunnen worden beschouwd (mits ze binnen de dateringonzekerheid redelijkerwijs als synchroon te beschouwen zijn). Als deze meest extreme overstromingen op alle locaties als synchroon worden beschouwd, kan vervolgens bekeken worden welke percentage overstromingen uit de minder extreme klassen ook deltawijd geregistreerd lijken, en vanaf welke klasse overstromingen niet meer als deltawijd en daarom niet meer geschikt voor het afleiden van representatieve kansverdelingen ten behoeve van de maatgevende afvoer zullen zijn. Zie Appendix 2 voor projectomschrijving, inschatting van tijd en middelen en een flowchart voor de voorgestelde aanpak.

4.2.1 Kanttekeningen / te overwinnen problemen bij Aanpak 2

Uiteindelijk dient begrepen te worden op welke manier signalen in restgeulopvullingen gerelateerd zijn aan de grootte (waterstandhoogte, duur, debiet) van de afvoerpiek in de overstromende riviergeul.

De afstand van de restgeulopvullingen t.o.v. de overstromende geul zal een belangrijke weegfactor zijn bij het integreren van lokale signalen op veel punten naar één samenvattend signaal. Om dit te kunnen onderbouwen, is een bemonsteringstrategie nodig, waarbij restgeulen op meerdere locaties op toenemende afstand van gelijktijdig actieve rivierlopen geanalyseerd worden. De consistentie van het signaal binnen een restgeul wordt daarmee bepaald. Door dit voor meerdere restgeulopvullingen te combineren kan ook de reproduceerbaarheid van dergelijk type afvoerreconstructies gecontroleerd worden.

Om resultaten van 'Aanpak 2' direct te kunnen koppelen aan bestaande tijdseries en niet alleen frequenties te kwantificeren maar ook de magnitudes van de overstromingen kwantitatief te koppelen, **is het gewenst dat de tijdspanne (Fig. 3) die met restgeul- en hoefijzermeer-locaties afgedekt wordt overlapt met het moderne tijdvak (laatste 150 jaar) of in ieder geval met het historische tijdvak (laatste 1000-150 jaar) en aansluit op case-studies zoals in 'Aanpak 1' (ca. 1500 jaar geleden). Voor de periode daarvoor, zal de koppeling naar absolute magnitudes hoe dan ook op extrapolatie van relaties in het jongere bereik gebaseerd zijn.** Er zijn binnen het beoogde onderzoeksgebied locaties waar dat mogelijk is:

- In de delta is dat voor wat betreft het historische tijdvak beperkt mogelijk door de sites uit te breiden met de opvullingen in wielen (dijkdoorbraakgaten) – zie Middelkoop, 1997; Fig. 12 – maar met de aanleg van dijken en afdamming van de kleinere riviertakken (Linge, Kromme Rijn) verloren veel restgeulen hun overstroming registrerende eigenschappen en bovendien zijn door polderpeilverlagingen en landbouw ondiepe records uit de periode 1300-2000 AD goeddeels vernietigd.
- In het Niederrheingebied zijn de omstandigheden gunstiger, enerzijds vanwege het bestaan van grote hoefijzermere door meanderafsnijdingen in de laatste ~4000 jaar in het gebied bovenstrooms van de delta-apex, en anderzijds doordat deze veelal buiten het door kades en dijken verdedigde gebied lagen (tot zo'n 200 jaar geleden – Klostermann, 1990; Erkens, in voorb.).
- In het geval van de IJsselavulsie (Aanpak 1), zijn er stroomopwaarts van Brummen beekdallocaties waar al voor het ontstaan van de IJssel influxen van Rijnklei worden aangetroffen (Teunissen, 1990; Berendsen & Stouthamer, 2001; lopend onderzoek K.M. Cohen, W.Z. Hoek UU, F. Bunnik TNO-B&O). Dit zijn 'slack water' afzettingen: sedimentatie vanuit de hoofdrivier in de uiterste benedenloop van een zijriviertje (a.h.w. tegen de stroomrichting van zijrivier of beekdal in). In de bovendelta zijn zulke afzettingen vergelijkbaar met restgeulopvullingen.
- Opvullingen van crevassegeulen die aan het ontstaan van de Gelderse IJssel worden toegeschreven, bevatten mogelijk een record van overstromingen uit de periode 500-1500 AD. Inventarisatie van dit archief is van belang voor koppeling aan reconstructies op basis van historische gegevens (bv. stadsarchieven van Hanzesteden als Zutphen en Deventer) – zie ook § 4.3.2.
- De consistentie van de frequentieanalyse voor de IJsseldal-

doorbraaklocatie dient binnen Aanpak 2 gecontroleerd te worden. Dit kan door te toetsen of de frequentie analyse op meerdere locaties overeenkomende resultaten geeft (én voor de IJssel-bovenloop, en in het Niederrheingebied, én in de Overbetuwe, én in de Liemers).

Gedurende de periode waarin een restgeulopvulling accumuleert kunnen de lokale omstandigheden veranderen, wat het beschrijven/herkennen van hoe vaak en bij welke waterstand/afvoer overstromingen clastische influxen optreden compliceert. Dit kan bijvoorbeeld doordat in de nabije omgeving nieuwe avulsies plaats vinden (plotselinge verandering in ligging en afvoerverdelingen van geulen), maar kan ook zonder dat nieuwe geulen zich vormen (geleidelijke 'autocyclische' verschuivingen in de afvoerverdeling over geulen ten gevolge van splitsingspuntendynamiek – lopend onderzoek E. Stouthamer, M.G. Kleinhans UU). Een belangrijk voordeel van het selecteren van hoefijzermereen nabij de delta-apex, is dat de afvoer er nog onverdeeld is en dat bovengenoemde problematiek van natuurlijke verschuivingen in de percentages afvoer over meerdere riviertakken gedeeltelijk ontweken wordt (maar ook in dit gebied kan de gevoeligheid voor afvoer influxen in de loop der tijd variëren).

Wanneer de omgevingsdynamiek in de reconstructie van een overstromingssignaal voor een locatie onjuist wordt verdisconteerd, kan dit tot verkeerde interpretaties van de relatieve grootte van opeenvolgende overstromingen leiden. Alleen kijken naar de record in de boorkern is dus niet genoeg – de positie van de kern ten opzichte van de dynamisch veranderende omgeving moet in de analyse meegenomen worden.

- Ter specificatie van de locatieparameters dient een GIS-bestand te worden aangelegd. Kennis van de paleogeografie in de bovendelta is reeds beschikbaar (bv. Berendsen & Stouthamer, 2001 – Fig. 9).
- Bovendien kan recent verworven inzicht in de relatie tussen uiteindelijke geometrie van stroomgordels, de bestaansduur van de geulen en de morfologie bepalende effectieve piekafvoeren hierbij een toepassing vinden (Cohen, 2004, 2006; lopend onderzoek M.J.P. Gouw, UU). *Regelmatig terugkerende 'gemiddelde' piekafvoeren* die de stroomgordel grootte (beddinggeometrie) mede bepalen worden op deze manier meegewogen in de analyse van signalen van *extreme* afvoerpieken *buiten* die stroomgordels. Onderzoek naar extreme afvoeren kan niet als onafhankelijk gezien worden van onderzoek naar gemiddelde afvoerverdelingen over riviertakken (zie ook § 3.1).

Het systematisch identificeren van bovenmodale events en het beschouwen van hun frequenties is tot op heden een onbewandelde weg in paleogeografische studies. Mogelijk kunnen resultaten van Aanpak 2 gebruikt worden eerdere conclusies te bevestigen, mogelijk juist om ze te nuanceren. De nieuw te verwerven resultaten moeten als complementair aan het bestaande inzicht gezien worden. In de verwerking van de ruwe resultaten tot overstromingsfrequenties moet **een kritische analyse plaatsvinden of vermeende periodieke trends**

ook volgen uit de resultaten van Aanpak 2. Aanpak 2 biedt in dat geval een onafhankelijke controle mogelijkheid voor in eerdere studies geclaimde trends in afvoervariaties. Ontbreken duidelijke aanwijzingen voor variaties, maar kunnen ze niet uitgesloten worden - dan zal in een gevoeligheidsanalyse het effect van in eerdere studies veronderstelde variaties moeten worden meegenomen, en levert dit een bijdrage aan de fout rondom de gereconstrueerde overstromingsintensiteiten.

4.2.2 Principe van Aanpak 2 ook bruikbaar voor stormvloedstudie?

‘Aanpak 2’ is geschikt voor het rivierengebied omdat overstromingen in dit gebied een eenduidige bron hebben, namelijk de rivierbovenloop. Het bestaan van restgeulen is specifiek gerelateerd aan het avulsiegedrag van riviertakken in delta's. Het ontstaan en verlaten van geulen in het getijdegebied is gerelateerd aan heel andere processen dan in het rivierengebied (zie § 3.4). Hierdoor komen situaties van zich langjarig, geleidelijk opvullende restgeulen waarschijnlijk nauwelijks voor: dichtslibben o.i.v. getij gaat zeer snel en beperkt dus de tijdsperiode die gedekt wordt door een geulopvulling.

Voor een systematisch dekkende aanpak ter reconstructie van de frequenties van stormvloeden zal een ander type locatie dan geulopvulling moeten worden aangewezen.

Een ander verschil tussen rivier- en getijde overstromingsgebied ligt in de bron van de respectievelijke overstromingen. Bij middelgrote rivieroverstromingen bleef sedimentatie beperkt tot een deel van de delta (afhankelijk van paleogeografische condities en toevalligheden zoals ‘brak de linker of de rechter oeverwal door’.). Alleen ‘écht’ extreme rivieroverstromingen hebben aantoonbaar overal in de delta invloed – maar toch is zowel bij grotere als kleinere rivieroverstromingen wel steeds duidelijk waar de ‘bron’ van de overstroming lag. **De apex van de delta is een puntbron voor rivieroverstromingen. Voor stormvloeden is er geen constante puntbron. Dit bemoeilijkt vooral het koppelen van frequenties van stormvloeden aan magnitudes van zeespiegelopzet door wind en getij.**

- Windvelden die aan de kust voor stormopzet zorgen, zorgen dan weer ergens in Zeeland, dan weer ergens langs de Hollandse kust, dan weer langs de waddenkust voor de hoogste opzet.
- Hierdoor is het voor op een willekeurig punt aangetroffen series stormvloedlaagjes niet mogelijk op basis van geografische positie en relatieve dikte ten opzichte van stormvloedlaagjes er boven en er onder, uit te maken of een laagje ‘een kleinere, modale, stormvloed met het zwaartepunt dichtbij’ of ‘een grotere, extreme, stormvloed verder weg’ betreft.
- Het oppervlak waarover individuele laagjes vervolgbaar zijn (met dateringen om de kartering enigszins te verifiëren) is wel een manier om de grootte van stormvloeden te bepalen – maar dat is een ander type aanpak dan Aanpak 2 voor het rivierengebied: je zou langs de hele Nederlandse kust (en aangrenzend België en NW Duitsland) afzettingslaagjes op zeer veel locaties moeten bekijken

– dat is ondanks voortschrijdende ontwikkelingen in database- en halfautomatische laboratoriumtechnologieën – het eerste decennium nog niet haalbaar.

Mogelijk kunnen kansverdelingen voor het optreden van stormen, op basis van meetreeksen of met weersvoorspellingmodellen, met de frequenties van stormvloedregistratie langs een Z-N transect door de centrale lagunezone gekoppeld worden. Dit vereist dan wel het aanwijzen van een alternatief type stormvloedregistrerende locaties, welke op meerdere plaatsen uitgevoerd kan worden.

Een mogelijk bruikbaar sedimentair stormvloedproduct zijn 'klapkleien': stormafzettingen die ontstaan in veengebieden waar tijdens stormopzet veenlagen (van kweldervegetatie) tijdelijk gaan drijven en jonger waddensediment (met dateerbare juveniele schelpen) tot onder de tijdelijk drijvende veenmat kan sedimenteren. Dit principe is tot nu toe vooral toegepast in NW Duitsland (Behre & Kucan 1999, Behre, 2003). Aanvullend onderzoek is nodig in Nederland (bv. in NO Zeeland, in de Alblasserwaard) voordat uitspraken gedaan kunnen worden over de dekking die voor het NL kustgebied met deze methode bereikt kan worden. In dit vooronderzoek is de methode vooralsnog niet nader uitgewerkt.

Een andere mogelijkheid zijn regionale studies naar de opbouw van distale komopvullingen in gebieden waar zowel rivier- als stormvloedoverstromingen optraden. Hiervoor komen bijvoorbeeld in

- aanmerking:
- Gebied Land van Heusden & Altena / Eiland van Dordrecht. De aanwezigheid van een dik 'St. Elisabethsvloedsdek' van de stormvloed die in 1421 AD plaatsvond heeft conserverend gewerkt voor de afzettingen uit het tijdvak 3000-500 BP (relatief beschermd tegen oxidatie door polderpeil verlagingen). In dit gebied is veel lopend historisch/archeologisch onderzoek gedaan vooral naar de St. Elisabethsvloed (o.a. TNO B&O). Hierbij is het duidelijk geworden dat, naast rivieroverstromingen, ook eerdere (kleinere) stormvloeden dit gebied hebben getroffen.
 - Gebied Utrechtse Vecht. Vanwege de ligging van de Vecht ten opzichte van het Almere/de Zuiderzee en het IJ zijn in dit gebied zowel rivieroverstroming als stormvloed overstromingen uit afzettingen bekend (en uit historische gegevens, App. 1). Lopend paleogeografisch en sedimentologisch onderzoek (promovendus I. Bos, UU, TNO-B&O) richt zich op het onderscheiden van deze typen afzettingen en op de interactie van rivier en lagunedynamiek.

In de toekomst bieden bovengenoemde onderzoeken mogelijk nieuwe invalshoeken voor systematisch onderzoek (Aanpak 2) of een overstromingsstudie (Aanpak 1). Maar op dit moment is het inzetten op dit onderzoek met het doel stormvloeden te kwantificeren risicovol en aanmerkelijk minder kansrijk dan de reconstructies van rivieroverstromingen.

4.3 Complementaire methodieken naast Aanpak 1 en 2

Er zijn naast paleogeografische reconstructie, complementaire methodieken om de reconstructies te vertalen naar frequentie-magnitude relaties van overstromingen om kansen op extreme overstromingen beter in te schatten. Deze paragraaf bespreekt de methoden die nodig zijn om de veldgegevens en daaruit afgeleide kaarten, profielen (etc.) uit Aanpak 1 en 2 te vertalen naar grootte van afvoer en bijbehorende herhalingstijden.

4.3.1 Numeriek modelleren van overstromingen volgens paleo-scenarios

Ter kwantificering van rivieroverstromingen, zijn berekeningen met numerieke modellen nodig om waterstanden- en waterdieptes (h), geulgroottes en verhangen van paleo-overstromingen (gegevens die uit de paleogeografische reconstructie kunnen worden afgeleid) te vertalen naar paleo-afvoeren (Q; niet direct af te leiden). Vanwege natuurlijke en door de mens veroorzaakte landschapsveranderingen (aanleg van dijken, maar ook opslibbing binnen uiterwaarden etc.) is de Q-h-relatie voor de paleo-overstromingen een andere dan voor vergelijkbare extreme afvoer in de tegenwoordige situatie zou gelden. Ook de natuurlijke Q-h relatie ('van voor de bedijking') moet niet als constant verondersteld worden, zeker niet als hierbij de afvoer (Q) op de delta-apex beschouwd wordt. Zo kan verondersteld worden dat voor het ontstaan van de Gelderse IJssel (rond 1500 jaar BP) de Q-h relatie voor overstromingen in het centrale rivierengebied (Nederbetuwe) tot hogere waterstanden leidde, dan na het ontstaan van de Gelderse IJssel. Het wegvallen van een deel van het debiet door de Nederbetuwe leidde op natuurlijke wijze tot topvervlakking van afvoerpieken. Verder kan beredeneerd worden dat met het in de breedte uitbreiden van het delta gebied door aggradatie in gebieden als Overbetuwe, Liemers, Gelderse Poort en Nederrijn, het verschil in waterstand tussen modale en extreme afvoeren steeds geringer wordt.

Er dient een afweging gemaakt te worden, met welke modellen berekeningen uitgevoerd dienen worden, voor Aanpak 1 en voor Aanpak 2. Bijvoorbeeld: moet het een simpel of een geavanceerd model zijn? Een combinatie van modellen? Gebruik maken van '*Nested modelling*' (d.w.z. een eenvoudiger model draaien voor een groter gebied, en daarbinnen simultaan een gedetailleerder model gebruiken voor een deelgebied/deelaspecten)? Parallele toepassing van meerdere typen modellen?

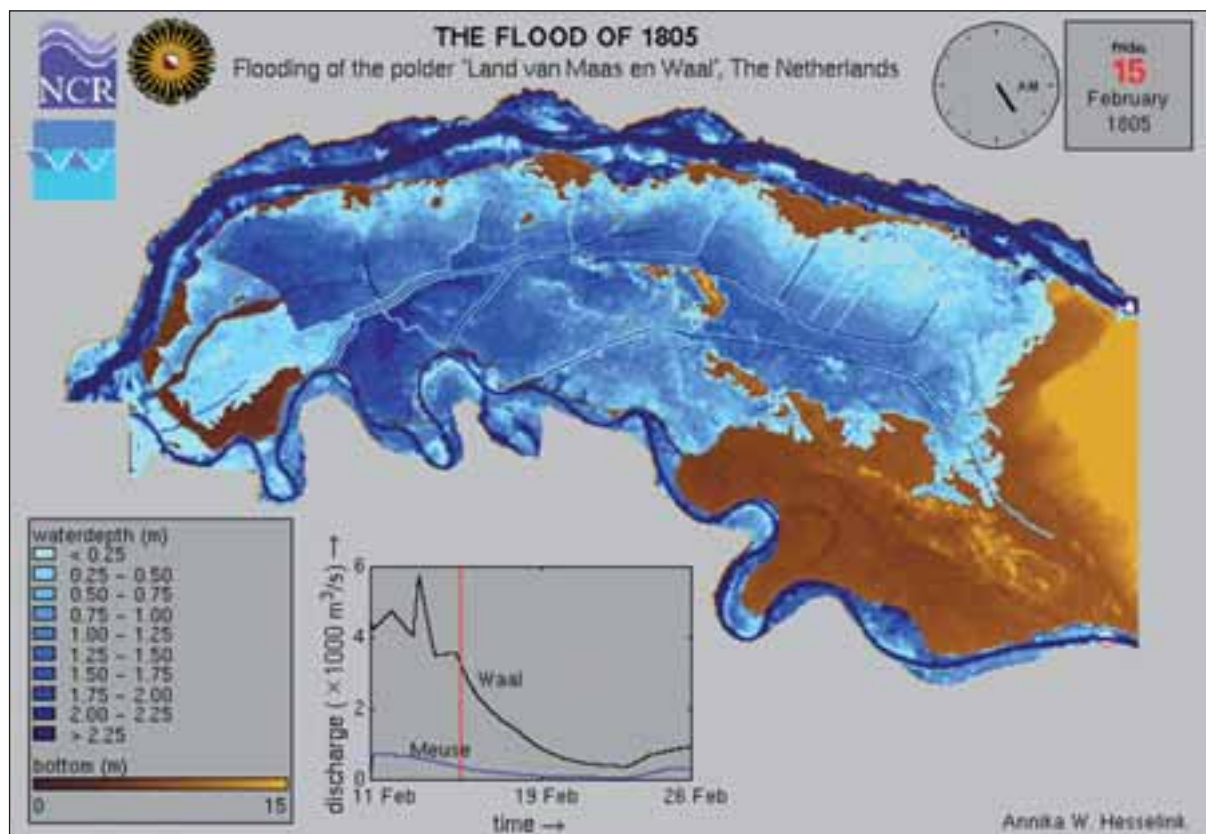
Aanpak 1 beoogt primair een zo nauwkeurig mogelijke reconstructie van één paleo-overstroming (zowel het opkomen van de waterstand die tot de doorbraak leidde, als het doorbreken direct daaropvolgend). De modelberekeningen dienen te zijn toegespitst op deze specifieke case, en dit vergt de toepassing van een geavanceerd model dat overstromingen in detail kan simuleren. Dergelijke modellen

zijn ontwikkeld. Vooral het FLS model (WL-Delft; het model is tegenwoordig bekend als 'SOBEK 1D-2D' en 'SOBEK rural') is geschikt omdat het specifiek ontwikkeld is voor niet-uniforme stromingscondities bij zeer geringe waterdieptes aan het begin van de overstroming. Meer generieke modellen functioneren onder die omstandigheden minder goed. Het FLS-model is succesvol toegepast (geverifieerd) op moderne en historische overstromingen in de Rijn-Maas delta (Hesselink, 2002; Alkema, 2003).

Een voorbeeld van een FLS modelleringsexercitie voor een gereconstrueerde case is de studie van de historische dijkdoorbraak in het Land van Maas en Waal (Fig. 14; Hesselink, 2002). Die studie had als doel de kwaliteit van dit model te testen, voor een geval waar zowel afvoeren/waterstanden (historische Q-h relatie) als het voltrekken van de dijkdoorbraak (historische documenten) als de sedimentaire producten daarvan (kartering) beschikbaar waren. De formuleringen in het model (hydrodynamica) functioneert naar tevredenheid. In de beoogde toepassing in Aanpak 1, ontbreekt de Q-h relatie. Doel van de modellering is de voorspelde Q-h relatie te extraheren, die volgt uit de modelformulering en de gereconstrueerde waterstanden van de paleo-overstroming.

Figuur 14

Numerieke overstromingsmodellering met het FLS model, toegepast op een historische overstroming die plaats vond in 1805 in het Land van Maas en Waal (Hesselink, 2002)



Crevasse-dimensies (van crevassegeul en van crevassewaaier) kunnen daarbij gebruikt worden als extra controlemogelijkheid van de door FLS voorspelde afvoeren door gereconstrueerde doorbraakpunten. Paleoafvoerschattingen op basis van sedimentaire gegevens leveren

een bandbreedte op waarbinnen de vormende afvoer redelijkerwijs verondersteld mag worden (op basis van empirische relaties in moderne analogen; lopend onderzoek M.G. Kleinhans, K.M. Cohen, UU). Het specifieke geval van de IJsselavulsie met doorbraken van waterscheidingen in het dekzandgebied (in plaats van doorbraken van oeverwallen zoals bij avulsies binnen de delta; Stouthamer, 2001) is gunstig voor het doen van dergelijke afvoerschattingen, o.a. vanwege de uniformiteit in korrelgrootte van de doorbrekende ruggen (eenvoudig vast te stellen uit de profielopbouw direct naast de doorbraakgeulen en de doorbraakwaaiers direct stroomafwaarts).

De gewenste uitkomst van de modellering van de IJsselavulsie, is een hydrodynamisch onderbouwde kwantitatieve schatting van het passerende debiet. Bijvoorbeeld (NB: arbitraire voorbeeldgetallen, naar § 2): 'tenminste 11,000 m³/s op de delta apex, waarschijnlijk 13,000 +/-1000 m³/s, en als de reconstructie en afvoerverdeling zo (on)gunstig mogelijk gecombineerd worden, mogelijk zelfs wel 15,000 m³/s'. Tussen 'tenminste' en 'zelfs wel' moet een zo klein mogelijk verschil zitten, en de onzekerheidsmarge mag tot ca. 10% van het geschatte debiet oplopen, wil zij tot een verbeterde voorspelling van de maatgevende afvoer kunnen leiden (§ 2.2).

Aanpak 2 vereist de inzet van numerieke modellen van een meer generiek karakter en op deltaschaal, waarvoor sterker geïdealiseerde modellen voldoen dan benodigd in Aanpak 1. Het gaat hierbij vooral om de modellering van de verdeling van afvoer over de diverse deltatakken. De inzet betreft in detail:

- Het theoretisch doorrekenen van het effect op de Q-h relatie, in respons op geleidelijke paleogeografische veranderingen is mogelijk door bestaande verdelingsmodellen van afvoer over splitsende Rijntakken door te rekenen voor paleosituaties (voor enkele geselecteerde tijdstappen). Het uitvoeren van dergelijke berekeningen is van belang voor de optimalisatie van de classificatie procedure van overstromingspiekjes in Aanpak 2. Dit kan in principe met het SOBEK-1D model, mits daarin een per tijdsperiode veranderende paleo-configuratie opgelegd wordt.
- Voor Aanpak 1 is het modelleren van waterstanden in de onbedijkte rivierdelta bij toenemende waterstand ook van belang. De inzet van de FLS-modellering op het IJsselgebied, vereist een benadering van de waterstand bij toenemende afvoer in de bovendelta die modellen als SOBEK-1D kunnen leveren. Een voorbeeld van een dergelijke toepassing voor de huidige situatie is Vis, Klijn & van Buuren (2001). Dit betrof FLS (-SOBEK) modellering voor polderoverstromingen in het huidige rivierengebied, als gevolg van hypothetische doorbraaklocaties bij extreme piekafvoeren en gevoed door waterstanden in de uiterwaarden uit een SOBEK-1D model.
- In het ideale geval (haalbaarheidstermijn: bij voltooiing Aanpak 2 en reeds lopend onderzoek) zou deze vorm van modellering moeten leiden tot een paleoafvoer-verdelingsmodel voor de laatste 5000 jaar. Het kalibreren en valideren van een dergelijk model dient niet alleen plaats te vinden op basis van uitkomsten van Aanpak 2 en

onderzoek naar de avulsie historie (Stouthamer, 2001), maar ook door inzichten in splitsingspunt-stabiliteit (lopend onderzoek, M. Kleinhans, UU) en de temporele ontwikkeling van de breedte-diepte verhouding van beddinggordels te betrekken (lopend onderzoek; M. Gouw, K.M Cohen, UU).

Inzet van modellering met een meer generiek karakter is ook van belang voor de case studie binnen Aanpak 1. Niet alleen de afvoer door het IJsseldal dient numeriek afgeschat te worden (Q_{IJSSSEL}), maar aanvullend zal moeten worden bepaald hoe groot het andere deel van de afvoer was, dat gelijktijdig via de Betuwe afwaterde, en/of hoe groot de totale afvoer was in het Niederrhein gebied. Pas dan kan bij Q_{IJSSSEL} , Q_{APEX} worden afgeschat.

Wat betreft de inzet van numerieke modellering naast het paleogeografische onderzoek, zijn de conclusies:

1. Bestaande modellen voldoen. Er hoeft geen nieuw model ontwikkeld te worden. Reeds bestaande modellen hoeven slechts gevoed en gerund te worden.
2. Het werk gaat zitten in
 - a. Het omzetten van kaarten/profielen/veldwaarnemingen naar modelinvoer en randvoorwaarden.
 - b. Het bijstellen van de opgelegde afvoer in de modelrun, tot zich een waterstand in het gebied instelt zoals paleogeografisch gereconstrueerd. Het model wordt zo in feite invers gebruikt.
3. Vanzelfsprekend is er een limiet aan hoe realistisch/detaillistisch het model kan en zou moeten zijn. Er zal een gevoeligheidsanalyse moeten worden uitgevoerd, waarbij de model input die op paleogeografische reconstructie gebaseerd is gevarieerd wordt (met name het hoogtemodel van het overstroomde oppervlak). Het gaat er hierbij vooral om hoe dit uitwerkt voor een groot oppervlak aan overstroomd gebied. Bij een paleogeografische reconstructie op de beoogde schaal en ruime hoeveelheid gegevens, is het waarschijnlijker dat de hoogte van het paleooppervlak voor deelgebieden licht onderschat en voor andere deelgebieden licht overschat wordt, dan dat er systematisch onderschat of overschat wordt over het hele gebied.

4.3.2 Historisch onderzoek

Historische bronnen zijn bruikbaar als aanvulling op meetreeksen en als zodanig ook reeds toegepast (bv. Middelkoop 1997, Glaser & Stangl 2003; 2004; Glaser e.a., 2003; Hesselink, 2002; Hesselink e.a., 2005). Het gaat hierbij zowel om stadskronieken etc. (belangrijke bronnen voor Gottschalk, 1971; 1975; 1977) als om historisch kaartmateriaal. Dergelijke bronnen zijn in paleogeografisch onderzoek naar kust- en rivierdynamiek van de laatste 2000 jaar dan ook veel gebruikt. Enerzijds dient het sedimentaire archief als verificatie van de historische bronnen ('Is het zoute water daadwerkelijk zover landinwaarts binnengedrongen?'), anderzijds worden historische vermeldingen

gebruikt om ouderdommen aan fenomenen te koppelen (al dan niet met ^{14}C dateringen, archeologie en cultuurgewas-palynologie ter verificatie).

Level	Classification	Primary indicators	Secondary indicators
1	Smaller regional flood	Little damage, e.g., fields and gardens close to the river, wood supplies that were stored close to the river are moved to another place	Short flooding
2	Above average, or supra-regional, flood	Damage to buildings and constructions related to the water like dams, weirs, footbridges, bridges and buildings close to the river, like mills, etc.; water in buildings	Flood of average duration, severe damage to fields and gardens close to the river, loss of animals and sometimes people
3	Above average, or supra-regional, flood disastrous scale	Severe damage to buildings and constructions related to the water, i.e. dams, weirs, footbridges, bridges and buildings close to the river, like mills, etc.; water in buildings. In part, buildings are completely destroyed or torn away by the flood	Duration of flood several days or weeks; severe damage to fields and gardens close to the river, extensive loss of animals and people; morpho-dynamic processes like sand sedimentation cause lasting damages and change the surface structure

Figuur 15

Schema voor intensiteitclassificatie van historische overstromingen (Sturm e.a., 2001)

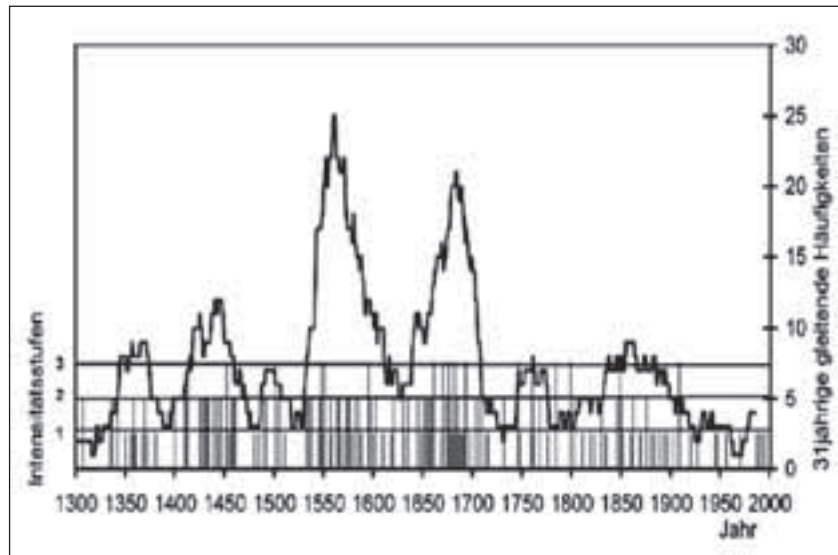
In het rivierengebied, is de grootte van historische hoge afvoeren en (bijna-) overstromingen (hoogte van de waterstand) in de regel alleen kwalitatief bekend. Historische vermeldingen van waterstanden kunnen gekwalificeerd worden als 'modale' (uiterwaarden onder water), 'middelzware' (middelgrote) en 'extreme' (catastrofaal grote) overstromingen ('Levels' in Fig. 15; 'Intensitätsstufen' in Fig. 16).

Omdat de Rijn zich splitst, kunnen meerdere overstromingsreconstructies gemaakt worden, en deze onderling vergeleken worden. De mate van consistentie van historische bronnen wordt op deze manier vastgesteld, en de reproduceerbaarheid van pieken (bij berekening van de lopende som over drie decennia) kan aangetoond worden (Fig. 17).

De periode 1750-1850 AD kan in specifieke gevallen (Nijmegen peilaflezingen; Glaser & Stangl, 2004) gebruikt worden als overlapperperiode van historische gegevens en moderne metingen. Dit geeft een indicatie welke waterstand/afvoer in de rivier door de kroniekschrijvers nog als 'normaal' of als 'extreem' beschouwd werden en biedt de mogelijkheid kwalitatieve intensiteiten aan overschrijdingen van absolute afvoergroottes te koppelen (Fig. 18). Zie Glaser en Stangl (2003, 2004) voor verdere toelichting en onderbouwing.

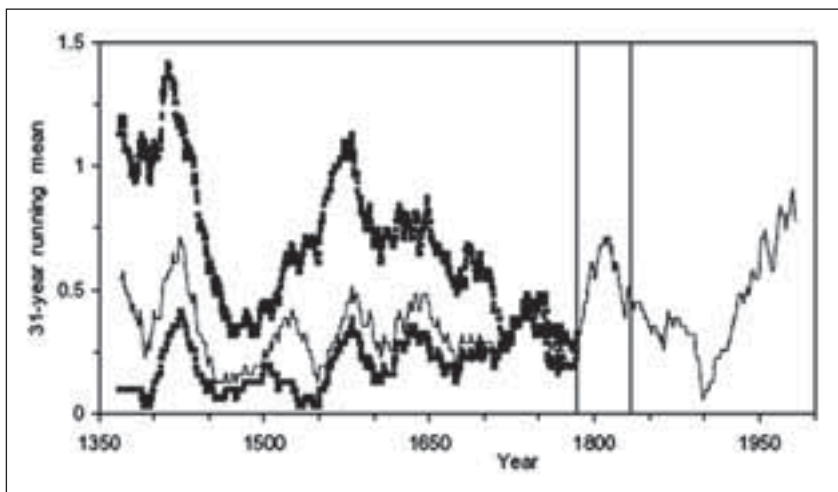
Figuur 16

Historische overstromingen ingedeeld naar klasse (1,2,3 – Fig. 13) (grijs) en daarvan afgeleide fluctuaties in overstromingsintensiteit (31-jarig lopende som). Methode Glaser e.a., 2003, hun Afb. 7; voor Pegnitz, Duitsland).



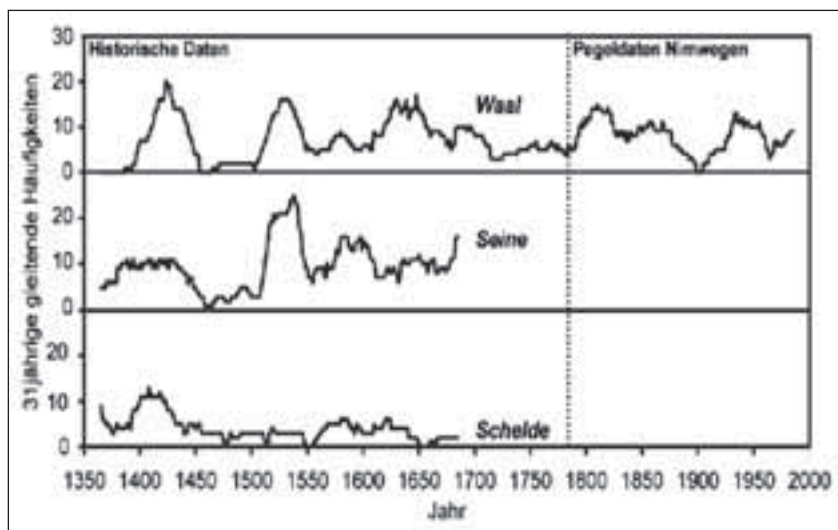
Figuur 17

Overstromingsintensiteiten in de Nederlandse delta op basis van historische gegevens (Glaser en Stangl, 2004). Onderste curve: 31-jarige lopende som van overstromingen die onafhankelijk waargenomen zijn langs alle drie de deltatakken (Waal: Nijmegen, Nederrijn: Arnhem, IJssel: Deventer). Middelste curve: idem, voor overstromingen die langs tenminste twee deltatakken waargenomen zijn. Bovenste curve: alle waargenomen overstromingen, al dan niet bekend uit waarnemingen langs meerdere takken, in ieder geval van langs een deltatak.



Figuur 18

Overstromingsintensiteiten voor rivier de Waal, Seine en Schelde (31-jarige lopende som, methode Fig. 15; Glaser e.a. 2003). Overeenkomende pieken worden aan onderling gelijke klimaatscondities toegeschreven (veel natte jaren in Zuid en Midden Duitsland = veel natte jaren in N. Frankrijk = veel natte jaren in België).

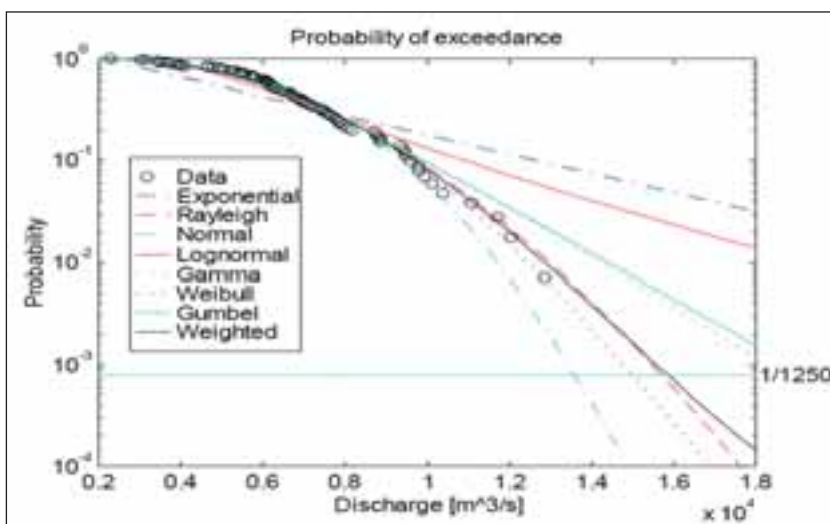


4.3.3 Statistisch onderzoek

De groottes en bijbehorende herhalingsfrequenties van in het verleden opgetreden overstromingen dienen uiteindelijk gebruikt te worden om de kans op toekomstige overstromingen in te schatten. Voor de moderne meetreeks (laatste 100 jaar) bestaan statistische methodieken die de gemiddelde herhalingstijden van afvoeren berekenen o.b.v. overschrijdings-kansverdelingen. Voor afvoeren tot 10.000 m³/s (met een herhalingstijd van 10 à 30 jaar; Fig. 19) levert dat bevredigende resultaten, voor hogere afvoeren niet.

Figuur 19

Extrapolaties van kans-op-herhaling volgens verschillende kansverdelingen (Chbab e.a., 2000a, hun Fig. 2).



De wens tot uitbreiding van de meetreeks aan historische afvoeren, met paleogeografisch gereconstrueerde afvoeren op de jongste geologische tijdschaal, komt voort uit het gegeven dat voor het vaststellen van frequenties van zeldzame *events* (veiligheid bedreigende waterstanden/afvoeren) een langere tijdspanne bestreken moet worden dan momenteel beschikbaar is. Pas wanneer de afvoerhistorie van de Rijn over meerdere millennia (3000 à 5000 jaar) bekend zou zijn, met een vergelijkbare nauwkeurigheid en oplossend vermogen als beschikbaar is voor de laatste 100 à 150 jaar, dan zijn die bestaande technieken direct toepasbaar op de verlengde reeks, maar een dergelijke staat van kennis kan en zal nooit bereikt worden: het sedimentaire archief is discontinu (erosie, non-depositie, hiaten) en individuele kleinere events worden niet individueel geregistreerd (doordat bodemvorming, bioturbatie en diagenese het signaal uitwissen). Er moeten dus aangepaste statistische methodieken worden gebruikt, om die resultaten die paleo-geografische reconstructies dan wèl opleveren (schattingen van individuele extreme afvoeren, frequenties van optreden) met de statistiek op de kortere, completere meetreeksen te integreren. Deze stap is van essentieel belang voor het bruikbaar maken (toepassen) van paleogeografische resultaten voor veiligheidsinschattingen. Hoofdstuk 5 gaat hier verder op in door voor de verwachte typen resultaten uit Aanpak 1 respectievelijk Aanpak 2 een indicatie te geven van de te behalen verbetering.

4.4 Reconstructiemogelijkheden van lagere prioriteit

Deze paragraaf bediscussieert een aantal extra reconstructiemogelijkheden die mogelijk aanvullende resultaten kunnen leveren. Het inzetten op deze methoden is lager geprioriteerd omdat verwacht wordt dat zij niet op korte termijn de gewenste inzichten in overstromingsfrequenties zullen opleveren, tenzij toegepast in combinatie met Aanpak 1 en Aanpak 2.

4.4.1 Karteren en dateren van slack water afzettingen stroomopwaarts van de delta

Slack water afzettingen zijn het gevolg van sedimentatie vanuit de hoofdrivier in de uiterste benedenloop van een zijriviertje en komen in de bovendelta (zie 4.2.1) maar vooral ook stroomopwaarts van de delta voor. De hoogte waarop dergelijke afzettingen voorkomen (en de afstand stroomopwaarts) is een maat voor de grootte van paleo-overstromingen. Het karteren en dateren van *slack water* afzettingen ten behoeve van piekafvoerschatten is vooral bruikbaar in nauwere riviervalleien (bijv. de *Mittelrhein* in Duitsland tussen Bingen en Bonn, de Maasvallei in Zuid Limburg / NO België) waar tijdens extreme afvoeren, de waterstand vele meters hoger is dan normaal. De toepassing is succesvol gebleken bijvoorbeeld langs de middenloop van de Taag in oost Spanje (Benito e.a., 2003).

Dit type afzettingen is in principe ook bruikbaar voor piekafvoerreconstructie in midden Nederland (Roer, Swalm, Niers, Raam in Maas; Lippe, Oude IJssel en Berkel in Rijn), maar bedacht moet worden dat vanwege de breedte van de rivierdalen en het merendeels ontbreken van hoge flankerende dalranden (m.u.v. Z-Limburg) de waterstandshoogte verschillen bij extreme en modale afvoeren aanzienlijk kleiner zijn dan in de diepere en nauwere rivierdalen in het achterland (Cohen, 2004); zoals voor de Rijn bijvoorbeeld het kloofdal in de Eifel. Deze methode is daarom niet verder uitgewerkt in het vooronderzoek. Op zich is het wel direct nuttig ook in Duitsland (*Mittelrhein*) naar mogelijkheden tot piekafvoer reconstructie te zoeken, in samenwerking met Duitse partners.

4.4.2 Het relateren van avulsie-frequenties aan overstromingsfrequenties

Avulsies zijn riviervleggingen waarbij een nieuwe tak zich vormt en een oude tak (een deel van) zijn afvoer verliest. Het verschijnsel is uitgebreid gedocumenteerd voor de Rijn-Maas delta (Stouthamer, 2001; Berendsen & Stouthamer, 2001). Avulsies zijn een direct gevolg van overstromingen. In principe zou de avulsiefrequentie (Fig. 20) gebruikt kunnen worden als proxy voor overstromingsfrequentie. In de praktijk is het inverteren van het verband tussen avulsies en afvoeren nog niet mogelijk.

Een succesvolle avulsie moet toegeschreven worden aan twee zaken: (1) 'de rivier brak door haar oeverwal en vormde een nieuwe geul buiten haar oevers' en (2) 'eenmaal geïnitieerd, kon de nieuwe geul zo groot worden dat zij uiteindelijk permanent water ging voeren en daarmee een nieuwe rivierloop werd'. Het initiëren wordt gezien als een toevallige samenloop van omstandigheden (hoge waterstand direct door piekafvoer, of geholpen door een ijssdam of in een kleinere rivier door een beverdam) tijdens een piekafvoer. De doorbraaklocatie wordt gezien als een relatief zwakke plek in de oeverwal langs de geul. Dit is bijvoorbeeld een laagte in de oeverwal ten gevolge van sedimentatiedynamiek of door menselijke of dierlijke activiteit, vooral wanneer de laagte zich bevindt langs de buitenbocht van een geul waar de stroming het sterkst is.

Ook het uitgroeien van sommige crevasses tot volledige verleggingen wordt deels aan omstandigheden tijdens de overstroming op de doorbraaklocatie toegeschreven ('Kon de doorbraakgeul tijdens de initiërende overstroming zo diep worden dat de geul ook bij lagere waterstanden water bleef trekken?'). Daarnaast is het al dan niet slagen van een avulsie ook afhankelijk van de specifieke paleogeografische omstandigheden rondom en stroomafwaarts van de avulsie locatie. Zo kunnen er verhangvoordelen zijn tengevolge van verschillen in afstand tussen avulsiepunt en monding in een estuarium tussen oude en nieuwe loop, ten voordele of juist ten nadele van de nieuwe loop.

Door deze complexiteit, is het op dit moment onbekend of het initiëren van een avulsie in de Rijn-Maas delta overeenkomt met het optreden van een extreme afvoer (van een grootte gekoppeld aan een herhalingsfrequentie van 1:100 tot 1:500 jr) of dat lokale samenlopen van omstandigheden en voorgaande sedimentatie door de rivier (oeverwalopbouw ten opzichte van het komgebied, meandergedrag rondom splitsingpunten) een zodanig dominante rol in 'de timing van' / 'het ontstaan van' een avulsie spelen, dat ook matig grote overstromingen (1:20 a 1:50 jaar) avulsies hebben kunnen initiëren.

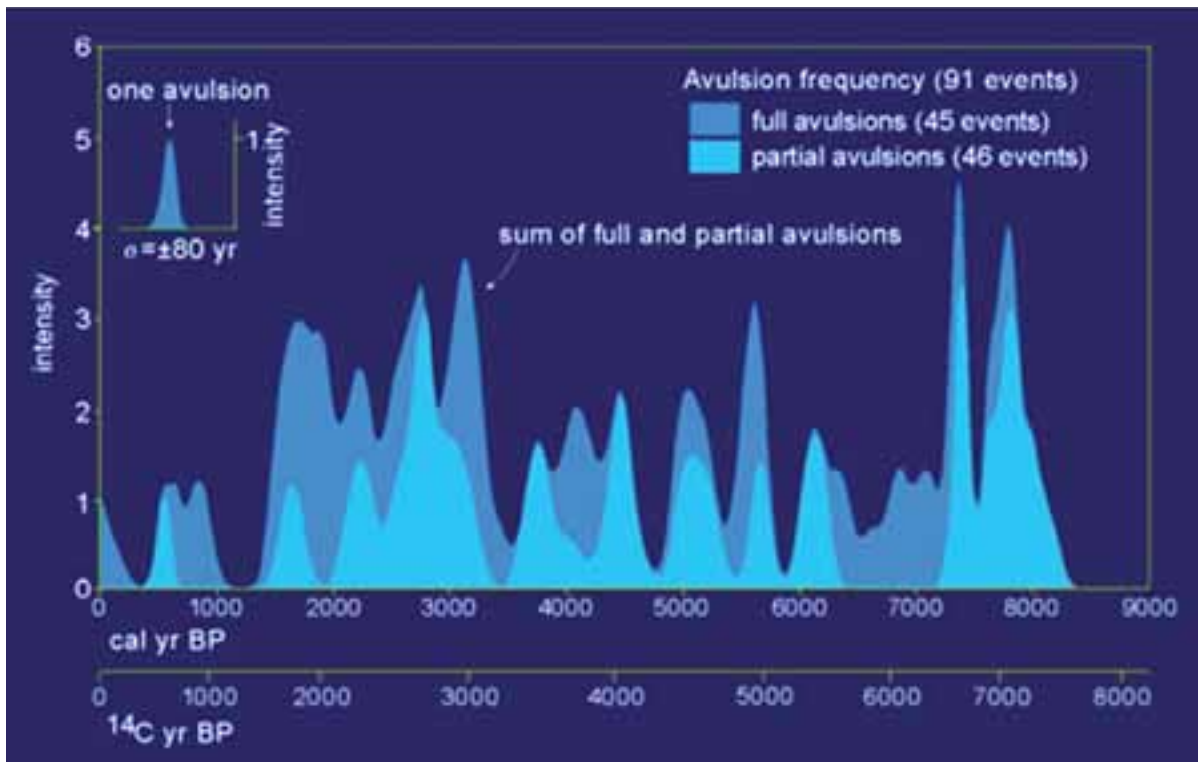
Het slagen van een avulsie (het permanent overnemen door een nieuw ontstane geul van een groot deel van de afvoer) is dus niet van de gebeurtenissen tijdens één overstroming afhankelijk. Voor de 91 benoemde avulsies in de Rijn-Maas delta (Stouthamer, 2001) tonen ^{14}C dateringen aan dat het avulsie proces (parallel functioneren van de oude en de nieuwe geul) gemiddeld zo'n 335 ^{14}C jaar beslaat (~400 kalender jaren). Voor sommige avulsies is dit langer en sommige avulsies zetten nooit volledig door. Gecombineerd met de principes van herhalingsfrequentie statistiek, suggereert dit dat aan geslaagde avulsies gemiddeld één >1:400-afvoer en zo'n acht >1:50-afvoeren hebben bijgedragen (onafhankelijk of een '>1:400' of een '>1:50' afvoer het initiërende *event* was). Hierbij dient echter de kanttekening gemaakt te worden dat de ^{14}C methode bij toepassing ter datering van individuele avulsies een resolutie van ~200 ^{14}C jaar oplevert, waardoor niet uit te sluiten is dat een deel van de benoemde avulsies zich in minder dan de hierboven veronderstelde 4 eeuwen voltrokken. In dat

geval is het verschijnsel avulsie minder sterk aan het optreden van extreme piekafvoeren, en meer aan normale piekafvoeren gekoppeld. Verder dient men zich te realiseren, dat de statistieken betrekking hebben op avulsies op talloze locaties in de gehele rivierdeltazone (Fig. 9). Herhalingsfrequenties van overstromingen bepaald over de hele delta, komen niet noodzakelijkerwijs overeen met de frequenties op de delta-apex.

Een aantal vraagstukken moet opgelost worden:

- Staat iedere avulsie voor een eigen extreme afvoer *event* of zijn clusters van avulsies tegelijkertijd door hetzelfde *event* geïnitieerd dan wel geslaagd? Waarschijnlijk is het laatste wel het geval voor een aantal clusters avulsies, maar voor welk aandeel in het totaal is een grote vraag.
 - o Zolang deze vraag nog onbeantwoord is, is het niet mogelijk pieken in avulsie-frequenties aan hetzij 'periodiek verhoogde piekafvoeren', hetzij 'autocyclisch gedrag van het deltasysteem' toe te schrijven.
 - o Het voorkomen van een plateau in de ^{14}C calibratie-curve rondom een van pieken in de avulsie-frequentie (rond 2500 ^{14}C jr, Fig. 20) is een licht complicerende factor.
- Zijn er grote afvoeren geweest die *geen* avulsie hebben veroorzaakt (maar wel veel crevasses)? Dat zou suggereren dat avulsie in de Rijn-Maas delta een sterk autocyclisch gecontroleerd proces is, dat in de eerste eeuwen na een (apex-)avulsie de gevoeligheid voor hernieuwde avulsie lager is dan eeuwenlang daarna.
 - o Het is duidelijk wat de grootste avulsies waren in de Rijn-Maas delta (verleggingen van de hoofdgeul, bijvoorbeeld die van de Nederrijn naar de Waal, die van de Kromme Rijn naar de Lek). Waar de grens voor de kleinste avulsie gelegd wordt (wat moet nog als stroomrug en wat moet als crevasse-beddinggordel beschouwd worden) is arbitrair. Dit is een enigszins onderbelicht gebleven factor in publicaties tot nu toe, maar een complicerende factor bij toepassing op overstromingsfrequenties.

Om deze vragen op te kunnen lossen is een op onafhankelijke basis gereconstrueerde afvoergeschiedenis noodzakelijk, bijvoorbeeld zoals via 'Aanpak 2' (welke uit gaat van sites met restgeulopvullingen, die op zich weer direct aan avulsies gerelateerd zijn). Systematische analyse van de restgeulopvullingen levert mogelijk ook beter inzicht op in de rol van extreme afvoeren op avulsies. Op termijn zou het hierdoor mogelijk kunnen worden ook avulsiefrequenties naar piekafvoeren te vertalen. Op zich is nader onderzoek naar dit verschijnsel wenselijk, bijvoorbeeld voor *process-based modelling* (het huidige inzicht in dit deel van het avulsieproces, maakt dat avulsies tot nu toe slechts empirisch-geometrisch gemodelleerd worden). Voor direct resultaat wat betreft het kwantificeren van de grootte en frequentie van paleoafvoeren, is de gereconstrueerde avulsiefrequentie voorlopig nog niet bruikbaar. Daarom zet dit vooronderzoek in op Aanpak 1 en Aanpak 2, waarin het verschijnsel avulsie wel een rol speelt in het ontstaan en preserven van sites, maar waarin avulsiefrequentie geen bepalende rol speelt.



Figuur 20

Intensiteit van avulsies volgens Stouthamer (2001), met onder andere relatief grote aantallen avulsies tussen 3000 en 1500 cal jr BP. De grafiek vertoont cycliciteit, maar deze is het gecombineerde resultaat van zowel autogene als allogene processen in vooralsnog onbekende verhouding (lokale sedimentatie in de delta, respectievelijk variatie in afvoer). De *bruikbaarheid als proxy* voor overstromingsfrequenties, is hierdoor bij de huidige stand van kennis niet vast te stellen. Met nieuwe inzichten zoals beoogd in Aanpak 1 en 2 kan dat mogelijk wel.

5 Statistische integratie van overstromingskansen uit directe metingen en paleogeografische reconstructie

5.1 Bayesiaanse statistiek

In dit hoofdstuk wordt voorbeschouwd, hoe de verwachte typen resultaten uit Aanpak 1 en 2 doorwerken in statistische extrapolaties naar maatgevende afvoeren. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van Bayesiaanse methodieken, die door Chbab e.a. (2000ab, 2002) theoretisch zijn uitgewerkt voor de Rijn. In de analyse worden de relatieve gewichten berekend die aan verschillende theoretische kansverdelingen kunnen worden toegekend, om uiteindelijk met een gecombineerde verdeling de relatie overschrijdingskans–afvoergrootte te beschrijven.

Bayesiaanse statistiek is een krachtige methode voor gecombineerde kansberekeningen, die zowel ‘directe’ waarnemingen gebruiken als op andere wijze afgeleide aanvullende veronderstellingen. In de Rijn maatgevende-afvoer toepassing vormt de meetreeks aan piekafvoeren van de laatste 100 jaar de ‘directe’ waarneming en uit paleogeografische reconstructie of uit historische reconstructie afgeleide gegevens fungeren als de aanvullende veronderstellingen.

Figuur 21 is een voorbeeld uitwerking van de bayesiaanse methodiek. De introductie van twee op historische gegevens gebaseerde punten, schat de 1/1250 afvoer op $\sim 15.250 \text{ m}^3/\text{s}$ tegen $\sim 15.860 \text{ m}^3/\text{s}$ zonder gebruik te maken van de ‘historische’ punten. Aanpak 2 streeft er naar op paleogeografie gebaseerde voorinformatie voor een dergelijke exercitie aan te leveren. Het levert meer voorinformatie, (Fig. 21; ‘sterren’) en verspreid over een groter herhalingstijd- en afvoerbereik omdat verwacht wordt dat in een periode van enkele millennia ook zeldzame zeer extreme afvoerpieken geregistreerd zijn. De paleogeografische aanpak kan de laatste 5000 jaar bestrijken en dit maakt dat resultaten voor herhalingstijden tot 1/1250 jaar als informatief kunnen worden beschouwd (25% van de beschouwde tijdsduur). Ter vergelijking: uit de moderne meetreeks van 100 jaar zijn herhalingstijden tot 1/30 jaar nog redelijkerwijs af te leiden (Fig. 1, 5; 30% van beschouwde tijdsduur). In statistische termen: tot herhalingstijden van $\sim 1/1250$ jaar mag verondersteld worden dat een 5000-jarige steekproef de kansverdeling robuust weerspiegelt. Vooral voor herhalingstijden in het domein $1/100 - 1/2000 \text{ jr}$ (Fig. 3), biedt paleogeografische reconstructie een unieke mogelijkheid voor punten ter statistische meeweging.

Bij uitvoering van Aanpak 1 en 2, komt voor de extrapolatie van de maatgevende afvoer op basis van piekafvoeren van de Rijn in Nederland in het verleden dus in principe ter beschikking:

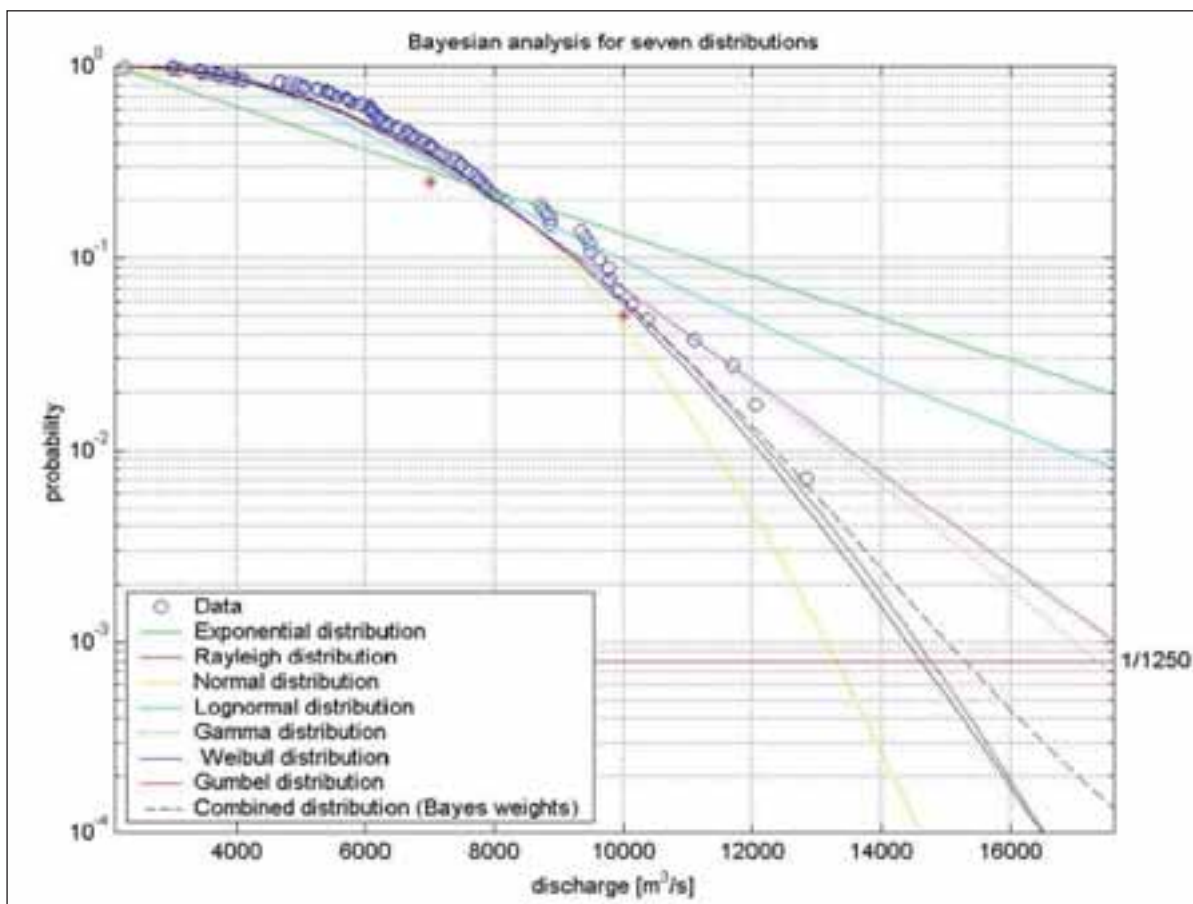
Figuur 21

Resultaat van Bayesiaanse statistische extrapolatie (Chbab e.a., 2000b) van herhalingstijden van extreme afvoeren (bv. $>10.000 \text{ m}^3/\text{s}$) op basis van de meetreeks (blauwe cirkels, 1900-2000 n. Chr.) én voorinformatie over de kansverdeling afgeleid uit historische gegevens (oranje sterren, 1800-1900 n. Chr.).

- De moderne meetreeks (zoals in Fig. 1; de 'Randvoorwaarden Methodiek'), waarop *directe bayesiaanse* statistiek mogelijk is (Chbab e.a., 2000a)

En daarnaast:

- Historische waarnemingsreeksen (e.g. Glaser en Stangl, 2003; 2004), welke reeds als *informative-prior* kunnen dienen in *bayesiaanse* statistische analyses (bijvoorbeeld: Chbab e.a., 2000b), maar die niet een wezenlijk ander herhalingstijdbereik bestrijken dan de meetreeks reeds doet.
- Paleogeografisch gereconstrueerde piekafvoerreeksen (§ 4), welke ook als *informative-prior* kunnen dienen in *bayesiaanse* statistische analyses (methode Chbab e.a., 2000b), en die bovendien een wezenlijk ander herhalingstijdbereik bestrijken dan de meetreeks en historische gegevens doen.



5.2 Is de statistische overstromingskans constant over 5000 jaar?

Een statistisch nadelig effect van het uitbreiden van de overstromingsreeksen naar het verdere verleden, is dat het minder waarschijnlijk wordt dat de kans op condities die bepaalde grootte van overstromingen veroorzaken (kans op specifieke complexe weersituatie, op de Noordzee voor stormvloed, in het achterland voor rivieroverstromingen) als constant kan worden beschouwd. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat overstromingveroorzakende weerscondities

in een periode als 4000-3000 jaar geleden meer voorkwamen en daardoor groter effect hadden dan in de huidige tijd. Dit los van de mogelijke oorzaak voor het meer/minder voorkomen van overstromingen van een bepaalde grootte zoals klimaatfluctuaties in neerslag en alpiene gletsjers, veranderend landgebruik / landinrichting door menselijke activiteit en natuurlijke rivieractiviteit, waaronder bijvoorbeeld ijsdamvorming.

De bestaande paleogeografische kennis is ruim voldoende om veranderingen in de achtergrondcondities te kunnen onderbouwen – niet in de laatste plaats omdat het merendeel van het paleogeografisch onderzoek zich gericht heeft op het identificeren van trends-van-verandering binnen de delta (zich voltrekkend binnen eeuwen tot millennia), en het koppelen daarvan aan vermeende aandrijvende oorzaken ('forceringen') zoals schommelingen in het klimaat van NW Europa of menselijke activiteit in het achterland. Dergelijke studies kunnen de aanwezigheid van veranderingen in de achtergrondcondities hard maken mits de volgende onderzoeksvragen systematisch zijn beantwoord:

- Of er, blijkens het sedimentaire eindproduct, noodzakelijkerwijs variaties moeten zijn opgetreden in externe omstandigheden (allocyclische forcering in de sequentie) of dat de variatie volledig met eigen progressief gedrag van rivier/kust (autocyclisch, interne processen) onder constante omgevingscondities kan worden verklaard. Deze vraag heeft betrekking op het sedimentaire archief in de delta zelf.
- Van welke factoren redelijkerwijs allogene forcering verwacht kan worden, met name omdat er uit reconstructies elders in en rondom het stroomgebied aanwijzingen zijn dat 'het klimaat veranderde', 'de mens meer landbouw ging bedrijven', 'de zeespiegel steeg', 'het ijs smolt' en 'de bodem daalde of juist omhoog kwam'. Deze vraag heeft dus betrekking op de sedimentaire archieven buiten het studiegebied.
- Of de vermeende allogene forcering wel voldoende sterk was om zichtbaar weerslag te hebben in de afzettingen. Een voorbeeld is de rol van zeespiegelstijging. Deze bepaalt in sterke mate de opbouw van de delta tot 5000 jaar geleden, maar daarna zijn het vooral bodemdaling (benedenstrooms in de rivierdeltazone), alsmede een toenemende sedimentatie vanuit het achterland (onder invloed van de mens en het klimaat) die het uitbreiden van de delta in zowel benedenstroomse als bovenstroomse richting verklaren. In afwezigheid van sterke zeespiegelstijging kon langs de kust de strandwal en getijdebekkens zich ontwikkelen, onder vrijwel constant blijvende stromings- en golfcondities in de Noordzee. Sinds 5000 jaar geleden werden hierdoor de autocyclische processen dominant in het bepalen waar zich getijdenbekkens vormen en opvullen en waar niet (Van de Plassche, 1982; Berendsen, 1984; Berendsen e.a., in voorb.). Allogene forcering (langzame relatieve zeespiegelstijging door bodemdaling) speelt wat dat betreft nauwelijks een rol. Dergelijke inzichten volgen uit de combinatie van proceskundig inzicht, kennis van de omgeving van de delta en gedetailleerde kennis van de opbouw van de delta (o.a. Berendsen & Stouthamer, 2001, De Mulder et al. 2003).

Voor allerlei aspecten van de opbouw van de Rijn-Maas delta is zo'n onderzoekspad bewandeld, onder andere voor fenomenen die direct beïnvloed worden door bovenstroomse veranderingen in afvoer en/of sedimentlast (sedimentaire architectuur, avulsiepunten (Berendsen & Stouthamer, 2001; Stouthamer, 2001), beddinggordel dimensies (promotieonderzoek M.J.P. Gouw, UU) en sedimentlast (promotieonderzoek G. Erkens, UU). De inzichten uit deze studies lijken vooraf direct bruikbaar voor het duiden van variaties in overstromingsreconstructies zoals in Aanpak 2.

6. Conclusies

Paleogeografisch onderzoek biedt met name voor rivieroverstromingen, goede mogelijkheden de meetreeks van piekafvoeren aan te vullen. De geologische geschiedenis van de laatste 5000 jaar kent een beperkt aantal events van grotere magnitude, en daarmee lagere herhalingskans, dan bekend uit de moderne meetreeks of historische gegevens (laatste 150 à 200 jaar, resp. laatste 600 à 1000 jaar).

6.1 Kansen voor verbetering veiligheidsinschattingen

Uit de paleogeografie van de Nederlandse delta blijkt dat in Nederland meerdere overstromingen zijn voorgekomen van een grotere omvang, dan bekend is uit de moderne meetreeks of historische gegevens. Afzettingen van bovengemiddeld grote overstromingen kunnen met zekerheid teruggevonden worden in het sedimentaire archief, en dit biedt mogelijkheden de frequentie van extreme overstromingen ten opzichte van normale overstromingen te reconstrueren. Een zeer beperkt aantal overstromingen, vooral vanuit Rijntakken, biedt ook de mogelijkheid de afvoer ten tijde van de overstroming kwantitatief te reconstrueren.

Uit statistische beschouwingen over kansverdelingen van afvoeren buiten het door de directe meetreeks afgedekte interval, volgt dat het betrekken van historische en paleogeografische afvoerreconstructies tot verbeterde schattingen van de herhalingstijd van maatgevende hoogwaters (MHW) zal leiden. Er zijn op dit moment in de literatuur echter nog geen concrete schattingen van afvoeren van individuele rivieroverstromingen langer dan 500 jaar geleden voor handen. Ook schattingen van herhalingsfrequenties van grote afvoeren over de laatste millennia ontbreken vooralsnog. De informatie uit de paleogeografie is op dit moment niet “panklaar” te betrekken in de statistische extrapolaties ter onderbouwing van de toetspeilen in het kader van de Wet op de waterkering.

Er zijn wel schattingen van variaties in de langjarig gemiddelde afvoer (lange termijn trends), maar deze bieden geen concreet handvat voor het doen van uitspraken over frequenties van als extreem te beschouwen overstromingen, ze zijn tot nog toe niet onafhankelijk getoetst en schattingen van grootte van de veranderingen in gemiddelde afvoer ontbreken. Pas in de laatste jaren is de gegevensdichtheid in de delta zo groot geworden dat aanpakken zoals in dit rapport geformuleerd praktisch mogelijk zijn geworden. De tijd is rijp om onderbouwde schattingen van de grootte en frequentie van extreme overstromingen uit de paleogeografie te (gaan) maken. Een belangrijke randvoorwaarde voor zulk onderzoek, is regionaal en temporeel overzicht van grootschalige trends in de ontwikkeling van de delta – en dat is (kant-en-klaar) beschikbaar.

Paleogeografisch onderzoek naar overstromingen is dus wenselijk, en voor het rivierengebied haalbaar (Tabel 1). Het is de verwachting dat met aanvullend onderzoek op de middellange termijn de gewenste kennis te genereren is. Hiertoe is in dit vooronderzoek een 2-voudige aanpak geformuleerd. De aanpak richt zich op:

1. het kwantificeren van één specifieke extreme paleo-overstroming (IJssel casus);
2. het verkrijgen van een deltadekkende reeks van magnitude- en frequentie-reconstructies van grote tot extreme paleo-overstromingen.

Tabel 1

Matrix kansrijkheid
overstromingsreconstructie

	Stormvloed kust en lagunezone	Overstroming Benedenrivieren	Extreme afvoer Grensgebied NL/D	
Modern gemeten	+++	+++	+++	
Historisch				
<i>Grootte van specifiek event</i>	Allerheiligenvloed 1570 AD ++	Elizabethsvloed 1421 AD ++	Land v. Maas & Waal 1805 AD ++ (Hesselink, 2002) Bron compilaties ± (Glaser & Stangl, 2004)	Overstromingen door dijkdoorbraken
<i>Frequentie analyse</i>	Bron compilaties ± (Oost, 1995)	<i>Onbekend</i> ±	Opvullingen van dijkdoorbraakgaten (Middelkoop, 1997) ++	
<i>(aansluitend op Aanpak 2)</i>				
Paleogeografie laatste 5000 jaar	Allerheiligenvloed 1570 AD -	Elizabethsvloed 1421 AD +	<i>Onbekend</i> ±	
<i>Grootte van specifiek event</i>				
<i>Aanpak 1 IJssel casus</i>	<i>Onbekend</i> ±	<i>Onbekend</i> ±	IJssel-doorbraak ca. 500 AD ++	Onbedijkte situatie
<i>Frequentie analyse</i>	Landwaartse lagunerand ±	Centrale delta komopvullingen -	Restgeulen, hoefijzermere ++	
<i>Aanpak 2: restgeul inventarisatie</i>				

Inschatting kansrijkheid: bewezen +++ hoog ++ redelijk + twijfelachtig ± laag -

Aanpak 1 levert een gedetailleerde beschrijving van één van de grootste afvoeren die de Rijn heeft gekend. Deze piekafvoer, die rond 500 jaar na Christus optrad (Berendsen & Stouthamer, 2001), was naar verwachting van de orde grootte behorend bij herhalingstijden tussen de 1/500 en 1/1500 jaar, dat wil zeggen groter dan enige historisch beschreven of gemeten afvoer. Tijdens deze afvoer vormden zich meerdere doorbraakgeulen (Cohen, in voorb.) ten noorden van de Oude IJssel (Doetinchem-Doesburg) en de grootste van die geulen bleef permanent watervoeren en initieerde daarmee de huidige

Gelderse IJssel. De Rijn-delta breide zich daarmee uit langs de oostrand van de Veluwe om voortaan deels uit te monden in de toenmalige Zuiderzee (nu IJsselmeer). Het gedetailleerd beschrijven van deze extreme afvoer, inclusief doorrekenen met numerieke modellen, levert één belangrijke extreme “meting” ten behoeve van de piekafvoer-statistiek. Daarnaast kan de beschrijving dienen ter bevordering van de bewustwording van het gevaar van overstroming in Nederland, al was het maar om een breed publiek duidelijk te maken dat extreme afvoeren en overstromingen in Nederland echt kunnen voorkomen.

Aanpak 2 levert een deltadekkende reeks van grote en extreem grote paleo-overstromingen. Grote overstromingen komen statistisch vaker voor dan extreem grote overstromingen. Aanpak 2 beoogt de overstromingen als sedimentlaagjes te herkennen op hiervoor geschikte locaties in de bovendelta en van deze laagjes in het laboratorium eigenschappen te meten die aan de grootte van de overstroming te relateren zijn. Hiermee kunnen paleo-overstromingen naar grootte-klasse worden ingedeeld. Het doel van Aanpak 2 is het afnemende verloop van de kansfunctie uit de herhalingstijden af te leiden. De resulterende kansfunctie kan in de statistische extrapolaties van de huidige meetreeks worden betrokken en dit zal de onzekerheidsmarges op de voorspelde 1/1250 afvoer van de Rijn aanzienlijk reduceren.

6.2 Mitsen en maren; wetenschappelijke onderbouwing

De focus van paleogeografisch onderzoek is in het verleden vooral op lang-jarige veranderingen over eeuwen tot duizenden jaren geweest. Het ging daarbij om het identificeren van trends, niet op het specifiek in kaart brengen van individuele gebeurtenissen (events). Dit is de hoofdreden dat eerst gericht nieuw veldwerk, monsternamen en laboratoriumanalyse nodig zijn, voordat uitspraken over individuele overstromingsgebeurtenissen gedaan kunnen worden.

Waarom Aanpak 1 en Aanpak 2 parallel uitgevoerd moeten worden

De rijkdom aan paleogeografische gegevens (grondboringen, gedetailleerde hoogtekarten, dateringen) neemt niet weg dat er slechts voor een zeer beperkt aantal paleo-overstromingen met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid de resulterende afzettingen en landschapsvormen kunnen worden aangewezen. De primaire *casus* om een studie naar één extreme rivieroverstroming op te focussen is het ontstaan van de Gelderse IJssel tijdens een hoogwater van de Rijn (Aanpak 1). Voor een stormvloedcasus is de preservatie in de delta minder gunstig. De St. Elisabethsvloed is een eventuele kandidaat. Daar wordt reeds historisch en archeologisch onderzoek naar gedaan, dat met paleogeografisch onderzoek zinvol uitgebreid kan worden.

Focussen op de grootte van één overstroming (de piekafvoer door de Rijn ten tijde van die overstroming) *alleen* levert geen nieuw inzicht voor frequentie-magnitude relaties voor overstromingen (uit één overstroming van een bepaalde ouderdom is niet af te leiden hoe

vaak een overstroming van deze grootte zich voordeed: of het een 1/2000 jaar of 1/500 jaar *event* was). Daarom is ook een extensieve benadering nodig, waarbij het totaal aantal in sediment geregistreerde boven-modale overstromingen wordt geschat (Aanpak 2). Dit levert wel het nodige inzicht in de herhalingstijden van overstromingen van toenemende grootte-klasse. Zo'n aanpak zou bovendien antwoorden moeten leveren op de vraag tot hoever terug in de tijd extreme overstromingsfrequenties als constant mogen worden beschouwd. Aanpak 2 maakt hiertoe gebruik van de registratie van overstromingen in de overstromingsgebieden op grotere afstand van voormalige geulen: restgeulen in kommen, en hoefijzermere en wielen in de overstromingsvlakte langs huidige en voormalige riviertakken, met focus op de bovendelta (Overbetuwe, Liemers, Gelderse Poort, aansluitend gebied in Duitsland).

Bij zowel Aanpak 1 als Aanpak 2, zal paleogeografisch onderzoek met numerieke modelleringselementen moeten worden aangevuld. De veldcampagnes die nodig zijn voor Aanpak 1 en 2 kunnen sterk voortbouwen op reeds beschikbare gegevenscompilaties (zoals kaarten en boringendatabases; Berendsen & Stouthamer, 2001; Berendsen 2005). Ook in de analysefase hebben deze producten van eerdere paleogeografische studies een belangrijke complementaire rol ('verandert de intensiteit van overstromingen of verandert het gemiddelde signaal?). Idealiter worden Aanpak 1 en 2 parallel aan elkaar uitgevoerd (door 2 onderzoekers + laboratorium ondersteuning). Dergelijk onderzoek kan *op termijn* ook bijdragen aan nieuwe inzichten in het initiëren van- en het al dan niet slagen van avulsies, ten gevolge van series extremere en minder extreme overstromingen. Op dit moment zijn avulsie-frequenties echter maar zeer beperkt bruikbaar als overstromingsfrequentie proxy. Aanpak 1 en Aanpak 2 zijn nodig om daar verandering in te brengen.

Een belangrijke rol is verder weggelegd voor de integratie van 'paleo-resultaten' met de statistiek op de moderne meetreeks. Bayesiaanse statistische analyse is hiervoor een geschikte methode, en reeds binnen RWS beschikbaar (Chbab & Van Noortwijk, 2002). De informatie uit paleogeografisch gereconstrueerde piekafvoerreeksen (§ 4) dient hierbij als extra informatie voor de statistische afweging van de waarschijnlijkheid van kansverdelingen voor herhalingsfrequenties (§ 5).

Kritieke punten in paleogeografische studies naar overstromingsdynamiek

De volgende punten verhinderen het doen van harde uitspraken op basis van bestaande paleogeografische informatie op dit moment, en zijn de punten waarop Aanpak 1 en 2 verbetering zou moeten aanbrengen.

- *Dateringsresolutie*: om aan te tonen dat een afzetting overal het product van één-en-hetzelfde event is zijn veel dateringen nodig. Het tot nog toe ontbreken hiervan is met name een budget probleem. Aanpak 1 en Aanpak 2 vergen dan ook aanvullende laboratorium- en dateringsbudgetten naast de

normale onderzoekskosten (geschat: 1,100 k€, 2 onderzoekers + lab. ondersteuning ; Appendix 2). Overigens zijn er limieten aan de met ^{14}C te bereiken nauwkeurigheid – de voorgestelde dateringsstrategie houdt daar rekening mee.

- *Kwaliteit van de paleogeografische reconstructie* (hoogtedetail, zekerheid). Er is detaillistische kennis nodig om de beoogde aanpakken waar te kunnen maken. Databases/infrastructuur voor detail reconstructies zijn hiertoe in de laatste 8 jaar reeds ontwikkeld (in eerdere onderzoeksprojecten). De paleogeografische kennis is zeker op het niveau gebracht dat dit soort specifieke, veel gegevens vereisende problemen aangepakt kunnen worden, en resultaten realistisch in plaats van speculatief worden. Het beschikbaar gekomen AHN (RWS-AGI, 2005) is een belangrijke sprong voorwaarts. Het AHN heeft in korte tijd veel nieuw paleogeografisch inzicht opgeleverd (o.a. Berendsen e.a., 2007) en kan dat ook voor de paleogeografie van de IJsseloverstroming leveren (Cohen, in voorb.).
- *Integratieslag van geïsoleerde, lokale onderzoeken*: Losse onderzoeken van lokale aard zijn talrijk, maar geen enkele is direct bruikbaar als reconstructie van de verbreiding van specifieke overstromingen of voor het schatten van de herhalingstijd van overstromingen van bepaalde grootte. Voor het historische tijdvak (laatste 1000 jaar) bestaan er integratieve studies met focus op overstromingen. Voor eerdere tijdvak (5000-1000 jaar BP) zijn deze er niet. Paleogeografen die werken in de Nederlandse delta zijn zich goed bewust van het verschil in magnitude en herhalingstijd van overstromingen in het verleden, maar het werd voorheen als een onhaalbaar grote stap beschouwd dit te reconstrueren en daarom is het tot nog toe niet gedaan. Dit vooronderzoek concludeert dat het nu wel mogelijk is. Een uitdaging in Aanpak 1 en Aanpak 2 is het vinden van de juiste balans tussen lokaal detail (het aanwijzen van de ideale sites) en deltawijd (gebiedsdekkend) uitspraken doen.
- *Focus op een specifieke incidentele extreme overstroming* (dag-week tijdschaal), wijkt af van de concepten die veelal gehanteerd zijn in paleogeografische reconstructies in het verleden. Meestal werden daarin modale overstromingen en extreme overstromingen als minder en meer van hetzelfde gezien, en daarom slechts het cumulatieve effect beschreven/aangevoerd om langjarige trends te duiden. Dit heeft als gevolg dat om aanwijzingen voor specifiek extreme afvoeren te kunnen verzamelen, naar de oorspronkelijke detail beschrijvingen moet worden teruggegrepen (in grijze literatuur, of ongepubliceerd) en opnieuw geanalyseerd moet worden (geïntegreerd over meerdere locaties) om individuele extreme overstromingen daadwerkelijk aan te tonen. Dit zal vaak aanvullend veldwerk vergen, waarbij ondanks het veranderend perspectief, voortgebouwd kan worden op datasets uit eerdere studies.

6.3 Meerwaarde van voorgesteld onderzoek

Het onderwerp 'paleogeografie en veiligheid tegen rivieroverstromingen' raakt een aantal wezenlijke vraagstukken wat betreft verklaringen van trends van kust- en deltaontwikkeling op een tijdschaal van eeuwen en millennia en de verhouding aan morfologische verandering ten gevolge van extreme events tegen over normale situaties ('modale piekafvoeren', normale stormen). Paleogeografische reconstructies zijn tegenwoordig geen doel op zich meer, maar een 'tool' om kust- en rivierprocessen en -afzettingen op verschillende tijdschalen te begrijpen. Het daadwerkelijk op die manier uitvoeren van paleo-overstromingsonderzoek kan verder leiden tot spin-off / kruisverbanden met archeologisch en historisch onderzoek, evenals klimaatsverandering-onderzoek (incl. toekomstige veiligheid).

Naast het veiligheidsvraagstuk van waaruit dit vooronderzoek gestart is, is onderzoek naar 'extreme overstromingen' ook om andere redenen nuttig. Het inzichtelijk maken van de grootte van paleoafvoeren en vertaling van het onderzoek naar beleidsstudies en publieksvoorlichting kan het bewustzijn ten aanzien van overstromingen en veiligheid bij een breder publiek aanwakken.

Het onderzoek betreft de piekafvoer- en overstromingsgeschiedenis van de Rijn tot en met de huidige situatie. Het vaststellen van deze uitgangssituatie voor toekomstige ontwikkelingen functioneert ook als 'nulmeting' bij het doorrekenen van klimaatveranderingsscenario's. Het vaststellen van de uitgangssituatie is een basale stap voor projecties naar de toekomst. Voor extreme afvoeren kon die stap tot nog toe niet gemaakt worden. Paleogeografische kennis over de laatste 5000 jaar kan de nulmeting completeren. Dan draagt onderzoek naar het verleden bij toekomstvoorspellingen beter te maken.

- ³ Geografische Informatie Systemen: computeromgeving voor opslag en bewerking van digitaal kaartmateriaal en analyse van dergelijke informatie.
- ⁴ Als informative prior distribution in the terminologie van de Bayesiaanse statistiek.
- ⁵ Recente overzichtspublicaties zijn Berendsen & Stouthamer, 2001 (Universiteit Utrecht), Ten Brinke, 2005 (RWS-RIZA), De Mulder e.a., 2003 (TNO-B&O/vml. Geologische Dienst).
- ⁶ Stroomruggen: lintvormig reliëf dat verlaten rivierlopen markeert.
- ⁷ D.w.z. binnen enkele jaren. Zaken die binnen 1-2 veldseizoenen en 1-2 jaar lab/analysetijd zijn uit te zoeken, door een full-time onderzoeker / promovendus.
Weliswaar is de ligging van vrijwel alle restgeulen bekend (o.a. op basis van het AHN, en op kaarten uit de zanddiepteatlas, Berendsen et al. 1994), met boringen aangetoond en de opvullingen prospectief gekarakteriseerd (boorbeschrijvingen in het veld; De Laaglandgenese databank, Berendsen 2007 – Fig. 13), en in de tijd te plaatsen (bijv. Berendsen & Stouthamer, 2001), maar slechts enkele locaties zijn in een mate van detail bemonsterd die het doen van een frequentieanalyse op overstromingsgerelateerde influxen mogelijk maakt.
- ⁸ Weliswaar is de ligging van vrijwel alle restgeulen bekend (o.a. op basis van het AHN, en op kaarten uit de zanddiepteatlas, Berendsen et al. 1994), met boringen aangetoond en de opvullingen prospectief gekarakteriseerd (boorbeschrijvingen in het veld; De Laaglandgenese databank, Berendsen 2007 – Fig. 13), en in de tijd te plaatsen (bijv. Berendsen & Stouthamer, 2001), maar slechts enkele locaties zijn in een mate van detail bemonsterd die het doen van een frequentieanalyse op overstromingsgerelateerde influxen mogelijk maakt.

Referenties

- Alkema, D. , 2003, Waterstaatkundige inrichting van rivierpolders: Een hernieuwde rol voor cultuurhistorische elementen. CD-ROM met animaties en analyses van 28 overstromingssimulaties van het Land van Maas en Waal, uitgevoerd met een 2 dimensionaal overstromingsmodel. Projectbureau Belvedere, Utrecht, en Universiteit Utrecht.
- Berendsen, H.J.A., 1984, Quantitative Analysis of Radiocarbon Dates of the Perimarine Area in The Netherlands. *Geologie en Mijnbouw* 63, pp. 343-350.
- Berendsen, H.J.A., Makaske, B., Van de Plassche, O., Van Ree, M., Das, S., Van Dongen, M., Ploumen, S. & Schoenmakers, W. (in voorb.). New groundwater-level rise data from the Rhine-Meuse delta; implications for the reconstruction of Holocene relative mean sea-level rise and differential land-level movements. *Netherlands Journal of Geosciences*.
- Berendsen, H.J.A., 2007. De Laaglandgenese databank. CD-ROM. Dept. Fysische Geografie, Fac. Geowetenschappen, Universiteit Utrecht.
- Berendsen, H.J.A. & Stouthamer, E., 2001. Palaeogeographic development of the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Van Gorkum, Assen: 268 pp. Addendums, CD-ROM.
<http://www.geo.uu.nl/fg/palaeogeography>
- Berendsen, H.J.A., Faessen, E.L.J.H., Hesselink, A.W. & Kempen, H., 2001. Zand in banen - Zanddiepte-kaarten van het Gelderse rivierengebied, met inbegrip van de uiterwaarden. Provincie Gelderland, Arnhem.
- Behre, K.-E. & Kucan, D., 1999. Neue untersuchungen am Aussendeichsmoor bei Sehestedt am Jadebusen. *Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet*, band 26, pp. 35-64.
- Behre, K.-E., 2003. Eine neue Meeresspiegelkurve für die südliche Nordsee: Transgressionen und Regressionen in den letzten 10.000 Jahren. *Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet*, band 28, 9-63.
- Benito, G., Sanchez-Moya, Y. & Sopena, A., 2003 Sedimentology of high-stage flood deposits of the Tagus River, Central Spain. *Sedimentary Geology*, 157, pp. 107-132.
- Cleveringa, P., Meijer, T., Weerts, H. & De Wolf, H., 2003. Dordrecht in ontwikkeling: Van moeras tot stad. INFORMATIE, Editie grondwater en bodem, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen, 14 (Dec 2003): 19-22'.
http://cms.dordrecht.nl/Dordrecht/up/ZobrplaHE_TNO_NITG__Informatie_14__2003.pdf
- Chhab E.H., Van Noortwijk, J.M. & Duits, M.T., 2000a. Bayesian frequency analysis of extreme river discharges. In: Toesman, F., Koch, M. (eds) *River flood defence. Proceedings of the international symposium on flood defense*, Kassel, Germany, 2000. Herkules Verlag, Kassel, pp. F51-60.

-
- Chbab E.H., Van Noortwijk, J.M. & Kalk, H.J., 2000b. Bayesian estimation of extreme River discharges. JOURNAL, ISSUE, 1-10.
- Chbab, E.H. & Van Noortwijk, J.M., 2002. Bayesiaanse statistiek voor de analyse van extreme waarden. RIZA rapport 2002.006, 48 pp.
- Cohen, K.M., 2003. Differential subsidence within a coastal prism. Late-Glacial - Holocene tectonics in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands. Netherlands Geographical Studies 316, 208 pp.
- Cohen, K.M., 2004. Global Continental Drainage project report: A database on field records of rivers of the last 50 ka, for palaeo-discharge estimation and GCM intercomparison. 86 pp.
- Cohen, K.M., 2005. 3D Geostatistical interpolation and geological interpretation of paleo-groundwater rise in the Holocene coastal prism in the Netherlands. In: Giosan, L. & J.P. Bhattacharya (eds.). River Deltas - Concepts, models, and examples. SEPM Special Publication 83, pp. 341-364.
- Cohen, K.M., 2006. Generic estimates of paleo peak discharge for series of nested channel belt deposits. Proceedings of NCR days 2005. 59-60.
- Cohen, K.M., in voorb. The Rhine's reoccupation of its IJssel valley in the Late Holocene, Manuscript in voorbereiding.
- De Mulder, E.F.J., Geluk, M.C., Ritsema, I.L., Westerhoff, W.E. & Wong, T.E., 2003. De ondergrond van Nederland. Wolters Noordhoff Groningen/Houten. 379 pp.
- Erkens, G., Cohen, K.M., Gouw, M.J.P, Middelkoop, H. & Hoek, W.Z., 2006. Holocene sediment budgets of the Rhine Delta (The Netherlands): a record of changing sediment delivery. Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems (Proceedings of a symposium held in Dundee, UK, July 2006). IAHS Publ. 306, 2006.
- Erkens, G., in voorb. Holocene floodplain sedimentbudget of the Lower Rhine Embayment (Nordrhein Westfalen, Germany). Manuscript in voorbereiding.
- Gottschalk, M.K.E., 1971. Stormvloeden en rivieroverstromingen in Nederland (Stormsurges and River floods in the Netherlands) deel 1, de periode voor 1400. Sociaal Geografische Studies 10, De Vries, A.C. (ed.). Van Gorcum Amsterdam, 581 pp.
- Gottschalk, M.K.E., 1975. Stormvloeden en rivieroverstromingen in Nederland (Stormsurges and River floods in the Netherlands) deel 2, de periode voor 1400-1600. Sociaal Geografische Studies 13, De Vries, A.C. (ed.). Van Gorcum Amsterdam, 896 pp.
- Gottschalk, M.K.E., 1977. Stormvloeden en rivieroverstromingen in Nederland (Stormsurges and River floods in the Netherlands) deel 3, de periode voor 1600-1700. Sociaal Geografische Studies 14, De Vries, A.C. (ed.), Van Gorcum Amsterdam, 474 pp.
- Gouw, M.J.P. & Erkens, G., 2007. Architecture of the Holocene Rhine-Meuse delta (The Netherlands) as related to eustatic sea-level rise, subsidence, and discharge and sediment supply. Netherlands Journal of Geosciences/Geologie en Mijnbouw, 86, 23-54 (Special Issue 8th Int. Congress of Fluvial Sedimentology. August 2005, Delft, The Netherlands.)
- Glaser, R. & Stangl H., 2003. Historical floods in the Dutch Rhine Delta. Natural Hazards and Earth System Sciences 3. pp. 605-613.

-
- Glaser, R., Beck, Ch. & Stangl H., 2003. Zur Hochwasserentwicklung der letzten 1000 Jahre in Deutschland. Deutsche Wetterdienst, Klimastatusbericht 2003: 55-67. <http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/KSB/ksb03/index.htm>
- Glaser, R. & Stangl H., 2004 Climate and Floods in Central Europe since AD 1000: Data, Methods, Results and Consequences. *Surveys in Geophysics* 25: 485-510, 2004
- Reise, K., 2005. Coast of change: habitat loss and transformations in the Wadden Sea. *Helgoland Marine Research* 59, pp. 9-21.
- Hesselink, A.W. 2002 History makes a river. Morphological changes and human interference in the River Rhine. Netherlands Geographical Studies 292, 177 pp.
- Hesselink, A. W., Kleinhans, M. G. and Boreel, G. L. Historic Discharge Measurements in Three Rhine Branches. *Journal of Hydraulic Engineering* 132, 140-145
- Hoek, W.Z., 1997. Palaeogeography of Lateglacial Vegetations. Aspects of Lateglacial and Early Holocene vegetation, abiotic landscape, and climate in The Netherlands. Netherlands Geographical Studies 230, pp.1-147.
- Klostermann, J., 1992. Das Quartär der Niederrheinische Bucht. Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen. Krefeld. pp. 1-200.
- Oost, A., 1995. Development of the eastern Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian inlet system in historical times: morphodynamic behaviour of islands and inlets. Chapter 2 in Oost, A. 1995 Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet. *Geologica Ultraiectina / Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen Universiteit Utrecht* 126: 97-246.
- RWS-RIZA & KNMI, 1996. Rainfall generator for the Rhine catchment: a feasibility study.
- RWS-AGI, 2005. AHN: Actueel Hoogtebestand Nederland. <http://www.ahn.nl>
- Smith, N.D, Cross, T.A., Dufficy, J.P. & Clough, S.R., 1989. Anatomy of an avulsion. *Sedimentology* 36, pp. 1-23.
- Stouthamer, E., 2001. Holocene avulsions in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Netherlands Geographical Studies 283, 211 pp.
- Sturm, K., Glaser, R., Jacobeit, J., Deutsch, M., Brázdil, R. & Pfister, C., 2001. Floods in Central Europe since AD 1500 and their Relation to the Atmospheric Circulation. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 148(6), pp. 18-27.
- Ten Brinke, W.B.M., 2005. The Dutch Rhine, a restrained river. *Veen Magazines*, Diemen, The Netherlands.
- Teunissen, D., 1990. Palynologisch onderzoek in het oostelijk rivierengebied – een overzicht. *Mededelingen van de afdeling Biogeologie van de Discipline Biologie van de Katholieke Universiteit van Nijmegen* 16, pp. 1-163.
- Van de Plassche, O., 1982. Sea-level change and water level movements in the Netherlands during the Holocene. *Mededelingen Rijks Geologische Dienst* 36, pp. 1-93.
- Vis, M., Klijn F. & Van Buuren, M., (eds.) 2001. Living with floods. Resilience strategies for flood risk management and multiple land use in the lower Rhine River basin. Exutive summary IRMA-

SPONGE Project No. 10. In: Hooijer, A., Klijn, F., Kwadijk, J. & Pedroll, B., (Eds.), 2002. IRMA-SPONGE Towards Sustainable Flood Risk Management in the Rhine and Meuse River Basin. Main results of the research project. NCR-publication 18-20. pp. 10.1-31.

Appendix 1: Historische stormvloed(en) in Nederland (bloemlezing)

Oost (1995: 113) distilleerde uit paleogeografische en historische gegevens (en overzichtspublicaties daarvan, vooral Gottschalk 1971, 1975 en 1977) de volgende stormvloed(en) in de periode 950-1300 AD (1000 - 650 BP), en 1300-1600 AD (650- 350 BP). De periode na 1600 AD is in deze appendix buiten beschouwing gelaten. Oost (1995) en Gottschalk (1975, 1977) bevatten ook voor de periode na 1600 AD overzichten.

Historische 'extreme' stormvloed(en) in N. Nederland, 9^e-13^e eeuw AD

Datum [dd]-mm-jjjj	Gebied	Details
<i>Geen bronnen voor 1150 AD</i>		
17/18-2-1164	Friesland(?), Groningen	Vermoedelijk is dit de storm die verantwoordelijk is voor de inundatie van het Vechtgebied tot nabij Utrecht.
2-11-1170	Friesland: Staveren; Utrecht/Gooi	
6-12-1196	Friesland: Middelzee, Groningen: Dollard	NW-storm, nabij springtij NW-storm
16-1-1219?	Friesland, Groningen	
28-12-1248	Friesland, Groningen	
28-1-1262	Noord Holland, Friesland, Groningen	
14-12-1287	Noord Holland, Utrecht,	
2-1288	Friesland, Groningen	
12-1288		

Bron: Gottschalk, 1971 op.cit Oost, 1995

Deze groep stormvloed(en) wordt gerelateerd aan erosieve verschijnselen langs de Zuiderzeekust. Onafhankelijke dateringen van sedimenten langs de Zuiderzee bevestigen dit (Oost, 1995).

Historische 'extreme' stormvloed in N. Nederland, 14^e-16^e eeuw AD

Datum [dd]-mm-jjjj	Gebied	Details
20-3-1318	Noord Holland: West Friesland	
15-1-1343	Noord Holland	
2/9-9-1344	Noord Holland: West Friesland, Friesland	
10-1375	Noord Holland: West Friesland; Ameland; Groningen:Dollard	
19-11-1421	Noord Holland: West Friesland <i>ook: Zuid Holland, Zeeland</i> Brak o.a. de zeedijken aan de zuidwestzijde van de Grote Zuid Hollandse Waard. In 1422 brak bij rivier-hoogwater ook de Merwededijk aan de noordzijde van deze polder. Slechts een gedeelte van de polder is daarna herwonnen (Land van Heusden en Altena, Eiland van Dordrecht). De rest vormt de Biesbosch.	St. Elisabethsvloed
18-9-1424	Noord Holland: West Friesland; Friesland	
10-6-1446	Noord Holland: West Friesland, Groningen: Dollard	
27-9-1477	Noord Holland: West Friesland; Zuiderzee: IJ, Gooi, Kampen	
26/27-9-1509	Noord Holland, Zuid Holland, Friesland, Groningen	
30-9-1514	Noord Holland, Zuid Holland, Friesland, Groningen	
2-11-1532	Noord Holland, Zuid Holland, Friesland, Groningen, Zeeland 1500-1550 AD: modale ('normale') stormvloed (Gottschalk, 1975): 1502, 1505?, 1507, 1508, 1509, 1512, 1514, 1516, 1517, 1524, 1538?, 1543	Felixvloed
13-1-1552		
15-2-1552	Noord Holland, Zuid Holland, Friesland, Groningen	
15-9-1559	Noord Holland, Zuid Holland, Friesland, Groningen 1550-1600 AD: modale ('normale') stormvloed (Gottschalk, 1975): 1566, 1568?, 1573	
1-11-1570	Noord Holland, Zuid Holland, Friesland, Groningen De Allerheiligenvloed in 1570 AD wordt beschouwd als de zwaarste stormvloed die de Nederlandse kust in de laatste 1000 jaar getroffen heeft.	Allerheiligenvloed

*NB: Oost (1995) en Gottschalk (1975, 1977)
geven ook overzichten voor de periode na 1600 AD*

Bron: Gottschalk, 1971, 1975; op. cit. Oost, 1995

Appendix 2:

Naar een paleooverstroming projectvoorstel

.....

De bedoeling van deze appendix is het geven van een indruk voor de inrichting van een onderzoek naar paleo-overstromingen in het rivierengebied, volgens Aanpak 1 of Aanpak 2, uitgevoerd door promovendi en/of postdoc.

Opzet projectvoorstel

<i>(in onderstaand format gebruikt in Klimac tender)</i>
Titel projectvoorstel De Rijn-Maas delta als archief van klimaatextremen uit het verleden
Abstract (max 200 woorden) De Holocene Rijn-Maas delta levert een uitstekend geologisch archief van rivier- en kust-ontwikkeling over de laatste millennia. De delta is het product van gestage accumulatie van sedimenten, maar op een flink aantal sleutellocaties zijn deze sedimenten toe te schrijven aan korte momenten met extreme condities zoals stormvloed en afvoerpieken. Omdat de ontwikkeling van de Nederlandse delta bijzonder goed begrepen wordt (het detailniveau van de huidige stand van kartering, datering en begrip is groter dan waar ook elders in de wereld), is het nu mogelijk binnen het grotere geheel, specifiek die gebeurtenissen aan te wijzen die met zekerheid aan extreme omstandigheden uit het verleden kunnen worden toegeschreven. Dit maakt reconstructie van frequenties en groottes van 'recordafvoeren' van de laatste 5000 jaar mogelijk, iets wat relevant is voor het onderbouwd schatten van de 1:1.250 en 1:10.000 waterstanden uit de waterkeringswetgeving. Twee typen delta-'sites' staan ter beschikking: (1) distale sites langs de laguneraand en langs verlaten riviergeulen, die alleen bij grotere overstromingen afwijkend sediment ontvangen en waaruit overstromingsfrequenties afgeleid kunnen worden; (2) proximale sites waar t.g.v. extreme gebeurtenissen (stormvloed-inbraak, piekafvoer-oeverwaldoorbraak) geulen zich drastisch verlegden. In combinatie met bestaande numerieke modellen (gevoed met randcondities uit paleogeografische reconstructie), kunnen daarbij waterstandhoogtes en afvoergroottes worden afgeleid.
Onderzoeksveld Paleogeografie, fysische geografie, delta ontwikkeling, morfodynamiek rivier- en kustzone
Looptijd van het project 2007 - 2010
Deliverables 1. Reconstructie van afzettingen van extreme rivierafvoeren en stormvloedgedurende de afgelopen 5000 jaar 2. Schatting van magnitudes van extremen 3. Reconstructie paleo-overstroming en -afvoer op basis van numeriek model 4. Orde-grootte reconstructie van frequentie-magnitude relaties van extreme rivierafvoeren en stormvloed in de Rijn-Maas delta 5. Uitbreiding van de huidige ontwerpplijnen voor bescherming tegen overstroming in Nederland naar gebeurtenissen met extreem lange (orde 100-1000 jr) herhalingscycli, waardoor voor het Nederlandse waterbeheer een nauwkeurigere schatting van ontwerpwaterstanden mogelijk wordt
Formatieplaatsen (fte, aio/postdoc) 2 AIO's / postdocs
Contactpersoon (naam, instituut, e-mail) Dr. H. Middelkoop (UU); Dr. K.M. Cohen (UU)

Voorbeeld inrichting onderzoek

De aard van de onderzoeksprojecten (Aanpak 1, Aanpak 2) is: een combinatie van veld-reconstructie en hydrodynamische modellering. De ideale kandidaat (m/v) voor dergelijk onderzoek heeft een achtergrond in Aardwetenschappen (Fysische Geografie, Geologie, Bodem-Water-Atmosfeer, Civiele Techniek), heeft relevante onderzoek/studie ervaring in Kwartair Nederland en heeft affiniteit met modellering (gegevensbewerker en modelgebruiker, geen programmeur).

Typische werkzaamheden

- Jaar 1: Inlezen, 1e veldwerklocaties beargumenteerd selecteren, uitvoeren 1e veldwerk, Schrijven Literatuur-review. Oriëntatie op modelleringdeel. Trainingen/Cursussen.
- Jaar 2: Analyse 1e veldwerk, 2e veldwerklocaties beargumenteerd selecteren, Schrijven rapport/artikel n.a.v. 1e veldwerk. Uitvoeren 2e veldwerk. Inrichten en proefdraaien modellerings-omgeving. *Submitten* eerste artikel. Trainingen/Cursussen.
- Jaar 3: Integratie van gegevens: Analyse 1e en 2e veldwerk; koppelen velddata met modellering, Schrijven hoofdstuk/artikel n.a.v. 2e veldwerk, Schrijven rapport/artikel integratie veldwerken, integratie modellering en velddata. Congrespresentaties nationaal/internationaal.
- Jaar 4: Afronden analyses, Afronden hoofdstukken. *Submitten* tweede en derde artikel. Presentaties nationaal/internationaal op wetenschappelijk congres. Voor promovendi: afronden proefschrift (kop en staart om hoofdstukken/artikelen).

Pilot projecten als opvolging van dit vooronderzoek

Er kan gedacht worden, dit onderzoek in eerste instantie als een pilot project in te zetten.

- Bv. 1.5 jaar om IJssel casus (Aanpak 1) haalbaarheid verder aan te tonen (dateringen om hypothese te testen). Bij succes later uitbouwen naar promotie-studie.
- Bv. 1.5 jaar om 1 restgeul / 1 hoefijzermeer uit het delta-apex gebied (Aanpak 2) te selecteren en verder uit werken (lab werk, ontwikkeling methodiek trend van pulsen te onderscheiden). Bij succes later uitbouwen naar promotie-studie.

Indicatie benodigde budgetten

Basiskosten onderzoekers

Salaris onderzoeker - 4 jarig (incl. overhead, begeleidingskosten, geïndexeerd 2007)

- 250 k€ totaal over vier jaar, exclusief begeleidingskosten.

Veldwerkbudget, typisch 2 veldseizoenen voor een promotie onderzoek van 4 jaar

- veldwerk 20-30 kernen, handgeboord (aio + veldassistent)
 - ca. 5 k€
- [[ter vergelijking: 5 kernen, mechanisch geboord (uitbesteed)

- ca. 50 k€]]
- laboratoriumkosten (o.a. laserkorrelgrootte, L.O.I., geochemie)
 - ca. 10 k€

Dateringsbudget:

- 50 OSL dateringen = ~100 k€
- 50 ¹⁴C dateringen materiaal selecteren (uitbesteed) = ~5 k€
- 50 ¹⁴C dateringen meten (¹⁴C Utrecht, intern tarief) = ~30 k€

Office consumables, Computer, Congres-bezoek etc.

- ~8 k€ over 4 jaar

Bijdrage licenties modelleringsoftware

- ~2 k€ over 4 jaar

Totaal per onderzoeker ~410 k€

Buitengewone laboratoriumkosten

Uitgebreide bemonsteringscampagnes vereisen aanvullende budgetten. Als ingezet wordt op Aanpak 2 (§4.2), dan zal een bedrag aan laboratoriumkosten en dateringskosten moeten worden in begroot. Ter oriëntatie:

- 80 kernen; gem. 4 m restgeul opvulling traject (2 jaar veldwerk, door onderzoeker; logistiek: vervoer van/naar veld, koelruimte, veld-consumables)
- 320 m core scannen (+ logistiek: vervoer van en naar core scanner, koel opslag)
- 320 m per cm = ~32.000 samples L.O.I. en Laserkorrelgrootte (1 jaar lab tijd, door ondersteunend personeel, i.e. salaris kosten).

Lumpsum kosten 'frequentie'-deel: ca. ~100 k€.

- Pollen analyse: 10 kernen op 5-cm (*spot sampling*) detail
 - o = 40m x 20 spot samples
 - o = ~800 routine tellingen (evt. uit te besteden)
- ¹⁴C analyse: 40 v.d. 80 kernen selecteren voor datering
 - o 7 ¹⁴C dateringen per kern
 - o = 280 macro-determinaties (door specialist, i.e. salaris kosten)
 - o = 280 dateringen quantum-korting tarief voor ¹⁴C dateringen.

Lumpsum kosten 'datering'-deel: ca. ~150 k€

(of het dubbele hiervan als *alle* kernen worden gedateerd)

Totaalbudget

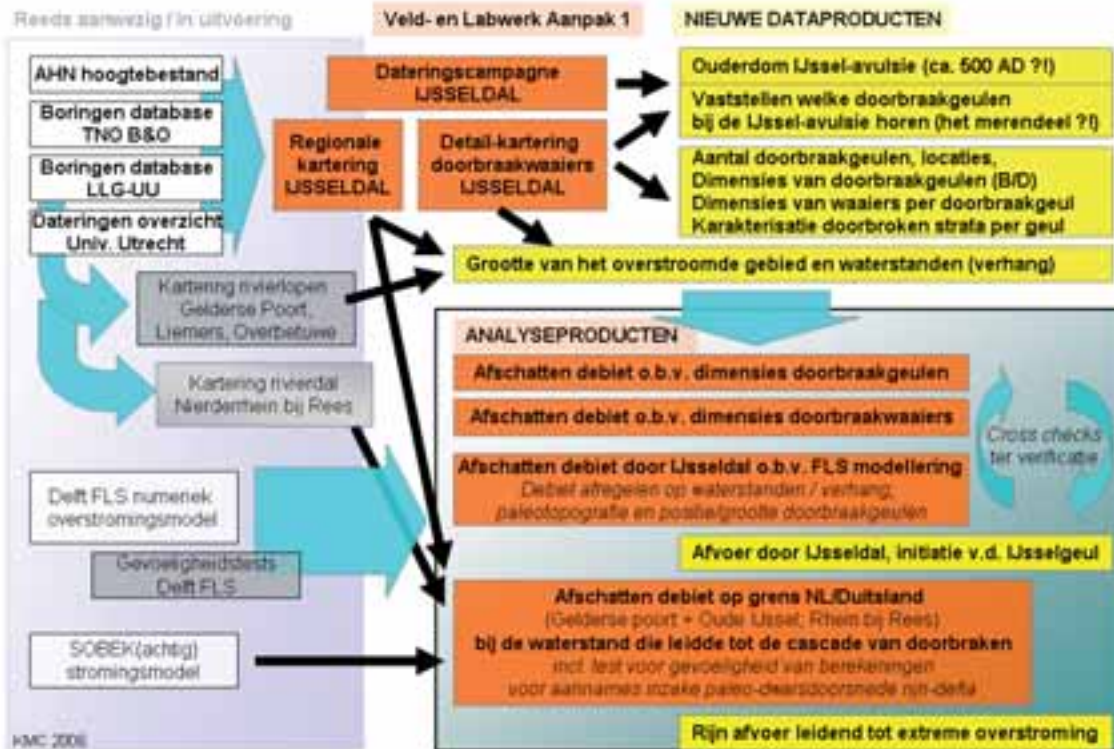
Twee onderzoekers + laboratorium ondersteuning voor Aanpak 1 en 2 gezamenlijk kost:

Onderzoeker 1:	410 k€
Onderzoeker 2:	410 k€
Laboratorium-werk:	250 k€

Totaal	ca. 1100 k€ in 4 jaar
	ca. 300 k€ per jaar

Flowcharts Aanpak 1 en Aanpak 2

Aanpak 1: Grootte van de IJsselvormende overstroming, ca. 1500 jaar geleden



Aanpak 2: Frequentieanalyse 5000 jaar overstromingen in de bovendelta

