

Overstromingen van de Rijn gedurende het Holoceen

**Relevantie van de grootste overstromingen voor
archeologie van het Nederlandse rivierengebied**



Overstromingen van de Rijn gedurende het Holoceen

Relevantie van de grootste overstromingen voor archeologie
van het Nederlandse riviereengebied

Kim M. Cohen^[1,2], Willem H.J. Toonen^[2,1], Henk J.T. Weerts^[3]

[1] Universiteit Utrecht, Dept. Fysische Geografie

[2] Deltares, Afdeling Toegepaste Geologie en Geofysica

[3] Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Afd. Landschap



Universiteit Utrecht



Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed
Ministerie van Onderwijs, Cultuur en
Wetenschap

1209091-000

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Ministerie voor Onderwijs, Cultuur en Wetenschap	1209091-000	1209091-000-BGS-0005	94

Trefwoorden
Rivierengebied, Overstromingen, Fysische Geografie, Archeologie

Samenvatting

Dit rapport relateert onlangs verworven kennis over de grootte en timing van zeldzaam grote overstromingen van de Rijn in Nederland en aangrenzend Duitsland aan toepassingen in de 'rivierarcheologie'. Sporen van bewoning van het rivierengebied liggen overwegend ingebed in oeverafzettingen van rivieren, die zijn afgezet tijdens overstromingen. Overstromingen zijn langs rivieren gewone, regelmatig terugkerende verschijnselen, maar niet iedere overstroming is even groot en extreem grote overstromingen komen onregelmatig voor.

Uit fysisch-geografisch onderzoek dat in de periode 2007-2013 vanuit de Universiteit Utrecht met partners is opgezet en uitgevoerd, is een tijdreeks met de grootste overstromingen van de Rijn in de afgelopen 8000 jaar beschikbaar gekomen (Proefschrift W.H.J. Toonen, 2013). Met het beschikbaar komen van nieuwe methodieken die een continu overzicht in het optreden van overstromingen scheppen – completer en generieker dan voorheen - lijken ook de mogelijkheden hiervan in archeologisch gebruik te zijn gegroeid. Dit was aanleiding te verkennen wat de aanbevolen manieren van zulk gebruik zijn.

Zowel voor prehistorische tijdvakken als voor de protohistorische en historische tijdvakken levert de ontwikkelde onderzoeksmethode een sedimentaire overstromingsgeschiedenis waarin juist de allergrootste events zijn aan te wijzen en van een datering worden voorzien (figuur 10, tabel 1, p. 41-42). Ingebed in sedimenten van normale overstromingen, zijn de afwijkende event-lagen herkend van onregelmatig terugkerende extreme overstromingen en op zeldzaamheid gerangschikt. Bij de huidige stand van onderzoek kan daarmee tot 8000 jaar terug van de allergrootste overstromingen – die zeldzamer dan eens per 500 jaar – de timing worden vastgesteld. Voor de jongste 1500 jaar is de resolutie van de tot nu toe verzamelde set gegevens groter, waardoor overstromingsevents met gemiddelde terugkeertijden van eens per 25 jaar individueel herkend konden worden.

Het in de tijd en in sedimentaire opeenvolgingen op archeologische sites kunnen aanwijzen van de allergrootste overstromingen, biedt nieuwe archeologisch-geologische dateringsmogelijkheden op site niveau ('event-stratigrafie'). Dat voegt resolutie en interpretatief detail toe aan de bewoningsgeschiedenis van nederzettingen langs rivieren in de delta. Het herkennen van markers van overstromingen op archeologisch onderzochte locaties kan ook verdere kwantificering van de grootte van (pre)historische overstromingen ten goede komen.

Patronen van bewoning hangen door alle archeologische perioden heen sterk samen met verleggingen van rivierlopen, die zich tijdens opeenvolgende overstromingen hebben voltrokken. In het laatste millennium voor Christus was de overstromingsintensiteit lager dan in het eerste millennium na Christus. Dat inzicht in de overstromingsgeschiedenis werkt door in paleogeografisch-archeologische reconstructies van veranderingen in de delta (vooral in de jongste 2500 jaar, gekoppeld aan het zich geleidelijk voltrekken van rivierverleggingen; tabel 2, p. 52-53) en is daarmee bruikbaar in synthetiserende archeologische studies. De invloed van overstromingen op de rivierdeltabewoners in de IJzertijd en Vroeg Romeinse tijd was vermoedelijk minder groot dan die in de Laat Romeinse tijd en de Vroege Middeleeuwen.

Titel
Overstromingen van de Rijn gedurende het Holoceen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap	1209091-000	1209091-000-BGS-0005	94

Auteursverantwoording

Dr. Kim M. Cohen is Universitair Docent aan de Universiteit Utrecht, departement Fysische Geografie. Vanuit het samenwerkingsverband Delta Evolution is hij sinds 2008 gastmedewerker bij Deltares, afdeling Toegepaste Geologie en Geofysica. Zijn betrokkenheid bij het paleogeografische onderzoek naar de Holocene Rijn-Maasdelta gaat terug tot 1998 (kartering Berendsen & Stouthamer, 2001). In 2007 verscheen het RIZA-rapport 'Paleogeografie en veiligheid tegen overstromingen' (Cohen & Lodder, 2007), dat de aanzet is geweest tot het promotieonderzoek van W.H.J. Toonen (2013) en voorliggend rapport.


Dr. Willem H.J. Toonen is wetenschappelijk onderzoeker aan de Universiteit van Aberystwyth (Wales, Verenigd Koninkrijk) op een in 2014 verworven Rubiconbeurs van NWO (ronde 2013-3) over 'Klimaatverandering en extreme rivierafvoeren in Europa'. Hij promoveerde op 4 oktober 2013 aan de Universiteit Utrecht op het proefschrift 'A Holocene flood record of the Lower Rhine' (Toonen, 2013). Dat promotieonderzoek werd door Deltares en de UU gefinancierd (2009-2013; promotor: Prof. Hans Middelkoop), als onderdeel van de Delta Evolutie samenwerkingsovereenkomst. In 2014 werkte Toonen in opdracht van de RCE namens Deltares aan voorliggend rapport (projectleiding: K.M. Cohen, A.J.F. van der Spek).

Dr. Henk J.T. Weerts is Specialist Fysische Geografie bij de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE), afdeling Landschap. Zijn ervaring met geomorfologische kartering van het rivierengebied gaat terug tot 1990 (Universiteit Utrecht). Later werkte hij voor de Rijks Geologische Dienst (tegenwoordig TNO - Geologische Dienst van Nederland). Sinds 2007 werkt hij voor de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Vanuit de programmalijs Eigenheid en Veiligheid binnen het programma Visie Erfgoed en Ruimte (programmaleider: Mw. Ellen Vreenegeoor) werkte hij mee aan voorliggend rapport.

Dit rapport maakt deel uit van het programma "Visie Erfgoed en Ruimte", deelprogramma "Eigenheid en Veiligheid" van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap.

Contact

K.M. Cohen	k.m.cohen@uu.nl; kim.cohen@deltares.nl
W.H.J. Toonen	wht1@aber.ac.uk
H.J.T. Weerts	h.weerts@cultureelerfgoed.nl

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Mrt. 2016	Kim M. Cohen, Willem H.J. Toonen, Henk J.T. Weerts		Gilles Erkens		Hanneke van der Klis	

Status
definitief

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Ministerie voor Onderwijs, Cultuur en Wetenschap	1209091-000	1209091-000-BGS-0005	94

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Sedimentaire registratie van overstromingen in geulvullingen	2
1.2	Doelstelling	5
1.3	Proefschrift Toonen (2013)	6
1.4	Onderscheid tussen normale en extreme <i>events</i>	7
1.5	Overstromingsgeschiedenis en bewoningsgeschiedenis	8
1.6	Leeswijzer	9
2	Kennispositie overstromingen, landschapsdynamiek en bewoningsgeschiedenis	11
2.1	Overstromingen van de Rijn	11
2.1.1	Stroomgebied en afvoerregiem	11
2.1.2	Waterkerende menselijke ingrepen	13
2.1.3	Ontbossing en klimaatschommelingen	13
2.2	Archeologie en overstromingen	14
2.2.1	Bewoning en benutting van het riviereengebied	14
2.2.2	Mesolithicum en Neolithicum	15
2.2.3	Bronstijd, IJzertijd, Romeinse tijd	16
2.2.4	Middeleeuwen	17
2.3	Landschapsverandering door overstromingen	18
2.3.1	Erosie- en depositieprocessen	18
2.3.2	Splitsingspunten en rivierverleggingen	19
2.3.3	<i>Extreme</i> overstromingen en landschapsveranderingen	20
2.4	Overstromingen <i>en</i> rivierverlegging	21
2.4.1	Stroomgordeldatering	21
2.4.2	Bijdrage van overstromings- <i>events</i> aan rivierverleggingen	23
2.4.3	Vroegmiddeleeuwse overstromingen en de Gelderse IJssel	25
3	Overstromingsgeschiedenis: methodiek en resultaten proefschrift Toonen	27
3.1	Probleembenadering	27
3.1.1	Overlappende gegevenssets voor prehistorische en jongere perioden	27
3.1.2	Keuze voor het apex-gebied	28
3.2	Methode-ontwikkeling	31
3.2.1	Selectie en bemonstering onderzoeklocaties	31
3.2.2	Opstellen ouderdom-diepte model	34
3.2.3	Metten van korrelgrootteverdelingen	36
3.2.4	Zeldzaamheid, absolute herhalingstijden en relatieve grootte	37
3.3	Resultaten	40
3.3.1	Overstromingschronologie en tabel met grootste overstromingen	40
3.3.2	Nauwkeurigheid van de ouderdom-dieptemodellen	40
3.3.3	Overstromingsgeschiedenis en archeologische periodisering	44

Titel
Overstromingen van de Rijn gedurende het Holoceen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap	1209091-000	1209091-000-BGS-0005	94
4 Gebruiksmogelijkheden van de reeks overstromingen in de archeologie			47
4.1 Bochtafsnijding en extreme overstromingen			48
4.1.1 Demonstratie: 4.7-ka meanderafsnijding bij Rheinberg (D)			48
4.1.2 Potentiële toepassing: Middeleeuwse meanderafsnijdingen			49
4.2 Avulsies en overstromingen 500 BC – 900 AD			51
4.2.1 Avulsiefasering en timing grootste overstromingen			51
4.2.2 500 BC – 200 AD: meer sediment, meer avulsie			54
4.2.3 200 AD – 450 AD: meer overstroming, nieuwe takken			56
4.2.4 450 AD – 900 AD: grotere overstromingen, doorzetten verleggingen			57
4.2.5 Oorzaak in toename sedimentlast, overstromingsintensiteit of allebei?			60
4.3 Lokale impact: overstromingslagen op archeologische sites			61
4.3.1 Romeins voorbeeld: overstroomde Limes-castella			61
4.3.2 Middeleeuwse overstromingen en stadsarcheologie			63
4.3.3 Casus 14 ^e eeuws Doesburg			64
5 Aandachtspunten bij het potentiële archeologische gebruik			69
5.1 Het herkennen van overstromingslagen in opgravingen			69
5.1.1 Doorwerken van dateringonzekerheid bij correlaties			69
5.1.2 Archeologische locaties als specifieke afzettingmilieus			69
5.1.3 Toepasbaarheid van correlaties op grootte in benedenstroomse gebieden			71
5.1.4 Onafhankelijkheid van het Maas overstromingsregiem			73
5.2 Betere datering uit gekoppeld geologisch-archeologisch onderzoek			74
5.2.1 Het verbeteren van verleggingsdateringen			74
5.2.2 Het verbeteren van dateringen van meanderafsnijdingen			75
5.2.3 Ockham's razor en correlatie van overstromingen en avulsies			76
5.2.4 Combinatiemogelijkheden met dendrochronologie			77
6 Conclusies en Aanbevelingen			79
6.1 Conclusies			79
6.1.1 De tijdreeks in huidige vorm			80
6.1.2 Bruikbaarheid in deelregio's van het Rivierengebied			80
6.1.3 Archeologische toepassing			82
6.2 Aanbevelingen			83
6.2.1 Toetsen en verbeteren van de nieuwe inzichten			83
6.2.2 Verder vergroten resolutie overstromingsgeschiedenis			83
6.2.3 Toevoegen geulvullingslocaties uit IJzertijd en Romeinse tijd			84
6.2.4 Combinerend verder inperken dateringonzekerheid van extreme events			85
6.3 Dankwoord			85
7 Referentielijst			86
8 Bijlagen			94
8.1 Bijlage A. Supplementary Materials / Gegevensuitwerking per locatie			94
8.2 Bijlage B. Manuscript Toonen et al. (to be submitted; under embargo)			94
8.3 Bijlage C. Published Article Toonen et al. (2015: Catena)			94
8.4 Bijlage D. Article In Press Minderhoud et al. (2016: Quat. Geochron.)			94

1 Introductie

Het Nederlandse rivierengebied is voor het overgrote deel het sedimentaire product van de Rijn in het Holoceen. In de delta functioneerden de rivierlopen als belangrijke transportaders en creëerden ze vruchtbare landbouwgronden. Het gebied wordt om die redenen al duizenden jaren door de mens benut, maar leven langs een rivier brengt ook het risico van overstromingen met zich mee. De bijna-rampen uit de jaren '90 van de 20^e eeuw zijn daar recente voorbeelden van, en uit het verdere verleden zijn er de zeer grote overstromingen van 1926, 1809, 1658 en 1374. Als schrikbeelden in de collectieve herinnering neigen zulke overstromingen in de loop der tijd te vervagen. Overstromingen en de veranderlijkheid van het rivierlandschap die ze veroorzaakten hielpen de archeologische neerslag van de aanwezigheid van de mens te begraven en te conserveren (natuurlijke conservatie).

De neerslag van oude grote overstromingen in sedimenten in het rivierengebied was van blijvender en objectievere aard dan de menselijke herinnering. Vooral de vullingen van oude geulen die op enige afstand van actieve rivieren in de overstromingsvlakte bestonden, blijken continue eeuwenlange sedimentaire archieven te bevatten. Doordat de sedimentaire archieven van meerdere locaties in de tijd gedeeltelijk overlappen, biedt het rivierengebied de mogelijkheid een duizenden jaren lange overstromingsgeschiedenis te reconstrueren (Cohen & Lodder, 2007). Deze kunnen als aanvulling gebruikt worden van de traditioneel in overstromingsgeschiedenis betrokken gegevens, waardoor de door de gegevens bestreken tijdspanne aanzienlijk verlengd kan worden: van 'de laatste 250 a 700 jaar' (metingen, historische gegevens) tot 'de laatste 8000 jaar' (samengestelde reeks van geulvullingen uit afgesneden bochten van opvolgende ouderdom; Toonen, 2013).

Doel van dit rapport is nieuwe archeologische toepassingen te verkennen, die recent verkregen nieuwe fysisch-geografische inzichten in de landschappelijke nalatenschap van overstromingen van de Rijn in het Rivierengebied mogelijk maken. Het gaat er daarbij om (i) de overstromingsgeschiedenis van de Rijn in het Holoceen samen te vatten, met aandacht op overblijvende onzekerheden; en (ii) te verkennen hoe die kennis over 'overstromingsgedrag van de rivier' archeologisch zinnig te koppelen is aan kennis over 'mensen langs rivieren'.

Het rapport is geschreven in opdracht van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, in het kader van het deelprogramma 'Eigenheid en Veiligheid' van het programma Visie Erfgoed en Ruimte. De verkenning in het rapport bestrijkt zowel toepassingen van inzichten in overstromingsgeschiedenis op het ruimtelijke schaalniveau van archeologische sites (aansluitend op de uitvoeringspraktijk van 'Malta'-archeologie), als op meer uitgezoomd schaalniveau zoals in regionale syntheses. De mogelijke toepassingen zijn er in daterende zin (ouderdommen van extreme overstromingen), in verklarende zin voor wat betreft ontwikkeling van rivierlandschap en bewoners (actie en reactie, van mens en natuur en vice versa), en in taphonomische zin (verklaren van preservatiegeschiedenis van een archeologische site). Startpunten in het rapport zijn de actuele fysisch geografische inzichten in het optreden van overstromingen van normale grootte (eens in de paar jaar terugkerend) versus extremen (*once in a life time* en nog zeldzamer), en de sedimentologische inzichten in hoe 'normale' en extreme overstromingen zich in geologische archieven als opeenvolgende afzettingen vastleggen en van elkaar onderscheiden.

1.1 Sedimentaire registratie van overstromingen in geulvullingen

Geulvullingen uit de overstromingsvlakte staan centraal in het recente overstromingsonderzoek aan de Universiteit Utrecht (Cohen & Lodder, 2007; Toonen *et al.*, 2012, Toonen, 2013; Toonen, 2015; Toonen *et al.*, 2015; Minderhoud *et al.*, 2016), waarop dit rapport voortbouwt. De sedimentaire registratie van overstromingen in de geulvullingen is het gevolg van aanvoer van riviersediment naar die locaties tijdens overstromingen. Water dat vanuit de riviergeul de overstromingsvlakte overspoelde, voerde het sediment over enige afstand mee, als suspensief (zwevend) transport. Tijdens het transport treden in de door de stroming gedragen sedimentlast ontmengings- en sorteringsprocessen op, die zorgen dat afzettingen van grotere overstromingen zich in samenstelling en hoeveelheden onderscheiden van die van normale.

Op plaatsen in de overstromingsvlakte waar de stroming afremde, bezinkt dat sediment. Vooral in laagtes in de overstromingsvlakte (of beter: in de waterkolom boven deze laagtes) is dat het geval (Box 1). De laagtes vangen daardoor sediment in en vullen er geleidelijk mee op. In de overstromingsvlakte zijn het vooral de lopen van oude afgesneden bochten die zulke laagtes vormen. In de diepste delen van die oude lopen, vangen de laagtes overstroming na overstroming betrekkelijk dunne laagjes sediment in. Tijdens een overstroming hebben deze laagtes een aanzienlijke grotere waterdiepte dan hun directe omgeving. In de bovenlaag van de overstromde geulvullingslocatie remt de stroming tijdens overstromingen af. Op zulke locaties bezinkt daarom juist daar en juist tijdens overstromingen relatief veel sediment (als een fluvio-lacustriene afzetting). In de loop van eeuwen bouwt zich zo een meters dikke geulvulling op.

Als de overstromingsvlakte niet overstromd is (en dat is het grootste deel van het jaar, als de vlakte überhaupt al jaarlijks overstromd), zijn de restgeullocaties in kleine meertjes in de overstromingsvlakte. Deze meertjes hebben vaak een specifieke gekromde bocht-vorm en worden daarom *oxbow lakes* genoemd (ook wel: hoefijzermere). Ook tussen de overstromingen door, bleven de overstromingslaagjes dus onder water op de bodem van een meertje bewaard. Dat was gunstig voor het ontstaan van een relatief ongestoord en continue sedimentair archief. Immers, op enige diepte onder de waterspiegel hebben bodemvormingsprocessen (uitdroging, rijping), doorworteling van planten en doorgraving door dieren (bioturbatie) veel minder vat op de afzettingen, en blijft de gelaagdheid van het sedimentatieproces bewaard. Hierdoor heeft het diepere deel van geulvullingen een karakteristiek onregelmatig afwisselend gelaagd uiterlijk (*facies*) waarop het afzettingsmilieu als een onderwater-afzetting in een lokaal meertje in een overstromingsvlakte herkend kan worden (fluvio-lacustriene afzettingen). Het geulvullingsproces loopt door totdat het negatieve reliëf met de omgeving vereffend is. De laagte is dan niet langer permanent water bevattend, en er accumuleert een ander type sediment (terrestrische *facies* bovenin volledige geulvullingen; Toonen *et al.*, 2012) dat door bodemvorming en bioturbatie minder geschikt is als continu sedimentair overstromingsarchief.

In boorkernen van geulvullingen op geschikte locaties tonen afzettingen van grotere overstromingen zich als mm tot cm dikke laagjes van afwijkende grofheid. Deze laagjes (laminaties, *flood-beds*) liggen ingeschakeld in fijn-korreliger afzettingen die tijdens opeenvolgende normale overstromingen zijn afgezet, in de perioden tussen zeldzamere grotere overstromingen. Van zulke locaties kunnen details in de korrelgrootte-verdelingen van opeenvolgende laagjes worden geanalyseerd en daarmee opgewerkt tot een overstromings-geschiedenis (Toonen, 2013). Uit de jongste eeuwen vormen ook dijkdoorbaakgaten (wielen) locaties waar op zeer vergelijkbare wijze een meervulling met overstromingslaagjes accumuleert (als zij aan de rivierzijde van de dijk liggen). De vullingen van wielen in de uiterwaarden zijn in het onderzoek dan ook in aanvulling op de restgeulvullingen gebruikt (Toonen *et al.*, 2015).



Foto 1. Suspensief transport kleurt overstromingswater in de uiterwaarden van de Nederrijn bruin. Hoogwater 1995, Wijk bij Duurstede, nabij km 924.700 rechter oever.

Bron: RWS beeldbank.
<https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/130597>

BOX 1 – Suspensief sedimenttransport en het uitzakken daarvan

Overstromingssediment wordt tijdens hoogwater in suspensie ('zwevend') met het water meegedragen. Het suspensief transport bestaat overwegend uit uiterst fijnkorrelig sediment: klei en silt. Maar tijdens grote piekafvoeren, als er op de overstromingsvlakte een grote waterdiepte is (Foto 1) en er hoge stroomsnelheden optreden, is er in het suspensief transport ook een bijmenging van fijne en matig-grove zandkorrels aanwezig.

Er is dus differentiatie in samenstelling van het sediment dat aan de overstromingsvlakte wordt aangeleverd: bij grotere afvoeren draagt het overstromingswater waar het de rivier verlaat meer grof sediment. Verdere korrelgrootte-differentiatie treedt vervolgens als gevolg van sedimenttransport over de overstromingsvlakte op. Op plaatsen in de overstromingsvlakte waar de stroming vertraagt, zakt een deel van het sediment uit suspensie uit. Grote aandelen van de grovere korrels (fijn zand, grof silt) sedimenteren al bij geringe vertraging van de stroming, terwijl het fijnste sediment pas in vrijwel stilstaand water begint te bezinken.

Op grotere afstand van de rivier is het suspensief transport over de overstromingsvlakte haar grove bijmenging daardoor goeddeels kwijt. Het sediment dat nog wel in het overstromingswater zweeft, zakt uit in luwte gebieden op relatief grote afstand van de rivier. Laagtes in de overstromingsvlakte die het hele jaar door water voeren zijn zulke luwte locaties, en blijven dat eeuwen lang bij iedere terugkerende overstromingen. Daar registreren de opeenvolgende overstromingsevents zich als afgevangen slib-laagjes en dat zijn dus ook de locaties waar dit onderzoek gebruik van maakt. Het sediment dat er tijdens echt grote hoogwaters uitzakt, heeft er op het hoogtepunt van de overstroming (zeg: het moment van passage van de piek van de afvoergolf) een afwijkende korrelgroottepopulatie (meer zandbijmenging) dan wat er bij normalere overstromingen aankomt en bezinkt.

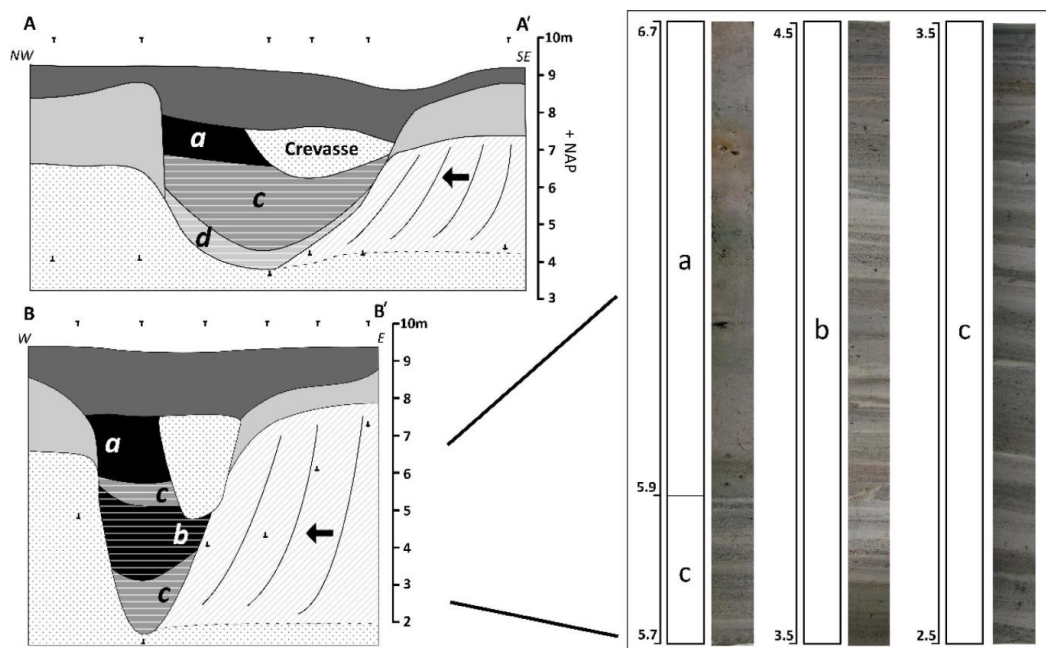
Uit een boorkern zijn de opeenvolgende laagjes van vele normale en af en toe een grotere overstroming als onregelmatig afwisselende dunnere en dikkere, donkerder en lichtere laminaties te herkennen. De differentiatie naar korrelgrootte versterkt zich op zulke locaties ook nog eens tijdens het bezinken van sediment tijdens het opkomen, hoogtepunt en wegzakken van het hoogwater. Zie ook Box 2 en 3 in Hoofdstuk 3.

In geulvullingen op grotere afstand van de rivier (distaal facies), zijn individuele laagjes van normale overstromingen relatief dun en niet altijd met het blote oog als individuele laagjes meer te herkennen (fig. 1). De laminaties van normale overstromingen zijn daar microscopisch dun, en kunnen door waterbodemplen en/of door golfslag met opeenvolgende dunne laagjes vermengd zijn geraakt. Bij zulke dunne laagjes, zal het fijne sediment dat de rivier aanvoerde zich vermengen met organisch materiaal dat in het meertje zelf geproduceerd werd (in perioden tussen overstromingen door, als de locatie een permanent meertje in de overstromingsvlakte was, met waterleven erin en plantenleven er langs). Op distale locaties raken de individuele laagjes van series normale overstromingen daardoor gebundeld tot relatief donkere kleiig-organisch sediment met een mm-tot-cm dikke gehomogeniseerde laagjes.

De laagjes van extreme overstromingen zijn dikker en minder gevoelig voor omwerking en daardoor ook in distale geulvullingen vaak juist wel macroscopisch (met het blote oog) zichtbaar. De grotere dikte van de laagjes van individuele extreme overstromingen, is de gecombineerde uitkomst van meerdere factoren die overstromingssedimentatie beïnvloeden.

Die factoren zijn:

- de relatief langere duur van de passage van de hele afvoerpiek bij grote overstromingen;
- de bij hoge piekafvoeren grotere hoeveelheid van bovenstreams aangevoerd sediment, waarbij de sedimentlast zowel bestaat uit nieuw afgespoeld sediment (uit allerlei delen van het achterland), als uit sediment dat in het rivierdal zelf opnieuw gemobiliseerd raakte;
- het krachtiger overstroomd raken van hogere zandbanken in de rivierbedding waardoor in de geul ook tot hoog in de waterkolom suspensief transport van zand plaatsvindt, en er met het water dat de bedding verlaat en de overstromingsvlakte overspoelt dus niet alleen de normale korrelgroottefracties van het zwevend transport (klei en silt) maar ook een aanzienlijke component zand.



Figuur 1: Voorbeeld van de lithologische opbouw van een restgeulinvulling (links) met (rechts) visueel herkenbare sedimentlaagjes, die afgezet zijn door individuele overstromingen (Toonen et al., 2012).

Tijdens een zeldzaam groot hoogwater is er in de geul dus een relatief grote sedimentlast te verwachten, waarin de spreiding aan suspensief gemobiliseerde korrelgroottes nog eens groter is dan bij normale overstromingen. Dit is in de moderne situatie met genormaliseerde rivieren (bedding met kribvakken) te zien in metingen gedaan tijdens het extreme hoogwater van 1995, in vergelijking tot de sedimentlast bij normale hoogwaters (Asselman *et al.*, 2003). In de situatie voor de normalisatie, toen er ook midden in de bedding nog zandbanken lagen, was het onderscheidend effect groter dan in de moderne situatie (Toonen *et al.*, 2015). Van deze eigenschap maakt het overstromingsonderzoek gebruik om in geulvullingen laagjes die tijdens extreme overstromingen moeten zijn afgezet aan te wijzen: het sediment tijdens extreme hoogwaters/piekafvoeren heeft een grovere staart in de korrelgrootteverdeling, dan dat van tijdens normale hoogwaters/piekafvoeren.

1.2 Doelstelling

Dit rapport focust op de timing en grootte van de grootste Rijn-overstromingen die het Nederlandse rivierengebied hebben getroffen, puttend uit het promotieonderzoek Toonen (2013). Het onderzoeksgebied in dit rapport is hetzelfde als dat in het proefschrift en bestrijkt het rivier-gedomineerde deel van de Rijndelta in Nederland en het meest benedenstroomse deel van het Rijndal in aangrenzend Duits gebied (Nordrhein-Westfalen).

Specifieke doelen van het rapport zijn om vanuit een fysisch-geografisch perspectief:

1. Die grote overstromingen in het verleden aan te wijzen, die getuige de *relatieve grofheid* van hun afzettingslaagjes te beschouwen zijn als markers en die getuige het *geografische* voorkomen van de registratie te beschouwen zijn als overstromingen die over de volle breedte van de riviervlakte van belang geweest voor de bewoningsdynamiek (extreem grote piekafvoeren, met een herhalingsstijd > 500 jaar). In het promotieonderzoek is het eerste bereikt door de korrelgroottekenmerken uit te drukken ten opzichte van laagjes met achtergrondwaarden en het tweede door een netwerk van meerdere sites te bemonsteren met verschillende afstand tot de destijds actieve rivier (Toonen, 2013).
2. Ten behoeve van gebruik in rivierkundige en archeologische zin, een zo nauwkeurig mogelijke schatting van de ouderdom en grootte van extreme overstromingen te presenteren, met een doorkijk op de landschappelijke doorwerking daarvan via riviervleggingen. Verkenning van de gebruiksmogelijkheden van de grootste overstromingen als *tijdgrenzen* in de sedimentaire opbouw van het rivierengebied en de daarin besloten archeologie (doelstelling 3) vereist een scherp inzicht in de dateringonzekerheid van de overstromingsreeks. Het rapport werkt detailgegevens uit Toonen (2013) daartoe verder uit, en presenteert ze in tabel en grafiek.
3. Het herkennen van afzettingen van extreme overstromingen in archeologische contexten te bediscussiëren: (i) op site niveau, zoals het in profielwanden aan specifieke extreme hoogwaters toeschrijven van truncaties van archeologische vondstlagen, en (ii) als delta-breed terugkerende/reproducerende patronen in de bewoningsgeschiedenis, voor zover die samenhangen met door overstromingen geïnitieerde veranderingen van het deltalandschap.

Wat het rapport vooral nieuw uitwerkt is de onderzoeksvraag: *wat het kunnen maken van onderscheid tussen 'normale' en 'extreme' overstromingen aan het verklarend begrip van archeologische observaties en constatering kan toevoegen.*

Daartoe worden er in het rapport twee toepassingen van archeologisch gebruik uitgewerkt:

1. Extreme overstromingen te betrekken als onderdeel van de verklaring van geconstateerde veranderingen in menselijk gebruik van het gebied langs de rivier.
2. De allergrootste overstromingen, waar zij markante sedimentaire fenomenen in archeologische sites langs de rivier achter lieten, te gebruiken als event-markers en vondstlaag-complexen van de sites daarmee scherper te dateren en onderling te correleren.

In het protohistorische tijdvak (Romeinse tijd en Vroege Middeleeuwen) bestaan er de nodige aan archeologie gerelateerde onderzoeksvragen over het ontstaan van rivierlopen: het beginnen van rivierverleggingen en vertakkingen, het uitgroeien van nieuwe takken tot grote rivieren en het verzanden en dichtslibben van (de ingangen van) oude riviertakken. Het optreden van netwerkveranderingen - avulsie: het ontstaan van nieuwe takken – houdt verband met het optreden van grote overstromingen. Grote overstromingen kunnen verleggingen in gang zetten en nieuwe splitsingen doen ontstaan, en ze kunnen de afvoerverdeling over splitsingen doen doorslaan. De nieuwe inzichten over de overstromingsgeschiedenis (verzameld in het meest bovenstroomse deel van de delta en aangrenzend Duitsland) kunnen nu vergeleken worden met eerder verzamelde gegevens over de avulsiegeschiedenis van de delta stroomafwaarts. Zo kan onderzocht worden hoe sterk de vermoedde samenhang tussen het optreden van extreme overstromingen en het slagen van avulsies in de Romeinse tijd en Vroege Middeleeuwen was – en of dit het inzicht in de datering van de stappen van rivierontwikkeling aanscherpt.

Met het gebruik van de sedimentaire overstromingsinformatie in archeologische contexten, wordt naar verwachting van de auteurs ook een wisselwerking tot stand gebracht die tot toekomstige verbetering van de inzichten in datering en grootte van individuele overstromingen en het voltrekken van rivierverleggingen kan leiden (t.o.v. de resultaten zoals ze in dit rapport worden gepresenteerd). De overzichtstabellen in Hoofdstuk 3, 4 en 5 geven daarom ook zo duidelijk mogelijk de overgebleven onzekerheid (speelruimte) in datering en grootte aan.

1.3 Proefschrift Toonen (2013)

Voortbouwend op de inzichten in de vorming van sedimentaire overstromingsarchieven in geulvullingen (§1.1), is een onderzoeksaanpak ontwikkeld waarmee één gedeelde langere *record* van overstromingen opgewerkt kon worden uit de detailgegevens van kernen van meerdere locaties met overlappende ouderdom (Cohen & Lodder, 2007). Doorontwikkeling en uitvoering van de aanpak heeft als een promotieonderzoek plaatsgevonden (Toonen, 2013; Universiteit Utrecht i.s.m. Deltares, TNO Geologische Dienst Nederland en VU Amsterdam).

Er is onder andere uitgezocht wat de typische afstand is die geulvullingslocaties tot de destijds actieve geul moeten hebben om grotere overstromingen individueel, en normale overstromingen als een kleig achtergrondsignaal te registreren. De geulvullingen van binnen korte tijd volledig afgesneden meanderbochten bevatten voor overstromingsreconstructie gunstiger sedimenten, dan geulvullingen van langzaam in onbruik geraakte aftakkingen (Toonen *et al.*, 2012). Naast het op hoge resolutie routinematig doormeten van de korrelgrootte van afzettingen, is ook veel aandacht besteed aan het verzamelen van dateringen op meerdere dieptes in de geulvullingen. Daarmee zijn tijd-diepte relaties opgesteld om aan ieder niveau in de boorkern een ouderdom toe te kennen, en de nauwkeurigheid daarvan te beschrijven. Om de uit boorkernen geëxtraheerde informatie te kunnen toetsen en kalibreren, zijn ook geulvullingen uit de Moderne Tijd en de Nieuwe Tijd onderzocht (teruggaand tot ca. 1550 en doorlopend tot in de 20^{ste} eeuw), zodat overlap ontstond met reeksen aan directe metingen van afvoer en waterstand (teruggaand tot 1772; Toonen, 2015) en met historische informatie (Toonen *et al.*, 2015).

Het bleek mogelijk een tijdreeks aan zeer grote overstromingen gemaakt, die tot 8,000 jaar terug reikt (Toonen, 2013), veel verder terug dan de directe meetreeksen en historische informatie. Het is een zodanig lange reeks, dat ze ook met de prehistorische archeologische tijdvakken vanaf het Neolithicum overlapt. Voor de periode tot 450 jaar geleden (c. 1550 na Chr.) is het ouderdom-diepte model afgeregeld op de bekende grootste overstromingen uit deze periode, en volgt de grootte uit de kalibratie van sedimentaire gegevens op de eerder

genoemde directe metingen van afvoeren en waterstanden, die voor de jongste eeuwen beschikbaar zijn (Toonen *et al.*, 2015). Voor de periode tot 700 jaar geleden (1300 na Chr.) is de datering afgeregeld op historisch bekende extreme hoogwaters. Voor de periode daarvoor zijn de sedimentaire gegevens en de dateringen van *events* in de tijdreeks een volledig nieuwe bron van informatie over relatieve grootte en ouderdom van grote overstromingen van de Rijn.

De gegevens waarop de overstromingsgeschiedenis zich baseert zijn vooral afkomstig uit het bovenstroomse deel van de Rijndelta (Betuwe, Gelderse Poort) en uit het Rijndal in Duitsland stroomafwaarts van het Ruhrgebied. Dit is het apex-gebied rondom het eerste (bovenste) splitsingspunt van de Rijndelta, dat sinds ongeveer 2500 jaar geleden bij Lobith ligt. De claim van compleetheit van het overzicht aan extreme overstromingen en de daaraan in Toonen (2013) en H3 verbonden berekening van de herhalingstijden, gelden voor het bovenstroomse deel van de Rijndelta en het benedenstroomse deel van het dal van de Beneden Rijn in Duitsland: het traject van Duisburg (*Niederrhein*) in Nordrhein-Westfalen, tot Tiel (Waal), Wijk bij Duurstede (Nederrijn) en Zutphen (IJssel) in Nederland. De geldigheid van de inzichten in de grootte van de overstromingen in meer stroomafwaartse gebieden in de Nederlandse delta wordt in het rapport apart bediscussieerd (H5: figuur 18 en tabel 3).

1.4 Onderscheid tussen normale en extreme *events*

Normale, grote en zeer grote overstromingen hebben zich gedurende het hele Holoceen voorgedaan, maar het optreden van 'extremen' is niet van alle tijden. In de tijdreeks zijn er perioden aan te wijzen waarin er relatief veel grote overstromingen zijn geweest – naast perioden van relatieve rust. Voor de pre- en protohistorische periode is dit nieuwe informatie; voor de historische periode is het aanvullende informatie die vooral betrekking heeft op de schatting van de bijbehorende afvoeren.

Zoals de titel van het rapport aangeeft, ligt de aandacht in dit rapport vooral op de allergrootste overstromingen. In de voor het rapport opgestelde overzichten (tabel 1 en 2, figuur 10), is de ondergrens voor de op te nemen 'extremen' enigszins arbitrair gelegd op de hoogwaters waaraan een herhalingstijd van minimaal 500 jaar werd toegekend. Dat wil zeggen dat de betreffende overstroming geacht wordt een piekafvoer te hebben gekend, die gemiddeld slechts eens in de 500 jaar overschreden werd¹. Van overstromingen die zo zeldzaam groot zijn, is het duidelijk dat ze waterstanden veroorzaakten die - in situaties zonder moderne dijken - de riviervlakte bovenstrooms van de lijn Oss-Tiel-Utrecht volledig deden overstromen. Dat maakt ook dat ze geacht moeten worden op alle in de betreffende periode registrerende locaties, zowel in zich vullende restgeullaagtes als op archeologische sites, tot sedimentaire registratie geleid te hebben. Voor deze extremen kan dus in een groot gebied de reproductie van het signaal van overstromingsgelaagtheid onderzocht worden (de geclaimde inzichten zijn toetsbaar). Waarschijnlijk kunnen ook de inzichten in overstromingen met herhalingstijden tussen 1/100 en 1/500 via testen op reproduceren getoetst worden, maar voor de allergrootste events, vanwege de veronderstelde hogere waterstanden en grotere uitgestrektheid van de overstroming kan dat makkelijker. Dit is een belangrijke reden om in dit rapport de (vermeende) ouderdommen en magnitudes van de allergrootste – en op toetsing van die resultaten in archeologische gebruikspraktijk aan te dringen.

¹ Oftewel, met een jaarlijkse kans op overschrijding van 1/500. Ter vergelijking: het maatgevend hoogwater voor de rivierdijken is in de Wet op de Waterkering gekoppeld aan een piekafvoer van 1/1250 jaarlijkse kans. De afvoergrootte die bij de uitvoering van de wet (cycli van veiligheidstoetsing en dijkonderhoud) wordt gehanteerd is 16.000 m³/s (bij Lobith). Dit is een extrapolatie (onzekerheid: ca. 20%), die zich op de waarnemingsreeks vanaf 1901 baseert. Daarin was de grootste piekafvoer met ca. 12.600 m³/s die van 1926 (meetnauwkeurigheid: ca. 10%). Toonen (2015, gebaseerd op Toonen, 2013:H2) kwantificeert de veranderingen in zulke afschattingen (en hun onzekerheid) bij verlenging van de meetreeks tot 1772 (1/1250 ca. 10% lager).

In meer benedenstroomse, zich breder uitstreckende delen van de delta geldt niet automatisch dat zulke overstromingen het land overal volledig overstroomden, vanwege een toenemende ruimte voor de natuurlijke berging van water en in de tijd variërende afvoerverdeling over het veranderlijk vertakkende rivierennetwerk van de delta (Cohen & Lodder, 2007; Kleinhans *et al.*, 2013a; Toonen, 2013). Het is daarom niet uit te sluiten dat een en de zelfde afvoer langs sommige takken als een relatief zware, en langs andere takken als een relatief minder zware, overstroming geregistreerd wordt. Reeksen overstromingslaagjes uit benedenstroomse sedimentaire archieven zijn daarmee dus niet 1:1 met registratie in nauwere bovenstroomse delen van het rivierengebied in verband te brengen. Weliswaar mogen de grotere rivieroverstromingen ook benedenstrooms verwacht worden tot herkenbare afzettingen geleid te hebben, maar daar zijn het niet noodzakelijkerwijs de allerbelangrijkste events geweest.

Verder is in de onbedijkte situatie de waterstand die een zeer grote rivierafvoer in het benedenstroomse gebied veroorzaakt slechts marginaal hoger dan die bij 'normale' overstromingen, als gevolg van de grotere breedte van de overstromingsvlakte. En dan geldt ook nog eens dat in het benedenstroomse gebied van de delta, de waterstanden en terugkeerfrequenties van overstromingen beïnvloed zijn door storm- en getijdeopstuwings-effecten die vanaf de kust stroomopwaarts werken, en dus gevoelig zijn voor veranderingen in de geometrie van de riviermondingen (bijvoorbeeld: Vos, 2015). Al met al geldt dat een reeks uit het bovenstroomse deel van de delta wat betreft ernstige rivieroverstromingen steevast de meer uniforme zal zijn. Benedenstrooms is de overstromingsgeschiedenis gecompliceerder.

1.5 Overstromingsgeschiedenis en bewoningsgeschiedenis

Er bestaan uitvoerige beschrijvingen van schade door rivierhoogwaters uit de Late Middeleeuwen en de Nieuwe Tijd die het rivierengebied van Nederland hebben overspoeld. Daaruit is tamelijk duidelijk op te maken wat het overstromingsrisico was voor menselijke bewoning op de oevers, in de overstromingsvlakten, op dijken en in polders langs de rivieren. Zo zijn er talloze voorbeelden (voor overzichten zie: Driessen, 1994; Buisman, 1996; 2000) van complete dorpen die in het verleden verzvolgen zijn door de Rijn; zoals Alt-Ürdingen (nabij Krefeld) in 1658 na Chr., Doornik (nabij Lent) in 1799 na Chr. en Persingen in de Ooijpolder in 1809 na Chr. Compilaties van overstromingsschade uit historische bronnen en overzichten van grote rivierhoogwaters zijn in het onderzoeksgebied redelijk compleet vanaf de 14^e eeuw (Glaser & Stangl, 2003); vooral de grotere overstromingen zijn vanwege de impact uitvoerig gedocumenteerd en kunnen dus als compleet worden beschouwd in het historisch archief.

Over de impact van zulke gebeurtenissen op de lokale bevolking en bewoningsplekken, en of en hoe men daarop reageerde, is voor pre- en protohistorische perioden veel minder bekend. Met het beschikbaar komen van een langere geschiedenis aan overstromingen van de Rijn, en de rijkdom aan archeologische onderzoekslocaties in het Nederlandse rivierengebied in ogenschouw nemend (bijvoorbeeld: Arnoldussen, 2008), lijkt gericht onderzoek naar de invloed van overstromingsgebeurtenissen op bewoningsgeschiedenis zich nu te kunnen gaan uitstrekken tot de laatste duizenden jaren - aanzienlijk verder terug dan de 600 à 700 jaar die door historisch bronmateriaal gedekt was. Deze onderzoeksmogelijkheden worden in dit rapport verkend.

Het beschikbaar komen van een langere geschiedenis aan overstromingen lijkt het ook mogelijk te maken de kennis over de *timing* en oorzaken aan te scherpen van de rivierverleggingen in de delta (avulsies; zie bijvoorbeeld Stouthamer, 2001; Berendsen & Stouthamer, 2001; Makaske *et al.*, 2008; Cohen *et al.*, 2012). Deze hebben op de bewoningsgeschiedenis van de delta doorgewerkt, via verandering in transportmogelijkheden (bijvoorbeeld: Lanen *et al.*, 2015a; b; Groenhuijzen & Verhagen, 2015) maar ook omdat

nieuwe takken herverdeling van overstromingsrisico met zich meebrengen (bijvoorbeeld: Kleinhans *et al.*, 2012; 2013; Cohen *et al.*, 2014a).

Vooraf de verleggingen in de Romeinse tijd en de Vroege Middeleeuwen springen hierbij in het oog (Jansma *et al.*, 2014), omdat zij bepalend zijn geweest voor de hoofdrichting van het cultuurlandschap dat het rivierengebied geworden is. Dit heeft directe relevantie voor het proces van bedijking in de 'Volle' Middeleeuwen en daarmee met de archeologie van de uiterwaarden (Cohen *et al.*, 2014a). Maar ook het gefaseerd verlaten raken van voormalige hoofdtakken in de tegenwoordige polders, waar vindplaatsen uit de Bronstijd, IJzertijd, Romeinse tijd en Vroege Middeleeuwen liggen, kan mogelijk scherper begrepen worden uit het combineren van dateringen op archeologische sites en de reeks van grootste Rijn overstromingen. De relevantie van de nieuwe inzichten in de overstromingsgeschiedenis voor de aanscherping van begindateringen en faseringen van rivierverleggingen wordt daarom ook verkend in dit rapport.

1.6 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 (Kennispositie: overstromingen, landschapsdynamiek en bewoning) geeft een actueel overzicht van de inzichten in de rol van overstromingen op de geologische opbouw en de archeologie van het rivierengebied, met verwijzingen naar recente literatuur. Het hoofdstuk is bedoeld als achtergrondinformatie, waaraan in verdere hoofdstukken de nieuwe inzichten over de grootte en ouderdom van specifiek aan te wijzen overstromingen worden toegevoegd. Het hoofdstuk positioneert en verantwoordt ook de wijze waarop de nieuwe informatie over overstromingen met eerder karterend onderzoek in het rivierengebied gecombineerd kan worden, bijvoorbeeld in de datering en fasering van rivierverleggingen. Dat laatste krijgt aandacht om dat het grootschalige landschapsveranderingen betreft, die de verspreiding en aard van bewoning over van de delta gelijktijdig veranderden.

Hoofdstuk 3 (Overstromingsgeschiedenis: methodiek en nieuwe resultaten) bevat de Nederlandse samenvatting van de aanpak en resultaten van het onderzoek uit het proefschrift Toonen (2013) en dan vooral van het slothoofdstuk over de 8000-jarige reeks van extreme overstromingen. Het hoofdstuk begint met het samenvatten van de verworven set aan basisgegevens (bijlage A) en de methodologische aspecten van het opwerken van korrelgroottegegevens tot relatieve overstromingsgrootte en van dateringen uit boorkernen tot tijd-diepte relaties. Dat deel is op de eerdere hoofdstukken uit het proefschrift Toonen gebaseerd. De basisgegevens (ouderdomsmodellen per onderzoekslocatie) en de integratie tot de 8000-jarige reeks (kruiscorrelatie van de grootste overstromingen tussen de onderzoekslocaties) zijn ten behoeve van het artikel en het voorliggende rapport verder gedocumenteerd. Ze zijn ook nog eens kritisch bezien op onzekerheid van datering en kruiscorrelatie. In bijlage A wordt dus aanvullende informatie over die individuele onderzoekslocaties gepresenteerd, t.o.v. de oorspronkelijke appendix in Toonen (2013).

Bijlage A is een engelstalige bijlage omdat ze ook als *Supplementary Materials* voor het artikelmanuscript in bijlage B dient. Die bijlage B betreft een parallel aan het schrijven van het rapport bewerkte versie van het slothoofdstuk uit Toonen (2013). Dit manuscript (nog onder embargo op het moment van verschijnen van het rapport) wordt los van deze rapportage en met een afwijkende groep auteurs ter peer-review ingestuurd naar een internationaal vaktijdschrift. De tekst van de uiteindelijk voorziene publicatie (na verwerking commentaar peer-review), verschilt mogelijk van de versie in dit rapport. Twee eerdere hoofdstukken uit het proefschrift, zijn in 2014 als artikel ingediend en inmiddels geaccepteerd en verschenen. Deze artikelversies zijn als bijlagen C en D opgenomen.

Hoofdstuk 4 (Gebruiksmogelijkheden van de reeks overstromingen in de archeologie) bevat de verkenning naar toepassingen van de nieuwe informatie over extreme overstromingen in de archeologische praktijk. Beschreven wordt op welke wijze overstromings-event-stratigrafie in de Rijn-Maas delta bruikbaar is voor archeologisch onderzoek. Het hoofdstuk stipt steeds toepassingen aan en positioneert de mogelijkheden tot vervolgonderzoek. Het hoofdstuk begint met toepassingen die tot beter dateren, faseren en begrijpen van landschapsverandering moeten leiden (zoals bochtafsnijdingen en rivierverlegging: lokale resp. regionale rivierdynamiek) en zoomt daarna in op toepassingen van inzichten in grootte en timing van extreme overstromingen op archeologische opgravingslocaties langs rivieren ('lokale archeologische toepassing'). Het hoofdstuk beperkt zich in de mate van uitwerking omdat daarvoor vooral interdisciplinaire uitwisseling tussen archeologen en fysisch geografen in die uitwisseling geconcentreerde aandacht op lokale details 'per site' vereist.

Hoofdstuk 5 (Aandachtspunten bij het potentiële archeologische gebruik) benadrukt dat de verkenning in Hoofdstuk 4 vooral als eerste aanzet bedoeld zijn en geeft kaders voor het aangedragen potentiële gebruik. Ook dit hoofdstuk dekt toepassing op lokale schaal ('een opgraving in het riviereengebied') en op regionale schaal ('verandering van rivierennetwerk, doorwerkingen op bewoningspatronen').

Hoofdstuk 6 presenteert puntsgewijs de belangrijkste conclusies en aanbevelingen. Het rapport belicht grote overstromingen zowel (i) 'als oorzaak van veranderingen' en (ii) 'als scherp begrensde gebeurtenis' om mee te dateren, te correleren en om landschappelijke en archeologische processen die zich over langere tijd voltrokken hebben mee te kunnen faseren (onderverdelen van tijd, leggen van cesuren). De aanbevelingen richten zich vooral op het – dankzij archeologisch gebruik – in de toekomst verder kunnen toetsen en verbeteren van de overstromingsinzichten. Het idee is dat de inzichten in de ouderdom en grootte van de meest extreme overstromingen als bijproduct van archeologisch gebruik 'bevestigd' kunnen worden. Het bereikte inzicht in overstromingsintensiteit van normale overstromingen (en relaties met klimaatschommelingen en bewoningsveranderingen) en de bereikte dekking in historische resp. prehistorische perioden worden ook aangestipt. In het rapport zijn in voetnoten kruisverwijzing naar lopende onderzoeksprojecten opgenomen.

2 Kennispositie overstromingen, landschapsdynamiek en bewoningsgeschiedenis

Omdat het rapport met de reeks van grootste overstromingen volgens het sedimentaire archief een nieuwe primaire gegevensbron in de praktijk van het karterings- en dateringsonderzoek introduceert, wordt – vooraf aan de eigenlijke presentatie van gegevens en beoogd archeologisch gebruik in de hoofdstukken 3 en 4 – in dit hoofdstuk enige inkadering en theoretische onderbouwing van de verkende nieuwe toepassingen gegeven.

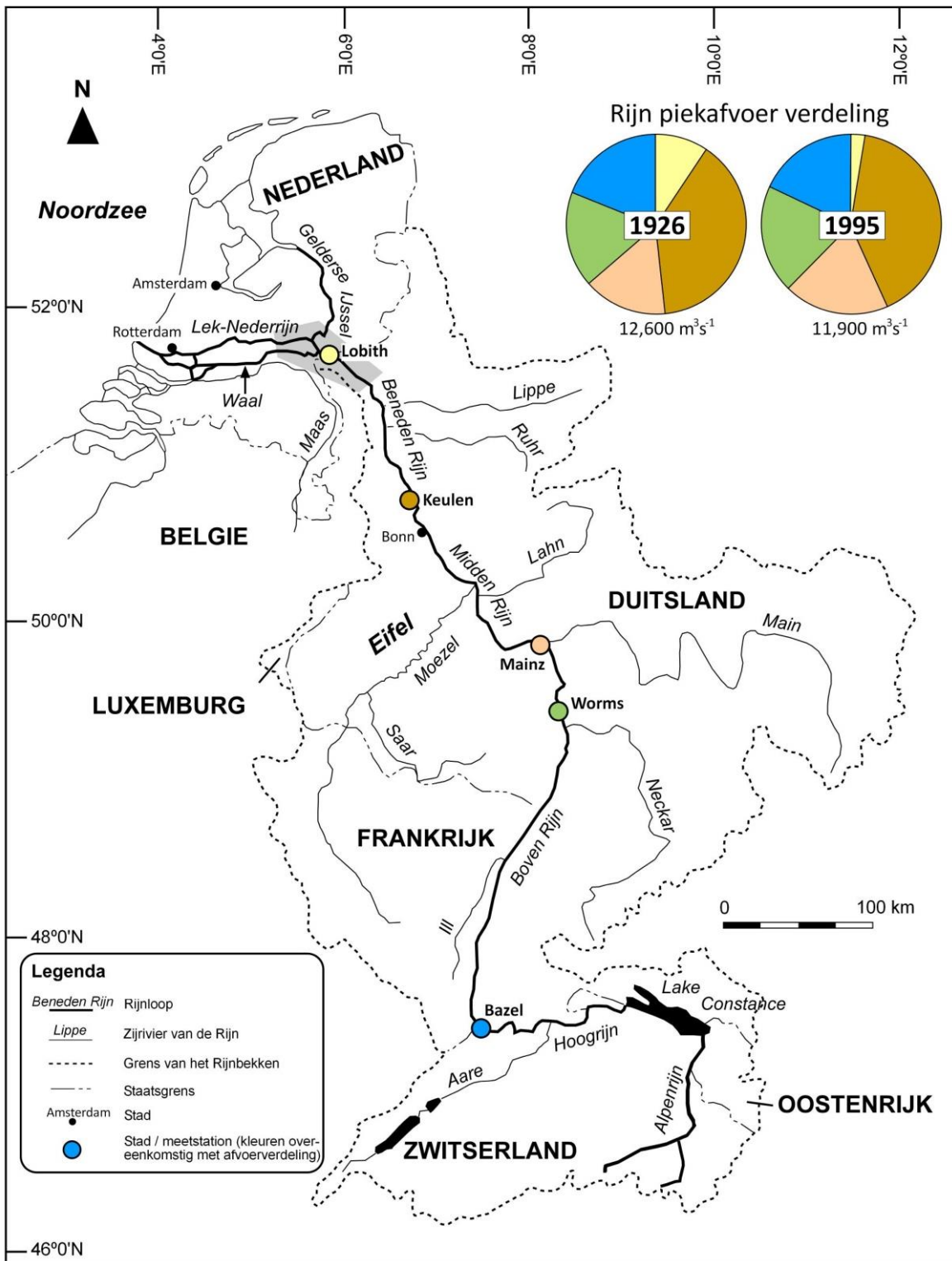
Om de impact van overstromingen op pre- en protohistorische gemeenschappen in de Rijn-Maas delta en het IJsseldal te kunnen onderzoeken, wordt een kort overzicht gegeven van de werking van natuurlijke erosie- en sedimentatieprocessen (§2.1), van de opeenvolgende archeologisch onderscheiden bewoningsfasen in het Riviereengebied (§2.2), en van de veranderlijke interactie tussen menselijk handelen en die processen, vooral waar gepaard aan rivierlandschapsveranderingen (§2.3). Paragraaf §2.4 gaat in op het koppelen van de ouderdomsinformatie over grote overstromingen (als nieuwe informatie) aan bestaande overzichten van ouderdommen van rivierverleggingen en stroomgordels (uit de fysisch-geografische karteringstraditie in de delta).

2.1 Overstromingen van de Rijn

2.1.1 Stroomgebied en afvoerregiem

De Rijn wordt gevoed door de neerslag die over een groot gebied van noordwest Europa valt, zich via zijrivieren verenigt tot de hoofdloop door Nordrhein-Westfalen naar Nederland. Die hoofdloop vindt haar bron in de Alpen, en strekt zich vanaf daar ruim 1200 kilometer uit tot de monding in de Noordzee. Het grootste deel van piekafvoeren in het voorjaar wordt opgewekt door sneeuwsmelt en regenval in het stroomgebied van de Moezel, Main en Neckar, die zich optellen bij een eveneens aanzienlijke, trager fluctuerende afvoer van neerslag en smeltwater van gletsjers uit de Alpen (fig. 2).

Extreem hoge piekafvoeren in de Rijn in Nederland, worden in het Rijnstroomgebied door een combinatie van oorzaken opgewekt: (i) een winter waarin in een groot deel van het achterland veel sneeuw is gevallen, die is blijven liggen totdat het in een korte periode massaal afsmelt, (ii) intense regenval door zware Noord-Atlantische depressies, die bijdragen aan snelle sneeuwsmelt maar ook extra afvoer genereren (Jacobeit *et al.*, 2003), (iii) een bodem waarin water niet kan infiltreren in de ondergrond, hetzij door bevriezing of door verzadiging, zodat het direct zal afstromen via het oppervlak, en (iv) het samenvallen van de afvoergolven uit verschillende grote zijrivieren, vooral de Boven Rijn, Moezel, Main en Neckar (Disse & Engel, 2001). De kans hierop is het grootst van januari tot eind maart (Ten Brinke, 2005). In de meest ongunstige omstandigheden wordt geschat dat de Rijn in de huidige situatie op de apex van de delta (Lobith) een afvoer groter dan $\sim 15,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ genereert (Herget & Meurs, 2010; Toonen, 2013).



Figuur 2: Stroomgebied van de Rijn en ligging van onderzoeksgebied (in grijs; het apex-gebied van de Rijndelta). De herkomstverdeling van bijdrages aan piekafvoeren van de Rijn bij Lobith wordt getoond in de taartdiagrammen, voor de twee grootste afvoeren uit de 20^{ste} eeuw (naar Silva et al., 2001). Grote piekafvoeren ontstaan door het gelijktijdig arriveren van afvoeren die in het stroomgebied van de Boven Rijn (Zuid Duitsland en Alpen) maar vooral ook in Midden Duitsland en oost Frankrijk (Moezel, Main, Neckar) zijn gegenereerd.

2.1.2 Waterkerende menselijke ingrepen

De mens heeft een belangrijke invloed gehad op de grootte en impact van overstromingen. Door overstromingsvlakten te bedijken, in Nederlands grotendeels voltooid in de 13^e eeuw (Hesselink, 2002), is de bergingscapaciteit van de riviervlakte sterk afgenomen. Een direct gevolg daarvan is dat de waterstanden bij hoogwater sterk in hoogte zijn toegenomen; bij een gegeven piekafvoer (bijvoorbeeld $10,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, zoals tegenwoordig enkele keren per eeuw optreedt) moet eenzelfde volume water wordt immers over een kleiner oppervlak verdeeld dan voor de aanleg van dijken. Door het grote verschil in hoogte tussen de waterspiegel in de uiterwaarden en het maaiveld achter de dijken, traden herhaaldelijk dijkdoorbraken op. Dit had de nodige sociale en economische gevolgen (lokale en regionale catastrofes) die de bewoners deden besluiten tot ronden van verdere versterking (verhoging) van de dijken.

Het sinds de Late Middeleeuwen inperken van de breedte van de overstromingsvlakte tot de uiterwaarden langs de bedijkte rivier, en vervolgens het in de loop van de Nieuwe Tijd normaliseren van rivierbedding (o.a. het doorgraven van meanderbochten om de vaargeul te verkorten) hebben ook geleid tot een snellere stroomafwaartse verplaatsing van de afvoergolf. Die afvoergolven werden afgeremd door de ruwheid in de bedding en de overstromingsvlakte. In recht getrokken delen van Rijn en zijrivieren kan de afvoergolf de benedenstroomse gebieden tegenwoordig sneller bereiken dan vroeger het geval was. In bovenstroomse delen van het stroomgebied is dit gunstig voor het draineren van hoogwaters, maar in het onderzoeksgebied (Nederland, Nordrhein-Westfalen) maakt het dat afvoerpieken wat hoger zijn geworden dan ze bij gelijke neerslag in het achterland vroeger zouden zijn geweest.

2.1.3 Ontbossing en klimaatschommelingen

Op de langere tijdschaal heeft prehistorische ontbossing van het achterland al vanaf het Neolithicum (Kalis *et al.*, 2003) de hoeveelheid afvoer die vanuit het achterland gegenereerd wordt beïnvloedt. Naarmate er meer bossen werden gekapt om ruimte te maken voor landbouwgrond, stroomde neerslag sneller, geconcentreerder en in grotere hoeveelheden af richting rivier (Dikau *et al.*, 2005). Enerzijds kwam dit omdat het water minder effectief vast werd gehouden door de vegetatie, anderzijds doordat het neerslagoverschot toenam. Dit heeft erin geresulteerd dat een vergelijkbare hoeveelheid neerslag door de tijd heen meer rivierafvoer genereerde, en dat dus benedenstrooms overstromingen in absolute grootte en frequentie toe zijn genomen. De invloed van de ontbossing reikte verder dan alleen op de afvoer van water. Ook de sedimentlast van de rivier werd er geleidelijk door verhoogd (Hoffmann *et al.*, 2007; 2009; Erkens, 2009).

Voor wat betreft klimaatschommelingen, zoals langjarige schommelingen in de gemiddelde ligging van polaire fronten en de straalstroom en de routes van neerslag-brengende depressies naar het stroomgebied van de Rijn, dient opgemerkt te worden dat die de kans van optreden van middelgrote overstromingen wel wat beïnvloeden, maar dat dit voor de veel zeldzamere allergrootste overstromingen anders kan uitwerken.² In de Kleine IJstijd (hier ruim gedefinieerd als de periode tussen 1300 en 1850 na Chr.; Glaser & Stangl, 2003) kwam daar nog bij dat in de bedijkte rivieren veelvuldig ijssdammen gevormd (Middelkoop, 1997; Hesselink, 2002; Ten Brinke, 2005). Na strenge winters met ijsvorming op de rivier kunnen ijsschotsen opstapelen en een vernauwing van de watervoerende geul tot gevolg hebben. Indien er ook een hoge afvoer is, komt er op plekken waar de ijsschotsen zich verzamelen een hoge druk op de oevers/dijken te staan, welke juist daar dan doorbreken. Dit verhoogde

² Voor de timing van de allergrootste hydrologische gebeurtenissen binnen de laatste 8000 jaar viel vooralsnog geen overduidelijk verband te ontdekken met klimatologische reconstructies (Toonen, 2013). Omdat dit rapport zich focust op die allergrootste overstromingen, gaat de tekst hier niet nader in op klimaatreconstructie en -gevoeligheid gericht onderzoek met de Rijn-overstromingsreeks (zie daarvoor: Toonen, 2013; Toonen *et al.* 2016).

lokaal de waterstand en verzwakte de dijken, waardoor relatief lage afvoeren konden leiden tot grote overstromingsrampen.

Die impact van de ijssdammen in de Kleine IJstijd, was het gevolg van de combinatie van de strenge winters en de aanwezigheid van dijken. Daarbij waren het de dijken die maakten dat de dammen en het opgestuwde water bovenstreams ervan bovennatuurlijk hoog konden reiken. Er zijn echter enkele antieke bronnen uit de Laat Romeinse tijd (Herodianus, *Crisis in Rome (Ab excessu divi Marci)*, 6.7.6-7; Hiëronymus van Stridon: Epistel 123), die in de 3^e, 4^e en 5^e eeuw al een incidenteel bevroren Rijn beschrijven (Kulikowski, 2000). Door een combinatie van opwarming van het rivierwater in de laatste eeuw door directe menselijke invloed (industriële gebruik, koelwaterlozingen) en opwarming van het klimaat, en ook door de vaargeul-normaliserende maatregelen, is de kans op ijsvorming op de grote rivieren in de 20^{ste} eeuw weer sterk afgenomen.

De combinatie van dijken en ijssdamvorming maakt dat in de Kleine IJstijd de relatie tussen grootte van afvoeren, waterstanden in de verschillende Rijntakken, en de opgetekende schade van overstromingen niet eenduidig is (Ten Brinke, 2005; Glaser & Stangl, 2003). Bij analyse van historische- en sedimentaire archiefinformatie moet daar rekening mee worden gehouden. Om eenduidige relaties tussen piekafvoer en waterstand vast te stellen – en ze vervolgens met korrelgrootte-metingen te confronteren, moeten zowel uit de waarnemingsreeks als uit het sedimentaire archief de jaren met ijssdammen uitgezonderd worden (Toonen *et al.*, 2015). Om eenduidige relaties tussen opgetekende schade en piekafvoer af te leiden, geldt het zelfde. In het overstromingsonderzoek voor de Rijn heeft het gunstig uitpakken van de jaren met ijssdamvorming historisch bijzonder goed bekend waren (Gottschalk, 1971; Buisman, 2010) – waarmee dus ook bekend is welke verdere extreme overstromingen/hogwaters niet aan opstuwingseffecten door ijssdammen geweten kunnen worden maar met zekerheid op het conto van bijzonder grote debieten uit het achterland (e.g. Herget & Meurs, 2010: hun tabel 1). Bovendien moet de impact van een ijssdam-gerelateerde dijkdoorbraak en overstroming in de Kleine IJstijd vele malen groter worden geacht dan die tijdens een strenge winter in de oudheid, in de natuurlijke situatie met lagere oevers en dus een kleiner hoogteverschil tussen rivierwater en achterland.

2.2 Archeologie en overstromingen

2.2.1 Bewoning en benutting van het riviereengebied

Menselijke bewoning en benutting van riviereengebieden is gekoppeld aan de structuur van het landschap. Dat landschap is een van tijd tot tijd overstromende vlakte met subtiele hoogteverschillen, die wordt doorsneden door de geulen van de actieve rivieren (de rivierbeddingen, geflankeerd door oeverwallen). Als gevolg van het herhaald overstromen is dit landschap veranderlijk. De bewoners van het landschap maken op diverse wijze gebruik van de verschillende elementen in het landschap, waarvan sommigen al van oudsher aanwezig waren (rivierduinen, terrasranden) en andere in de loop der tijd in aanwezigheid van de mens nieuw ontstonden. Zulke nieuwe landschapselementen zijn bijvoorbeeld ruggen, laagtes, grotere en kleinere watervoerende geulen, vloedbossen, moerassen, zandbanken, meren, poelen.

Bewoners van rivieregebieden leven met het gegeven dat de rivier van tijd tot tijd op normale wijze overstroomt en in incidentele gevallen op extreme wijze (uitgestrekter, langduriger). De aanwezigheid van mensen in de delta is zo oud als de delta zelf: de mens was al in Nederland aanwezig voordat de Holocene delta ontstond. Voor niet-archeologen geeft deze

paragraaf een zeer beknopt overzicht van de opeenvolgende archeologisch onderscheiden bewoningsfasen³.

Als grote rivieren, zijn hoofdtakken van de Rijn in meerdere archeologische perioden een belangrijke culturele grens geweest, waar ze dan ook precies lagen. Archeologische onderzoekstradities leggen graag culturele grenzen in het gebied (in de beschrijving van Mesolithische en Vroeg Neolithische culturen bijvoorbeeld; Louwe Kooijmans, 2005; Amkreutz, 2013). Ook vroegere bewoners gebruikten de rivier graag als grens. Dit uit zich tot op heden in historisch, sociaal-cultureel en linguïstisch overgeërfde patronen en gebiedsidentiteiten. In het rivierengebied impliceren de landschapsverandering door overstromingen dat zulke grenzen in de loop der tijd verschoven zijn. Overstromingen zijn daarmee één van de redenen dat het gebied zich kenmerkt als een menggebied van archeologische culturen. Een deel van die menging kan aan de verschuiving van de grenzen (landschapsverandering, natuurlijk) worden toegeschreven: over perioden van eeuwen is culturele menging is niet volledig aan oversteken en uitwisseling van goederen en ideeën over rivieren heen te verklaren. In de detail-fasering binnen de Mesolithische, Neolithische en de Bronstijd-archeologie van het rivierengebied, zouden perioden met grotere overstromingen en landschapsveranderingen mogelijk overeen kunnen komen met veranderingen in culturele tradities en mengverhoudingen daarin.

2.2.2 Mesolithicum en Neolithicum

Vanaf het ontstaan van de delta (8400 jaar geleden; Hijma & Cohen, 2011), maakten Laat-mesolithische jagerverzamelaarsculturen (cf. Louwe Kooijmans *et al.*, 2005) gebruik van de natuurlijke rijkdommen van de delta (Louwe-Kooijmans, 1974; Brouwer, 2011). De huidige kennis daarvan lijkt verder ontwikkeld voor het Mesolithicum van west Nederland in nabijheid van de zee, en voor het Mesolithicum van noord Nederland (bijv. Amkreutz, 2013; Peeters *et al.*, 2014), dan voor het Mesolithicum in het oostelijke rivierengebied (Cohen *et al.*, 2014a). De centrale delen van het rivierengebied werden vermoedelijk vooral in het seizoen met de laagste kans op voorkomen van overstromingen gebruikt (Jochim, 2002). Bij overstroming hield men zich vermoedelijk langs de randen van de riviervlakte op. Het is niet uit te sluiten dat er een interactie bestond tussen verplaatsingen (bijvoorbeeld tussen winter- en zomerkampen) en bekendheid met het optreden van overstromingen (vooral van januari tot eind maart; Ten Brinke, 2005).

Voor archeologische preservatie van tijdelijke kampen dicht langs de rivier, kunnen overstromingen een belangrijke rol gespeeld hebben⁴. Geconcentreerde vondsten, zijn verder te verwachten op preferentiële locaties voor tijdelijke kampen op hoge landschapseenheden zoals donken, Pleistocene terrassen en randen van de deltavlake (Crombé *et al.*, 2011; Vos *et al.*, 2011). Ook op grotere afstand van rivieren, raakten zulke jagerverzamelaars-sites in het verdere verloop van het Holoceen onder invloed van zeespiegelstijging en overstromingen bedekt met veen en/of kleiige afzettingen (Louwe Kooijmans, 1974; Berendsen & Stouthamer, 2000; Brouwer, 2011; Amkreutz, 2013).

³ Het rapport bij de Archeologische verwachtingskaart voor de uiterwaarden (UIKAV) bevat een wat uitgebreider overzicht met onderscheid naar landschapselementen (Cohen *et al.*, 2014a: H5).

⁴ Ontdekkingen van mesolithische sites in de opslibbende Vroeg Holocene oeverpakketten van de Maas in Noord Limburg (in het kader van archeologische begeleiding van de Maaswerken; RWS, Prov. Limburg) ondersteunen de notie van regelmatig terugkeren van jagerverzamelaars naar rivieroeveren en het daarbij in de loop der tijd door aanhoudende overstromingssedimentatie gescheiden raken van generaties vondstlagen (o.a. projectgebied Well-Aijen: ADC, Baac, Crevasse Advies – in uitwerking; F. Zuidhoff; H. Bos - Excursie Maas-congres 10 okt. 2014).

Gedurende het Neolithicum (~5300-2000 voor Chr.) kreeg bewoning een meer sedentair karakter. Vanaf dat moment hebben grootschalige veranderingen in het landschap van de Rijn-Maas delta direct effect gehad op bewoningspatronen. Vanaf het Neolithicum zijn relatief hooggelegen (verlaten) stroomgordels in gebruik genomen voor bewoning (Louwe Kooijmans, 1974).

Bij rivierverleggingen, mede veroorzaakt door overstromingen (zie §2.4-2.6), veranderde het landschap in voorkomende gevallen ingrijpend en blijvend, en hebben bewoners zich aan die veranderingen moeten aanpassen. Met een rivierverlegging komt nieuw areaal aan stroomgordelgronden beschikbaar waar voorheen de rivier stroomde, die voor landbouwende bewoners geschikt zijn. Relatief hoog opgeslibde gronden (oeverwallen) met een zandiger ondergrond en grondwaterspiegel die zich het grootste deel van het jaar onder het maaiveld bevond, bleken vruchtbare gronden en voor akkerbouw zeer geschikt. Over de oeverwallen ontstonden bovendien nieuwe routes van stromend open water dwars door gebieden die daarvoor betrekkelijk ondoordringbare moerassige laagtes waren geweest en dit opende nieuwe verkeersroutes.

2.2.3 Bronstijd, IJzertijd, Romeinse tijd

Uit de Bronstijd (~2000-800 voor Chr.) worden veel bewoningssporen in het rivierengebied aangetroffen, vooral op hooggelegen oeverwallen, stroomruggen en crevasse-complexen (Willems, 1986; Arnoldussen, 2008; Van Dinter & Van Zijverden, 2010). Zulke oudere bewoningsplekken werden in de loop der tijd in principe steeds kwetsbaarder voor overstromingen. Allereerst komt dit door fysische oorzaken: oude hoogtes werden bij voortzettende opslibbing van de omgeving geleidelijk relatief minder hoog en door rivierverleggingen konden locaties op andere afstanden van de hoofdtakken komen te liggen met een ongunstiger overstromingsregime. Ook culturele oorzaken kunnen worden aangedragen: met het complexer en georganiseerder worden van het landbouwsysteem en toenemende bevolkingsaantallen in de delta op de bewoonbare delen nam de mobiliteit van de bewoners af. Jager-verzamelaars waren vermoedelijk flexibeler in de omgang met overstromingen, dan inheems Romeinse boeren, en de laatsten weer flexibeler dan de huidige polderbewoners in groeikernen uit de jaren '80 of 21^{ste} eeuwse Vinex-locaties.

In de Romeinse tijd vonden er belangrijke veranderingen plaats in de relatie tussen bewoning en overstromingen. De eerste georganiseerde waterbouwkundige acties worden vanaf deze periode uitgevoerd, zoals het graven van greppels en kanalen, en het leggen van duikers en dammen. Dit diende de verbetering van afwatering van landbouwgronden, verbetering van transportmogelijkheden en ten dele ook een gunstiger verdeling van water en overstromingslast over de delta (bijvoorbeeld: Willems & Van Enckevort, 2009; Van den Broeke *et al.*, 2009; Van Dinter, 2013; De Kort & Raczynski-Henk, 2014).

Een gevolg van het oprichten van forten en wachttorens op permanente plekken vlak langs de actieve rivier (ter bewaking van de grensrivier en het achterland), en het vervolgens niet zozeer verplaatsen, maar langdurig onderhouden van deze structuren en functies (tot medio 270 na Chr. in west Nederland, tot in de 4^e eeuw in Oost Nederland), was dat veel van de structuren in toenemende mate kwetsbaar werden voor overstromingen. De rivier bleef zich in de periode dat de militaire structuren werden onderhouden namelijk steeds verplaatsen, en locaties die bij oprichting van de forten nog relatief gunstig langs de rivier lagen (niet pal boven de actieve stootoever), lagen daar na verloop van decennia tot eeuwen in verminderd gunstige posities⁵.

⁵ Bijvoorbeeld bij Meinerswijk (nabij Arnhem) en bij Dorestad (Wijk bij Duurstede), bronnen in Cohen *et al.*, 2014a.

Vanuit die optiek is het niet verwonderlijk dat langs de grote rivieren (anders dan bovenstreams in Duitsland) maar een beperkt aantal Romeinse forten ook in de Vroege Middeleeuwen een bewoningslocatie bleef; dat het merendeel van de fort- en wachttorenstructuren langs Nederrijn en Bovenwaal als aan erosie ten prooi gevallen beschouwd moet worden, en dat de Middeleeuwse bewoningskernen overwegend op nieuwe locaties aangetroffen worden.

Benedenstreams langs de Kromme Rijn en Oude Rijn (Utrecht en de verdere forten tot voorbij Leiden) was er wel terugkeer naar de Romeinse fort locaties in de Vroege Middeleeuwen (bijvoorbeeld Nokkert *et al.*, 2009, Van Dinter, 2013), maar die rivierloop had sinds het begin van de Romeinse tijd het grootste deel van haar afvoer verloren (Berendsen, 1982), wat betekent dat haar omwerkende rivieractiviteit in de Middeleeuwen beperkt is gebleven (Van Dinter *et al.*, in prep.). De taphonomie (begruving, aantasting, omwerking, isolatie van vondstlagen) van de archeologische locaties langs de Limes in de Rijn-Maas delta is dus in sterke mate door overstromings- en riviergeul-verplaatsingsprocessen gedomineerd – met als duaal resultaat dat sommige (delen van) sites dankzij overstromingen afgedekt bewaard zijn (bijvoorbeeld: Van Rooijen, 2010), en andere juist aangetast.

2.2.4 Middeleeuwen

Een middeleeuwse landschapsaanpassing in de delta was het bedijken van de rivieren. In de loop van de Middeleeuwen urbaniseerde een deel van de bevolking in steden, waarvan een belangrijk aantal aan de grote riviertakken gelegen was (om waterbeschikbaarheid en handels- en verkeersredenen). Door het verder toegenomen risico op overstromen –bepaald door toegenomen gevolgschade bij overstromen en vermoedelijk ingegeven door een wens van algemene voedselzekerheid onder de bisschoppelijke en adellijke machthebbers – werden dijkkringen gesloten en dijken en kades verder opgehoogd en verstevigd.

Dit was vooral effectief tegen relatief kleine overstromingen. De grotere hoogwaters, met terugkeertijden in de orde van 1/10 jaar, konden de dijken nog niet keren. Dat blijkt uit de overzichtscapitaties van historische bronnen van dijkdoorbraken (zie Gottschalk, 1971; Buisman, 1996; 2000): vrijwel iedere grotere afvoer uit de Late Middeleeuwen en het begin van de Nieuwe Tijd heeft op verscheidene plekken, langs meerdere riviertakken, via dijkdoorbraken schade toebracht (Glaser & Stangl, 2003).

De schade die bij een overstroming danwel dijkdoorbraak geleden wordt, is sinds de Middeleeuwen niet in de laatste plaats door de mens zelf vergroot. Tussen de dijken worden bij grote hoogwaters waterpeilen bereikt die meters hoger zijn dan ze in de onbedijkte situatie zouden halen (zie §2.1). Met iedere dijkophoging werd de kans op overstroming verkleind, maar de schade 'als het misgaat' vergroot. Bovendien was met de bedijking de natuurlijke ophoging in het poldergebied tot stilstand gekomen, omdat overstromingssediment deze gebieden niet meer bereikte. Door slootaanleg en ontwatering trad er in de polders maaiveldverlaging op en dat zorgde ervoor dat de relatieve hoogteverschillen tussen polder en uiterwaard vergrootten.

Het hoogteverschil tussen waterpeil tussen de oeverwallen/dijken en het maaiveld achter de dijken/voorbij de oeverwallen is in de afgelopen 1000 jaar dus sterk toegenomen. Dit heeft de verwoestende werking van overstromingen vergroot, met name in het Zuid-Hollands-Gelderse benedenstroomse deel van het rivierengebied, waar de polders door de venig-kleiige ondergrond gevoeliger voor bodemdaling waren dan bovenstreams in de wat kleiiger polders van de Betuwe en het Kromme-Rijngebied.

2.3 Landschapsverandering door overstromingen

2.3.1 Erosie- en depositieprocessen

In laaglandgebieden veranderen bewoningspatronen door de tijd heen niet alleen omdat gebruik door de mens verandert, maar ook omdat het landschap zelf veranderlijk is. In het rivier-gedomineerde deel van de delta is dat het gevolg van erosie- en depositieprocessen, die vooral in werken treden bij passage van afvoergolven door de rivier en overstroming van de riviervlakte.

Dicht langs de rivier heeft het ontstaan van afzettingen door overstromingen altijd wel een lokale component; er is altijd wel een zwakke plek in een oever of een plek in de rivier (bijvoorbeeld bochten) waar lokaal wateropstuwing kan plaatsvinden, zodat de rivier juist daar begint te overstromen en de impact concentreert. In de oeverzones worden bij hoge piekafvoeren die grotere overstromingen veroorzaken over een groter gebied, dikkere pakketten afzettingen neergelegd, dan bij lagere piekafvoeren en beperkte overstroming. Dwars op de rivier kunnen kleine erosiegeultjes ontstaan die de eerder opgeslibde oeverwallen doorsnijden, maar depositieprocessen domineren er. Ze leiden tot aanzienlijke opzanding en opslibbing van de oeverzones (tot de genoemde oeverwallen) en tot geleidelijke bescheiden ophoging van de verdere overstromingsvlakte, inclusief het dichtslibben van daarin aanwezige laagtes van in onbruik geraakte geulen (de restgeulvullingen uit H1 en H3). In de hoofdgeulen, de beddingen, zijn het vooral de grotere piekafvoeren die blijvende erosieve veranderingen in de ligging en diepte veroorzaken, en plotse veranderingen in ligging en grootte van zandbanken en geulen in de rivierbedding. Op de rand van bedding en oeverzone, kan de geul zich door oeverafkalving zijdelings verplaatsen.

In korte tijd kunnen grote overstromingen en de landschapsveranderingen die ze tot stand brengen, dramatische uitwerking hebben op de bewoning langs de rivier (weggeslagen dorpen, verzandende havens; bijvoorbeeld: Driessen, 1994; Buisman, 2000). Maar niet iedere verandering voltrok zich noodzakelijkerwijs catastrofaal en voor de bewoningsgemeenschappen langs de rivier was niet iedere overstroming dramatisch of negatief (Arnoldussen, 2008: 43-47; 399-420). Lang niet iedere generatie van menselijke bewoning zal getuige zijn geweest van een echt extreme overstromingen (zeldzamer dan 1/100 jaar), en op normale overstromingen (zeg: 1/10 jaar) was de bewoning langs de rivier lokaal goed aangepast. Op de langere termijn en op de regionale schaal, hadden de opeenvolgende overstromingen een uitwerking die voor de mens nieuwe gebruiksmogelijkheden schiep (en daarmee tegenvormen van gebruik juist verhinderden en/of stopten). Deze landschapsveranderingen op de tijdschaal van generaties vonden in principe onafhankelijk van culturele veranderingsprocessen plaats. In voorkomende gevallen, kunnen de bedoelde lange-termijn geleidelijker regionale landschapsveranderingen vervolgens wel wijzigingen in bewoningspatronen en bevolkingsdichtheden te weeg gebracht brengen (en daarmee culturele veranderingen). In die zin is het potentieel interessant de vermeende timing van de allergrootste overstromingen uit de prehistorie (H3) naast de dateringen van culturele omslagen te leggen (bijvoorbeeld verbredingsontwikkelingen aardewerktypologieën binnen het Neolithicum en de Bronstijd) en bijvoorbeeld te onderzoeken of gemeenschappen na zeer grote overstromingen terugkeerden naar de eerdere locatie of zich blijvend elders herorganiseerden.

2.3.2 Splitsingspunten en rivierverleggingen

Een belangrijke manier waarop rivieren tijdens grote piekafvoeren langdurige en regionaal zichtbare veranderingen in het riviersysteem veroorzaken, is via de invloed die het stromende water dan ter plaatse van riviersplitsingen heeft (Kleinhans *et al.*, 2013b). Als gevolg van overstromingen en de erosie en depositieprocessen die tijdens de passage van afvoerpieken werken, ontstaan nieuwe afsplitsingen en vindt op bestaande splitsingspunten herverdeling van water en sediment plaats. Door deze processen kunnen afsplitsingen van de hoofdgeul uitgroeien tot nieuwe permanente geulen, maar het daadwerkelijk uitgroeien van een kleine nieuwe afsplitsing tot een grote permanente riviertak, vergt langere tijd dan de passage van één hoogwater: enkele decennia tot eeuwen, een tijdperiode waarbinnen meerdere grotere hoogwaters geacht moeten worden hun invloed te hebben gehad. Stouthamer (2001) beargumenteert dat de typische duur waarover een kleinere rivierverlegging (*avulsie*) zich voltrekt, ongeveer dezelfde is als de dateringsnauwkeurigheid van het door haar beschreven inventaris aan avulsies⁶ in de Rijn-Maas delta (¹⁴C dateringsstrategie beschreven in Berendsen 1982; Berendsen & Stouthamer, 2001; zie ook H4). Maar het verlaten raken van grotere takken in diezelfde inventaris duurde, vastgesteld met dezelfde dateringsstrategie, aanzienlijk langer (tot 1000 jaar; Stouthamer, 2001; Cohen *et al.*, 2012; Kleinhans *et al.*, 2012; Van Dinter *et al.*, in prep.).

Over tijdschalen van honderden tot duizenden jaren en op het ruimtelijke schaalniveau van de hele delta, veroorzaakt het ontstaan van nieuwe en het verlaten raken van oude riviertakken belangrijke afwisselingen in de sedimentaire opbouw van het rivierengebied (Berendsen & Stouthamer, 2000; Stouthamer *et al.*, 2011). Avulsies leidden tot veranderingen in het rivierenetwerk en noopten de mens tot aanpassingen in het gebruik van het rivierenland. De avulsiegeschiedenis is nauw verknoopt met de langere prehistorisch bewoningsgeschiedenis van de delta. In alle archeologische perioden waren er aanpassingen van de mens aan het verleggen van actieve geulen en aan het dichtslibben en verlanden van inactieve geulen. Wat in het Laat Neolithicum en de Bronstijd de grootste riviertakken en verkeersaders van het rivierengebied waren, waren dat door voortgaande verleggingen in latere tijden veelal niet meer (zie ook §2.2).

Het actief beïnvloeden van de afvoerverdeling over riviertakken door de mens gaat historisch terug tot in de Romeinse tijd. De invloed van overstromingen op het zich voltrekken van veranderingen in de splitsingspunten is van alle tijden: voor en na de bedijking. Zelfs in de huidige, genormaliseerde situatie zijn het de splitsingspunten waar het gedrag van de rivier tijdens extreme hoogwaters het meest onzeker is. Tegenwoordig wordt de afvoerverdelings-situatie op het splitsingspunt dan ook voor en na ieder volgend groot hoogwater zorgvuldig opgemeten en in hydraulisch modellerend doorgerekend (Kleinhans *et al.*, 2012; 2013a).

⁶ Zowel het proces van rivierverlegging (zich voltrekkende avulsie), als de uitkomst van het proces (de geslaagde avulsie) worden 'rivierverlegging' en 'avulsie' genoemd. In teksten bestaat soms spraakverwarring waar 'het zich ontwikkelende proces' en waar 'het voltooide gevolg' bedoeld is.

2.3.3 *Extreme* overstromingen en landschapsveranderingen

De passage van grote afvoerpieken (hoogwaters, overstromingen) wordt geacht een forcerende rol in het zich voltrekken van avulsies te spelen (Stouthamer, 2001; Stouthamer & Berendsen, 2000; 2001). Om een grote riviergeul deels te laten verzanden en een nieuw gevormde aftakking uit te laten groeien tot een nieuwe riviergeul van enige omvang - het optreden van de rivierverlegging of avulsie - is de arbeid van meerdere overstromingen nodig (Kleinhans *et al.*, 2008; 2012). In hydraulische modelberekening zijn er meerdere tientallen tot enkele honderden piekafvoer-passages van gemiddelde grootte nodig om een volledige omslag in afvoerdeling op een splitsingspunt te verkrijgen. Dit betekent in de praktijk dat er één á twee eeuwen tijd nodig zou zijn, en dat er dan onder de passerende piekafvoeren een flink aantal bovengemiddeld grote overstromingen en één of enkele extreme overstromingen zullen zijn. Die laatste zullen de meeste arbeid verrichten en daardoor op de splitsingspunten de grootste veranderingen voor en na de overstroming bewerkstelligen. De passage van kleinere afvoerpieken veroorzaakt ook wel veranderingen op het splitsingspunt, maar vanwege de meer beperkte omvang van de verrichte arbeid hebben ze een kleinere kans om een groot contrast in de situatie 'voor' en 'na' te veroorzaken. Dit is de reden dat, binnen de periode dat de verlegging zich voltrekt (de *avulsion duration* cf. Stouthamer 2001), het moment van passage van de grootste piekafvoer geacht mag worden **doorslaggevend voor het slagen of falen van de rivierverlegging** te zijn geweest.

Het argument van doorslaggevendheid geldt ook voor het beschouwen van meanderafsnijdingen. Deze ontstaan plaatselijk tijdens piekafvoeren van verschillende grootte, dus niet alleen tijdens de allergrootste afvoeren. Met toenemende afvoer is er wel een verhoogde kans op het optreden van meanderafsnijdingen, omdat met toenemende afvoer de stroming krachtiger wordt en er dus meer morfologische arbeid verricht kan worden (Baker, 1994; Kale, 2007). Minder duidelijk is of bochtafsnijdingen die bij passage van de grootste piekafvoeren 'catastrofaal' zijn ontstaan, ook een grotere kans hebben om langdurig als meandervlak en restgeul bewaard te blijven dan 'normale' bochtafsnijdingen die op een gegeven moment 'geleidelijk' ontstaan ten gevolge van opeenvolgende passages van normale afvoerpieken. Dit is een klassiek geomorfologisch procesbeschrijvingsvraagstuk van catastrofisme versus geleidelijkheid (e.g. Nanson, 1986). In reconstructies van rivierenlandschappen speelt het niet alleen voor door avulsie gevormde en verlaten stroomgordels, maar ook voor het afsnijden van meanders (meandervlakken, *paleomeanders*) zoals in het Rijndal in Duitsland (Schirmer, 1995; Erkens *et al.*, 2009; 2011), voor meandervlakken die binnen de stroomgordels in de delta te herkennen zijn (Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen *et al.*, 2009), en voor Middeleeuwse meandervlakken binnen de uiterwaarden (Cohen *et al.*, 2014a). Zowel voor de meanderbochten als voor de avulsies raakt dit vraagstuk aan klassieke geomorfologische thematiek van het catastrofaal (extreem) vs. geleidelijk (normaal) ontstaan van onderdelen van sedimentaire landschappen⁷.

Waar in het achterland opgewekte piekafvoeren in de delta tijdens overstromingen rivierverleggingen veroorzaakt hebben, kan gesteld worden dat de overstromingen de gebeurtenissen waren die de regionale bewoningspatronen in de delta grootschalig en blijvend deden veranderen. Versimpelend kan dan verder gesteld worden dat van een grote overstroming in gebieden waar deze *niet* tot noemenswaardige rivierverlegging leidde, het uitgangspunt voor archeologische verwachtingen '**een tijdelijke impact**' zou moeten zijn (men kan zich van de overstroming herstellen volgens de oude ruimtelijke ordening), terwijl in gebied waar ze *wel* tot rivierverlegging leidde, '**permanente impact**' op archeologie verwacht mag worden. Een voorbeeld is het beschikbaar komen van nieuwe handelsroutes, met verhoogde handelsintensiteit en nieuwe reikwijdte van de handel tot gevolg (bijvoorbeeld: opkomst Hanzesteden langs de Gelderse IJssel; Groothedde, 2010; Lanen *et al.*, 2015a).

⁷ De onderzoeksvraag over het ontstaan en bewaard blijven van riviervakken en meanders, kan nu voor het eerst andersom worden gesteld, omdat er een nieuwe informatiebron over de overstromingen beschikbaar is gekomen.

Ook *kan* overstromingsimpact als een omslagmoment in een verder meer geleidelijk verlopend proces gezien worden ('**latente impact**'). Te denken valt aan economische aftakeling van een nederzetting, die duidelijk wordt uit het niet meer herstellen van een overstromingsimpact. Het verschil is dan dat de aftakeling - om redenen van culturele veranderingen - ook zonder het optreden van die specifieke overstroming best geacht mag worden reeds te zijn ingezet, zoals bijvoorbeeld Kosian *et al.* (2013) recent opperen voor Dorestad in de 9^e eeuw, en zoals ook voor het oprichten van het Hanze-bondgenootschap en het toetreden van de IJsselsteden daartoe zal hebben gegolden.

Vanuit de bovenstaande perspectieven (de vet gedrukte termen) is de vraag relevant *welke* zeer grote overstromingen uit de hier gepresenteerde reeks te koppelen zijn aan *welke* bekende rivierverleggingen en vast te stellen welke grote overstromingen uit de tijdreeks als bepalend te beschouwen zijn voor patronen van deltabewoning. In hoofdstuk §4.1 en tabel 2 is dit voor het eerste millennium na Chr. uitgewerkt. Er wordt met nadruk niet gesteld dat iedere grote verandering in het rivienetwerk steeds tot één individuele zeer grote overstroming te herleiden zou zijn (Cohen & Lodder, 2007). Voor het al dan niet slagen van een avulsie zijn de condities in het landschap waarin en waardoorheen de nieuwe aftakking zich zou moeten vormen ook belangrijk en sturend en limiterend. Dit is een onafhankelijke factor naast die van de afvoerdynamiek in de rivier (Stouthamer, 2001; Kleinhans *et al.*, 2013b).

De bewoning langs de rivier verschilt tussen archeologische periodes (§2.2) en ook de reactie van de mens op overstromingen en rivierverleggingen zal verschillend zijn geweest, nog los van de vraag of overstromingen en/of verleggingen in archeologisch tijdvak A vaker voorkwamen dan in tijdvak B. De impact van extreme overstromingen *op archeologie*, hangt daarbij niet alleen af van fysische condities zoals de overstromingsmagnitude en de sedimentatiedynamiek tijdens de overstroming, maar ook van de manier van bewoning en gebruik van het rivierenlandschap in het tijdvak waarin de overstroming zich voor deed. Bij gevallen van 'tijdelijke impact' op archeologische sites uit tijdvak A en tijdvak B, ongeacht de archeologische verschillen, zou de sedimentaire registratie van overstromingen in de laagopvolging juist wel vergelijkbaar zijn.

2.4 Overstromingen en rivierverlegging

2.4.1 Stroomgordeldatering

De langere traditie van fysisch-geografisch onderzoek in het riviereengebied vanuit de Universiteit Utrecht (Berendsen, 1982; Berendsen *et al.*, 1995; Berendsen & Stouthamer, 2000) heeft tot een compleet overzicht geleid dat ouderdommen geeft voor vrijwel alle riviertakken die in de ondergrond van de delta aanwezig zijn. Zowel de begin- als de einddatering zijn per oude riviertak uit samenhangende reeksen ¹⁴C-dateringen afgeleid, intern kruisgewijs gecontroleerd en systematisch gedocumenteerd (Berendsen & Stouthamer, 2000; dataset: Berendsen & Stouthamer 2001; aangevuld en herzien: Cohen *et al.*, 2012). De inzichten in de ouderdommen van rivierverleggingen zijn op dezelfde set gegevens gebaseerd (Stouthamer & Berendsen, 2000; Stouthamer, 2001).

De set ouderdomsgegevens kent, ondanks de rijkdom aan ¹⁴C-dateringen (inclusief de nodige herdateringen ter controle; Berendsen & Stouthamer, 2001), nog aanzienlijke verschillen in de nauwkeurigheid waarmee begin- en einddatering van geval tot geval vastgesteld kunnen worden. Zo is het begin van ontstaan van de Nederrijn (Lobith-Arnhem-Wageningen) niet op directe ¹⁴C-dateringen gebaseerd. Het ontstaan van de Gelderse IJssel in hetzelfde gebied, is veel beter gedateerd (tussen 300 en 800 na Chr.; zie §2.6). De Nederrijn moet al eerder zijn ontstaan: getuige de aanwezigheid van rivierzand waarop in het begin van de Romeinse tijd het Castellum Meinerswijk werd gebouwd, had de Nederrijn daar

toen al een ontwikkelde meanderbocht (direct stroomafwaarts van Arnhem; Willems, 1986). Ook de bodemopbouw in het veengebied van het Lathumse Broek (direct stroomopwaarts van Arnhem) laat zien dat daar al ruim voordat de Gelderse IJssel ontstaat, de nodige overstromingsklei wordt ingevangen (Teunissen, 1990), die aan de Nederrijn moet worden toegeschreven. Anderzijds zijn er langs de riviertak in het kritieke traject van Zevenaar tot Wageningen geen meanderafsnijdingen of restgeulfragmenten bekend die overduidelijk al in of voor de Romeinse tijd zijn ontstaan, wat er op duidt dat de rivierloop nog jong was. Deze combinatie van inzichten maakt dat het ontstaan van de Nederrijn, door een avulsie bij Lobith, op rond 500 v. Chr. geplaatst wordt (Cohen *et al.*, 2012).

In het centrale rivierengebied zijn moment van ontstaan en bestaansduur voor kleine riviertakken in veel gevallen nauwkeuriger bekend dan voor grotere takken. Zo zijn bijvoorbeeld voor de Schoonrewoerdse stroomrug zowel de begin- als de einddatering gebaseerd op meerdere dateringen (reproducerend). Daaruit blijkt dat deze relatief smalle stroomgordel slechts enkele eeuwen actief te zijn geweest (stand van zaken: Cohen *et al.*, 2012). Een veel grotere en belangrijkere Rijntak, de Houtense stroomrug, heeft slechts een enkele begindatering, een langdurig bestaan, en een enkele eind-datering (stand van zaken: Cohen *et al.*, 2012). De situatie is gedeeltelijk het gevolg van regionale verschillen in onderzoekshistorie (het idee van toenemende geleidelijkheid van verlaten met toenemende grootte van de riviertak is in de periode 2008-2011 opgekomen; Cohen & Stouthamer, 2012), maar ook de regionale verschillen in gesteldheid van de ondergrond en de interactie van het riviersysteem daarmee spelen duidelijk een rol.

Een oudere aftakking die zich in het venige westelijke rivierengebied ontwikkelde, zoals de Schoonrewoerdse stroomrug, is een relatief gewillige casus voor het dateren van ontstaan en verlaten en het uitlichten van het avulsieproces van een individuele tak (Makaske, 1998). De dateringsomstandigheden in zulke komgebieden met veen en klei afwisselingen vs. die met overwegend kleilagen zijn voor datering gunstiger, maar het ontwikkelde procesbegrip dekt dan wel primair kleinere riviertakken (Berendsen & Stouthamer, 2000; 2001; Gouw & Erkens, 2007; Gouw, 2008). De traditionele dateringsstrategieën zijn ook voor rivierlopen met minder vs. meer laterale geulverplaatsing gunstiger respectievelijk ongunstiger. De onderzoekstraditie is daarmee lang in het nadeel van het ontwikkelen van specifiek inzicht in ontstaan en verlaten van grote takken geweest (Cohen & Stouthamer, 2012).

Het op traditionele wijze met de ¹⁴C-methode dateren van het ontstaan van een nieuwe tak is in het bovenstroomse deel van de delta relatief lastig, omdat het vinden van daarvoor geschikte locaties (overstromingssediment op organisch sediment, niet te ver van de riviertak) er moeilijker is dan benedenstrooms (Berendsen & Stouthamer, 2001). Dit geldt bijvoorbeeld voor de Nederrijn. Bovendien is het voor een grotere tak moeilijker dan voor een kleinere tak, omdat de grotere tak gedurende haar bestaan meer zijdelingse erosie veroorzaakt, wat tot omwerking en vernietiging van afzettingen uit het begin van haar bestaan leidt, die geschikt als dateringslocatie zouden zijn geweest. Dit geldt voor de Nederrijn, de Waal en de Gelderse IJssel – en is van belang voor juist begrip van de landschapontwikkelingen in het rivierengebied met rijke archeologische neerslag, niet in laatste plaats in de Romeinse tijd (Caesars veldtochten, Limes, Franken⁸).

⁸ Anno 2015 spelen specifiek voor de Limes: creëren breed gedragen, gedegen overzicht stand van kennis in het kader van de Unesco Werelderfgoedlijst-voordracht, en het contrast in preservatie van de Limes langs Oude Rijn en Kromme Rijn, vs. de Nederrijn. Voor Caesar's veldtochten: publieke discussie over vondstlocatie Maren-Kessel en relatie met passage in De Bello Gallico IV.10-16 over Rijn/Waal (Rheno/Vacalus) en Maas (Mosa) en samenvloeiing en mondingsgebied. Voor de Franken: onderzoek naar Laat Romeinse tijd en de overgang naar Merovingische tijd (verval Limes, volksverhuizingen, opkomst Dorestad).

Om de hier boven genoemde dateringsmoeilijkheden te overwinnen zijn, kan (i) scherp gelet worden op het zich aandienen van zeldzame locaties (langs bovenstroomse, al te grote riviertakken) waar de opeenvolging toch voor het verzamelen van een monster geschikt is (min of meer de praktijk in de afgelopen 15 jaar; Cohen & Stouthamer, 2012), en kan (ii) gezocht worden naar alternatieve redentielijnen die ouderdomsinformatie geven. Die twee strategieën hoeven niet als alternatieven gezien te worden. Met de wetenschappelijke idee van onafhankelijk willen kunnen toetsen van bevindingen in het achterhoofd, is het juist nuttig op beide methoden in te zetten. Dit is dan ook met nadruk de zienswijze in dit rapport, en reden voor aparte aandacht hiervoor in §2.4 en §5.2. Dateringsinzichten in het optreden van extreme overstromingen, bieden een gewenste alternatieve redentielijn voor het beginnen en na enige tijd slagen van rivierverleggingen.

2.4.2 Bijdrage van overstromings-*events* aan rivierverleggingen

Om meerdere beperkende redenen is in eerdere studies echter veelal ontweken iedere afzonderlijke avulsie steeds 1:1 aan een zeer grote overstroming te koppelen (Makaske, 1998; Stouthamer, 2001; Berendsen & Stouthamer, 2001; Stouthamer & Berendsen, 2000). Deels is dat omdat het proceskundig begrip van hoe rivierverleggingen zich voltrekken stelt dat enige tijd nodig is om een avulsie te laten slagen (zoals ook in §2.3.2 voor de processen op het splitsingspunt besproken), en deels is dat vanwege de beperkte dateringsnauwkeurigheid van de uiteindelijk ter plaatste van de verlegging overgebleven afzettingen en daarvan afgeleide reconstructies. Met het beschikbaar komen van onafhankelijke informatie over de timing van grote overstromingen, worden beide beperkingen opgeheven, of tenminste verzacht.

Bij het al dan niet slagen van een rivierverlegging spelen naast de door de afvoer gedreven verdelingsprocessen op het splitsingspunt, ook de landschapomstandigheden benedenstrooms daarvan in en langs de nieuwe en de oude geul een bepalende rol (Stouthamer, 2001; Kleinhans *et al.*, 2012; 2013a). Het uitgroeien van een crevassewaaier-complex (avulsiegordel, *avulsion belt*) tot een geslaagde nieuwe riviertak met zandige beddinggordel, neemt in de regel enkele decennia tot eeuwen in beslag en gebeurt alleen als de benedenstroomse en bovenstroomse condities voldoende lang gunstig blijken te zijn. De typische hoeveelheden zandig sediment waaruit de crevasse-complexen die tot avulsies uitgroeien zijn opgebouwd (Stouthamer, 2001), moeten door honderden passages van afvoerpieken van gemiddelde grootte aangevoerd zijn (Smith *et al.*, 1989; Makaske *et al.*, 2008; Cohen *et al.*, 2009)⁹.

De passage van één extreme afvoerpiek in de periode dat een avulsie zich ontwikkelt, representeert een grote bijdrage aan de totale arbeid. Dit komt door de grotere waterdiepten en stroomsnelheden bij een extreem hoogwater, en wordt nog versterkt door de exponentiële relatie tussen sedimenttransport/ beddingverandering en stroomsnelheid ($q_s \propto v^3$) en de langere duur van zulke hoogwaters. Extreme hoogwaters mogen dus geacht worden het beslissingsproces van slagen ofwel falen van de avulsie te bekorten. Voor wat betreft het slagen van de avulsie kan het passeren van een piekafvoer twee kanten op uitwerken. Ze verandert ofwel de bovenstroomse condities op het splitsingspunt op ongunstige wijze en stopt daarmee de verdere uitgroei van de crevasse-waaier en stopt het proces ('*failed avulsion*', Stouthamer, 2001), ofwel ze verricht zoveel transporterende en eroderende arbeid over de lengte van het avulsiecomplex, dat de aanleg van de nieuwe tak voltooid raakt.

Gecombineerd met het idee dat avulsies zich gefaseerd ontwikkelen (eerst als uitbrekende crevasse, pas later als geslaagde nieuwe rivier), en betrokken op avulsies en crevassecomplexen uit het verleden (waarvan we weten of het verleggingsproces geslaagd

⁹ Deze wijze van beschouwen is ook gebruikt in recent afgerond onderzoek naar doorvoer van riviersediment op de tijdschaal van decennia tot eeuwen (proefschrift Hobo 2015; Universiteit Utrecht i.s.m. Wageningen UR).

danwel gestopt is) maakt de bovenstaande beschouwing over arbeid bij normale vs. extreme hoogwaters, dat bij het relateren van geslaagde rivierverleggingen (avulsies) en bijna-geslaagde verleggingen (grotere crevassewaaier-complexen) aan zeldzaam grote overstromingen meerdere combinatiescenario's mogelijk zijn.

Mocht een crevasse door een middelgrote overstroming geïnitieerd zijn, maar wordt deze een jaar of decennium later opgevolgd door een zeldzaam groot event – dan kan verondersteld worden dat het verleggingsproces ofwel versneld slaagde (bij voor de nieuwe geul gunstige benedenstroomse condities), ofwel versneld afbrak (bij ongunstige benedenstroomse condities). Mocht een crevasse door een zeer grote overstroming geïnitieerd zijn, en volgt kort daarop (binnen enkele decennia) nog een tweede vergelijkbaar groot event, dan mag verondersteld worden dat het verleggingsproces zich relatief snel voltrok. Voor avulsielocaties waar uit veldonderzoek ter plaatse al dateringsinformatie beschikbaar is, biedt het beschikbaar komen van onafhankelijke inzichten in het optreden van grote overstromingen dus kansen voor een verhoogd procesbegrip van het zich voltrekken van de verlegging. *Per casus* kan er verhoogd begrip van de *timing* en veranderende grootte van riviertakken en de gevolgen voor mensen in het gebied worden besproken.

En dan is er nog het perspectief van de afvoer-verliezende tak. Bij een volledige avulsie verliest zij uiteindelijk al haar water maar dat is niet meteen het geval. Een gangbaar scenario voor een volledige avulsie is dat een nieuwe tak eerst enkele decennia tot eeuwen als crevasse-complex functioneert, dan enkele eeuwen als een partiële avulsie een deel van de afvoer van de oude tak afleidt, om tenslotte na nog enkele eeuwen de volle afvoer overgenomen te hebben. Voor het volledig verlaten raken van oude takken geldt dat het juist de grootste riviertakken veel tijd kost, om redenen van sedimentverdeling op het splitsingspunt (Kleinans *et al.*, 2010; 2012; 2013b; Toonen *et al.*, 2012). Splitsingspunten bovenin de delta mogen volgens de netwerkconstructies (Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen *et al.*, 2012) geacht worden zich tot tweeduizend jaar lang als dynamische verdelers van water en sediment gehandhaafd te hebben. De afvoer en het sedimenttransport worden hierbij langdurig in schommelende verhoudingen verdeeld over de beide takken, zonder één van beide takken al te snel volledig te doen verzanden.

Kleinere takken in het netwerk bestaan in de regel korter dan grotere takken (Stouthamer, 2001; Stouthamer *et al.*, 2011; Cohen *et al.*, 2012), in overeenstemming met de inzichten in de splitsingspuntodynamiek. Begin en einddateringen van bijna-rivierverleggingen in het centrale rivierengebied (kleinere riviertakken zoals de Schoonrewoerdse stroomgordel in de Nederbetuwe, grote crevasses zoals de Zuid-Stuivenbergse bij Montfoort), zouden dan ook wel eens eenduidiger aan grote overstromingen te relateren kunnen zijn, dan einddateringen van grotere takken (zoals de Houtense stroomrug in Zuidoost Utrecht, of de Rensselaer-Herveldse stroomgordel in de Overbetuwe; beiden overigens met rijke archeologie, bijvoorbeeld: Willems, 1986, Schurmans, 2006). Anderzijds kan in de klastische geulvullingen en oeverafzettingen van de laatste fasen van activiteit van zulke geleidelijk-verzandende oude-grote rivierlopen juist registratie van overstromingen waargenomen worden (al dan niet geassocieerd met archeologie). Deze registratie is dan onderdeel van de eindfase van activiteit van de stroomgordel: afzettingen van toen het splitsingspunt naar de opvolgende tak al ontstaan was, maar de oude tak nog niet verlaten was¹⁰.

¹⁰ Deze wijze van beschouwen lijkt van belang voor het Kromme Rijngebied (Houtense stroomgordel in Late Bronstijd, IJzertijd, Romeinse tijd; Kromme Rijn en Oude Rijn in Romeinse tijd en Middeleeuwen tot aan de bedijking) en in de Betuwe (o.a. Herveld-Rensselaer stroomgordel in IJzertijd, Romeinse tijd, Vroege Middeleeuwen): de gebieden waar de grootste verlaten rivierlopen liggen (zie ook H4, fig. 14). In het Kromme Rijngebied is lopend onderzoek op dit gebied het verst gevorderd (M. van Dinter, K.M. Cohen e.a. - Universiteit Utrecht; zie ook voetnoot 21).

2.4.3 Vroegmiddeleeuwse overstromingen en de Gelderse IJssel

Waar in de literatuur in het verleden geopperd is dat een avulsie in de delta met het optreden van een grote overstroming samenhangt, is dat veelal als een voorzichtige suggestie gedaan zonder uitspraak over zeldzaamheid of grootte van een dergelijke overstroming. Hierop is in de literatuur één uitzonderingscasus, en deze betreft het ontstaan van de Gelderse IJssel. Deze verlegging verdient speciale aandacht (§2.4.3), omdat het een rivierverlegging was die een nieuw gebied annexeerde en om haar archeologische belang voor middeleeuwse archeologie (VME, Hanze). Mogelijk is de rol voor overstromingen er langs de Gelderse IJssel ook in de Volle en Late Middeleeuwen, bijvoorbeeld in relatie tot de oprichting van het waterschap Salland (Spek *et al.*, 1996) en tot meanderbuitenbochtersie van vroegmiddeleeuwse stadsdelen (stadsarcheologie Zutphen, Deventer, Doesburg). Het spreekt vanzelf dat onafhankelijke gegevens over het optreden van grote overstromingen in de Rijn gedurende het Holoceen onderzoek naar zulke relaties verder helpt (H4).

In de aanloop van het sedimentaire overstromingsonderzoek, merkten Cohen & Lodder (2007) op dat het ontstaan van deze tak als avulsie een apart geval was, omdat het er een is die tot annexatie van nieuw overstromingsgebied leidde, dat voorheen buiten het bereik van Rijn-overstromingen was gebleven. Het slagen van deze verlegging zou daarmee meer met het doorbreken van een waterscheiding in het IJsseldal tussen 'Liemers' en 'Salland' te doen hebben, dan met crevasse-vorming direct langs de oeverwal van de Nederrijn (het proces zoals dat binnen de deltavlake tot avulsies leidt, voor de IJssel als scenario uitgewerkt door Makaske *et al.*, 2008). Anders dan het doorbreken van laagte in een oeverwal, vereist het eerstelijk overspoelen van een laagte in een waterscheiding een hoge waterstand in de overstromingsvlakte van de Rijn – reden om het ontstaan van de Gelderse IJssel als een casus voor een grote overstroming in de Vroege Middeleeuwen op te voeren (Cohen & Lodder, 2007).

Karterend onderzoek heeft het bestaan van zo'n waterscheiding tussen Zutphen en Deventer sindsdien bevestigd¹¹ en voert het ontstaan ervan terug op landschapsontwikkelingen in de laatste ijstijd (Cohen *et al.*, 2009). Het inperken van de onzekerheid over de timing van het ontstaan van de IJssel is ook gevorderd. Benedenstrooms van de waterscheidingsdoorbraak vonden Makaske *et al.* (2008) op enige afstand van de hoofdgeul ¹⁴C-dateringen van veen direct onder IJsselklei in de 10^e eeuw na Chr., en vermelden Cohen *et al.* (2012) dateringen op korte afstand benedenstrooms van de waterscheiding en de hoofdgeul een ¹⁴C-datering uit de 8^e eeuw. Ook vanuit proto-historische en archeologische gegevensbeschouwing voor Zutphen en Deventer blijkt de rivier in de 7^e-8^e eeuw permanent te functioneren (Fermin & Van Straten, 2009; Groothedde, 2010; 2013).

¹¹ Een serie crevasse-waaiers als doorbraken van rivierduincomplexen langs de Oude IJssel, blijkt getuige archeologie op de waaiers, OSL dateringen van het zand en ¹⁴C-dateringen van geulvullingen zo'n 11,000 a 12,000 jaar oud (N. Willemsse pers. com., 2010; 2013; Zielman 2013: RAAP 2340). Ze zijn daarmee aan Rijn-piekafvoeren door het Oude IJsseldal in het Jonge Dryas en Preboraal te koppelen en in overeenstemming met bevindingen stroomopwaarts (Janssens *et al.*, 2012). In 2007-2009 (Cohen & Lodder, 2007; Makaske *et al.*, 2008, Cohen *et al.*, 2009) werd nog aan een (Laat) Holocene ouderdom voor deze waaiers gedacht, maar dat idee is verlaten.

Het eerste 'overtoppen' van de waterscheiding door een zeer grote overstroming zou ook al in de 4^e tot 6^e eeuw kunnen hebben plaatsgevonden (bijvoorbeeld door te correleren naar de dendrochronologische gegevens verzameld in Zwolle Stadshagen¹² en hydrologische omslagen daar; Sass-Klaassen & Hanraets, 2006). Bovendien was er stroomopwaarts van de waterscheiding aanzienlijke sedimentatie in de komgebieden van de Overbetuwe en de Liemers (kartering Gouw & Erkens, 2007; budgettering Proefschrift Erkens, 2009¹³). Dit kwam door de aanhoudende grote en kleine overstromingen van de Rijn in dat gebied. De voortgaande sedimentatie had een sluipend groeiend opzet-effect van waterstanden bij piekafvoeren van gelijke grootte tot gevolg. De geleidelijke waterstandsopzet maakt het logisch dat een grote overstroming in de Vroege Middeleeuwen de waterscheiding een eerste maal 'overtopte', waarmee de doorbraak begon te vormen. Dit is naar de huidige inzichten op zijn vroegst in de 4^e eeuw, naar waarschijnlijkheid in de 6^{de} eeuw, en op zijn laatst in de 7^e eeuw voor het eerst gebeurt (Groothedde, 2010). Deze interpretatie van de dateringsgegevens en sedimentaire ontwikkelingen benedenstrooms en bovenstrooms van Zutphen/Deventer, staan en vallen met het juist identificeren van de ligging van de genoemde waterscheiding (Cohen *et al.*, 2012).

Eenmaal tijdens een eerste grote overstroming doorbroken en erosief verlaagd, zullen opvolgende overstromingen andermaal van de route gebruik gemaakt hebben en deze nog wat verder hebben uitgeruimd. Na een of enkele van zulke grote overstromingen zullen de grotere doorbraakgeulen permanent watervoerend zijn geworden en was de nieuwe rivier ontstaan. De jonge Gelderse IJssel was echter nog niet onmiddellijk op haar volle breedte en diepte (Makaske *et al.*, 2008). De morfologie was nog die van de initiërende overstromingen, met meerdere geulen (Cohen *et al.*, 2009). Over een verloop van eeuwen ontwikkelde de grootste van de doorbraakgeulen zich tot de enig-overnlijvende meanderende hoofdgeul. De kleinere doorbraakgeulen raakten in onbruik, zoals vaker beschreven in avulsiestudies (Smith *et al.*, 1989; Stouthamer & Berendsen, 2000; Stouthamer, 2001).

De ontwikkeling van de Gelderse IJssel van doorbraakgeul tot meanderende rivier bestrijkt dus de periode van de Vroege Middeleeuwen en loopt door in de Volle Middeleeuwen. Eenmaal ontstaan, verbond de rivier het Rijnachterland met het voorland van Noordzee, Duitse Bocht en Denemarken. In de Vroege Middeleeuwen werd ze, parallel aan het ontstaan van de rivier als verbindende route steeds belangrijker. Het opkomen van Zutphen en Deventer als vroeg-stedelijke centra van handel en vorstelijke en kerkelijke macht vanaf deze periode onderschrijft dat. Het handelsbelang van de rivier culmineerde in de Late Middeleeuwen met het toetreden van de IJsselsteden tot het Hanzeverbond. Het IJsselsegment van het Laat Middeleeuwse Hanze-netwerk vindt dus haar wortels in aan Vroeg Middeleeuwse landschapontwikkelingen. Door de informatie over de extreme overstromingen in datzelfde tijdvak te betrekken, kunnen de vroeg en laat middeleeuwse ontwikkelingen langs de IJssel potentieel scherper in de tijd geplaatst worden en in fasen opgedeeld worden.

¹² In Juli 2014 is op een tweede locatie bij Zwolle (Dijkverlegging Westenholte), uit vergelijkbare context maar dichter bij de latere bedding van de IJssel, een ruime hoeveelheid materiaal voor dendrochronologische analyse verzameld. Uitwerking hiervan is gaande (H.J. Pierik, E. Jansma e.a., Universiteit Utrecht).

¹³ Dit is het gevolg van de eerder genoemde ontbossing in Neolithicum en Bronstijd en betrof vooral de sedimentlast aan klei en silt. Door vertragingseffecten in het Duitse deel van het stroomgebied leidde dit pas vanaf ca. 2500 jaar geleden tot waarneembare toename in de delta. In de Volle Middeleeuwen was de sedimentlast aan klei en silt dubbel zo groot als dat ze in de natuurlijke situatie met een nauwelijks ontbost achterland was (Erkens, 2009). De toename was een sturende factor in de netwerkveranderingen in de delta in de jongste 2500 jaar (Gouw & Erkens, 2007; Stouthamer *et al.*, 2011; Kleinhans *et al.*, 2012; 2013a).

3 Overstromingsgeschiedenis: methodiek en resultaten proefschrift Toonen

Dit hoofdstuk is een Nederlandse samenvatting van het onderzoek van de aanpak en resultaten van het onderzoek uit het proefschrift Toonen (2013) en het ter peer-review bij een internationaal wetenschappelijk tijdschrift in te dienen manuscript ‘*Sedimentary palaeoflood event registration in lowland river plain lake fills: a Holocene flood chronology of the Lower Rhine*’ (bijlage B) en de *Supplementary Materials* daarbij (bijlage A). Hoofdstuk 7: ‘*A composite Holocene palaeoflood chronology of the Lower Rhine*’ en de set onderzoeksgegevens die in Appendix B van het proefschrift was opgenomen, liggen aan de basis van het hoofdstuk. De gegevens zijn ten behoeve van het manuscript en dit hoofdstuk nog wat verder uitgewerkt.

In de openingsparagrafen wordt ook de onderzoekaankpak en methodologische uitgangspunten achter het opwerken van korrelgroottegegevens tot relatieve overstromingsgrootte en van dateringen uit boorkernen tot tijd-diepte relaties. Dat is op de eerdere hoofdstukken uit het proefschrift Toonen gebaseerd, en inmiddels verschenen artikelversies van die hoofdstukken zijn als Bijlagen C en D opgenomen.

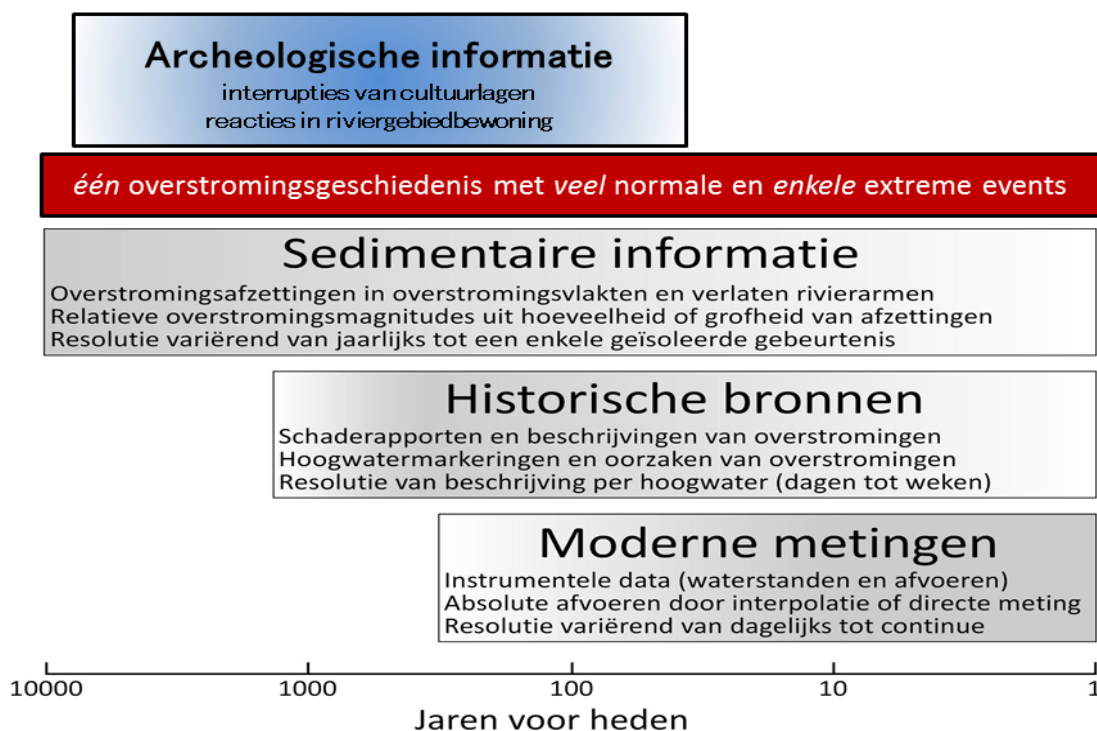
3.1 Probleembenadering

3.1.1 Overlappende gegevenssets voor prehistorische en jongere perioden

Over het voorkomen van extreme overstromingen in het verleden is uit drie typen bronnen informatie te halen (fig. 3): uit directe metingen, uit historische bronnen en afgeleid uit rivierafzettingen in de overstromingsvlakte. Voor de Rijn in Nederland gaan afvoer- (debietmetingen) en waterstandgegevens (peilschaalaflezingen) terug tot respectievelijk 1901 en 1772 (RWS Waterbase, 2012; Toonen, 2015). Betrouwbare historische beschrijvingen van overstromingen, en vooral van de schade die ze aanrichtten, gaan terug tot ongeveer 1350 na Chr. (Glaser & Stangl, 2003; Buisman, 1996). Sporadisch zijn op oude bruggen en gebouwen hoogwatermarkeringen bewaard gebleven die als waterstanden voor afvoerreconstructies gebruikt kunnen worden (Herget & Meurs, 2010; Wetter *et al.*, 2010). Langs de Rijn zijn zulke historische bronnen uitermate bruikbaar voor het dateren van de grotere overstromings-*events* zoals herkend in boorkernen uit restgeul- en wielopvullingen in de huidige overstromingsvlakte (Toonen *et al.*, 2015). Voor eerdere perioden zijn we voor een overstromingschronologie primair aangewezen op het sedimentair archief (inclusief dat op archeologische locaties).

De Rijn-Maas delta in Nederland heeft een brede overstromingsvlakte waar onder natuurlijke omstandigheden bij hoogwater netto sedimentatie plaatsvond. Het meest regelmatig en het minst door erosie of indroging onderbroken, gebeurde dat in de laagste, permanent natte delen van de overstromingsvlakte, zoals in watervoerende afgesneden oude meanderbochten (foto 2). Op zulke locaties worden individuele pulsen van inkomend overstromingsslib van grotere events als individueel te herkennen laagjes geregistreerd.

Uit recent onderzoek **blijkt** dat **uit de grofheid van bijgemengde zandkorrels** in dergelijke laagjes, te herleiden valt **hoe groot een piekafvoer/overstroming in het verleden** was (Box 1 en 2) en dat dit te relateren is (Box 3) aan de grootte van het veroorzakende hoogwater (Toonen *et al.*, 2015). Als de overstromingslaagjes ook gedateerd kunnen worden, en als bovendien de resultaten van verschillende locaties en overlappende ouderdom ervan de relatieve groottes en



Figuur 3: Reikwijdte van het overstromingsarchieven terug in de tijd, uitgezet langs logaritmische as. Grijstinten geven weer in welk tijdsbereik de overstromingsreconstructies het meest bruikbaar zijn, wat betreft dekking, nauwkeurigheid en resolutie, unieke informatie (Cohen et al., 2014b/dit rapport; naar Glaser & Stangl, 2003; Cohen & Lodder, 2007).

timing van hoogwater onderling reproduceren, kan uit dit specifieke sedimentaire archief een overstromings-chronologie gereconstrueerd worden. In een **gecompileerde tijdserie, opgebouwd uit de opgewerkte overstromingsrecords afkomstig van een reeks locaties met gedeeltelijk overlappende ouderdom**, kunnen de grotere overstromingen worden aangewezen, naar grootte worden gerangschikt en worden voorzien van herhalingstijden. Dat is de aanpak die in het onderzoek gevolgd is, resulterend in een **overstromingsgeschiedenis van 8000 jaar die voor de voor de allergrootste overstromingen (extremen) als compleet te beschouwen is**, en waarin de **ondergrens van registratie van grotere overstromingen variabel is (drempelwaarde)**.

3.1.2 Keuze voor het apex-gebied

Het uitgangspunt van sedimentaire registratie van grotere en kleinere overstromingen in geulvullingen, als gevolg van suspensief transport over de overstromingsvlakte tijdens piekafvoeren, is in het eerste hoofdstuk al geïntroduceerd (paragraaf §1.1 en Box 1). Het **apexgebied van de Rijndelta (fig. 1)** is het meest geschikte gebied om een samengesteld sedimentair archief van overstromingen te verzamelen met onderscheidend vermogen naar magnitude. In dit gebied verbreedt het rivierdal zich tot een deltavlake, neemt het verhang af, splitst de rivier zich in meerdere takken en bedekken jonge overstromingsafzettingen oudere oppervlak tot op grote afstand van riviergeulen. Het gebied heeft vier eigenschappen die bevorderlijk zijn voor de hier verder geëxploiteerde sedimentaire registratie van overstromingen.

De eerste eigenschap is dat het apexgebied zich weliswaar stroomafwaarts verbreedt, maar desondanks nog een **relatief beperkte (dal)breedte heeft**, die er tussen 8 en 15 km varieert. De randen van dal en delta worden er gevormd door stuwwallen en randen naar hogere (oudere) terrasoppervlakken met rivierduincomplexen daarop. De nog relatief geringe breedte van de overstromingsvlakte in het apexgebied betekent dat de waterspiegel er bij grote

piekafvoeren relatief hoog opgezet raakt, zodat niet alleen in de bedding, maar ook in de overstromingsvlakte tijdelijk waterdieptes gerealiseerd worden waarin relatief hoge stroomsnelheden bereikt kunnen worden. Bij matig grote piekafvoeren, is de waterdiepte boven de overstromingsvlakte in het apexgebied geringer. In de overstromingsvlakte zijn de **stroomsnelheden afhankelijk van de diepte van overstroming**. Ze zijn lager bij normale (vlakte ondiep overstroomd) en hoger bij grote hoogwaters (vlakte diep overstroomd). Dit bepaalt de transportafstand van sediment van verschillende korrelgroottes, dat zwevend in de waterkolom kan worden verplaatst tussen het uittreepunt uit de hoofdgeul en bezinkgebieden (bijvoorbeeld: Schillereff *et al.*, 2014).

Geholpen door de grotere hoeveelheden sediment die tijdens hogere piekafvoeren langduriger gemobiliseerd worden, ontstaan er daardoor verschillen in de korrelgrootte tussen afzonderlijke laagjes in de in de loop der tijd accumulerende geulvulling (Box 2). De grotere waterdiepte en de hogere stroomsnelheden langs het pad van het water over de overstromingsvlakte tot kenmerkende afwijkingen in het sediment in de afzettinglaagjes van tijdens grotere overstromingen t.o.v. normale (Box 3). Verder benedenstrooms in de veel bredere deltavlake (>30 km), zijn waterstands- en stroomsnelheidsverschillen tussen normale en extreme overstromingen kleiner en daarmee wordt de interpretatie van afzettingen als overstromingsarchief minder eenduidig¹⁴.

De tweede eigenschap van het apexgebied is dat **geschikte locaties** voor reconstructie van paleo-overstromingen er **ruim voldoende aanwezig** zijn. In het bovenstroomse deel van de delta en het in aangrenzend Duitsland heeft de Holocene Rijn een sterk meanderend karakter. De natuurlijke rivierloop verlegt zich er regelmatig door laterale migratie en bochtafsnijding (Van Dijk *et al.*, 2012). Dit vormt er typische hoefijzermeren (*oxbow lakes*; Foto 2), die als geïsoleerde meertjes in de overstromingsvlakte tijdens overstromingen ideale sedimentvangens zijn (Toonen *et al.*, 2012).

Verder benedenstrooms zijn de meanders van de Rijn kleiner en splitst ze in meerdere takken. Hier bestaan ook veel restgeulen, maar deze zijn niet alleen het gevolg van meanderafsnijding, maar merendeels het resultaat van verleggingen van hele riviertakken (avulsies; Stouthamer & Berendsen, 2000). Wanneer zich nieuwe takken door avulsies vormen, raken oude takken vanaf splitsingspunten over vele meanderbochten lengte in onbruik (meestal als een gradueel proces; §2.3, §2.4). De beddingen verliezen langzaam hun aandeel in de afvoer en raken over grotere lengtes ingevuld met over de geulbodem getransporteerd zand, aangevoerd vanaf het splitsingspunt dat eeuwenlang kan functioneren (Kleinhans *et al.*, 2012; Toonen *et al.*, 2012). Anders dan de *oxbow lakes*, zijn de restgeulen met aan avulsies en splitsingspunten verbonden ontstaanswijze daardoor veel minder geschikt voor de ontworpen methode. Locaties met rustiger registratie (à la Box 2) zoals die in *oxbow lakes*, komen op enige afstand stroomafwaarts in de restgeulen van de delta ook wel voor, maar de geschikte vullingen reiken er minder diep/ bestrijken minder tijd en zijn daarom als onvoldoende geschikt beoordeeld (Toonen, 2013).

¹⁴ *In de bedijkte toestand van de jongste eeuwen, treedt binnen de uiterwaarden van het Rivierengebied wel weer de gewenste differentiatie in waterstanden, stroomsnelheden en sedimentaire registratie op die nodig is voor deze benadering. Sinds 1850 zijn zandbanken uit de bedding verdwenen, en zijn kribben aangelegd met kribvakstranden, als onderdeel van riviernormalisaties. Dit heeft zijn weerslag gehad op de bijmenging van zand in de sedimentlast van overstromingswater bij piekafvoeren. Het maakt de 18^e en 19^e eeuw tot een meer geschikte periode voor de calibratie van magnitudes volgens sedimentaire archieven op directe meetreeksen (Toonen *et al.*, 2015 / bijlage C; zie figuur 11).*



Foto 2:
Tekstboekvoorbeeld van een gedeeltelijk opgevulde afgesneden meanderbocht, in een beboste overstromingsvlakte. In de achtergrond is de actieve rivier zichtbaar.

Bron: A. Baertsch, wildtropix.com

In aanvulling op de vormingsomstandigheden voor meanders, zijn de condities die de langdurige preservatie van vers afgesneden meanders beïnvloed hebben de derde gunstige eigenschap. Niet alleen vanwege de relatief grootte dalbreedte, maar ook omdat het apex-gebied in de jongste 3000 jaar onderdeel van de delta is geworden, hebben oudere meanderafsnijdingen (en hun sedimentaire archieven met overstromingsregistratie) er gunstiger kunnen preservareren dan verder bovenstrooms. Stroomopwaarts van Düsseldorf bleef de Rijn zich ook in het jongste deel van het Holoceen insnijden (Erkens *et al.*, 2011). Daar erodeerde de rivier de eerder gevormde afzettingen vaker, en vernietigde daarbij potentiële overstromingsarchieven vaker. In het bredere apex-gebied leidde dit tot **relatief meer overgebleven oude meanders met geulvullingen**, waaronder aan de randen bovendien exemplaren die **op grotere afstand (distaal) van de actieve rivier** lagen. Laatstgenoemde bochten ontvingen per overstroming minder sediment en vullen relatief langzaam op, en creëren zo sedimentaire archieven die millennia kunnen overspannen. In het Nederlands-Duitse grensgebied (fig. 1) zijn overstromingsarchieven die teruggaan tot de vorming en afsnijding van de eerste generatie grote meanderende bochten uit het Holoceen (~7000 jaar voor Chr.), ontstaan in het opwarmende klimaat in de afloop van de laatste IJstijd (Erkens *et al.*, 2011).

De laatste eigenschap is de gunstige positie in het rivierenetwerk, bovenstrooms van het eerste splitsingspunt en benedenstrooms van de samenvloeiing met de laatste zijrivier. De Rijn splitst zich in het apex-gebied in meerdere takken (Waal, Nederrijn, en IJssel). Het splitsingspunt is pas sinds de constructie van het Pannerdens Kanaal in 1709 gefixeerd (Van de Ven, 1976; Van de Ven & Eymers, 2007). Daarvoor was de verdeling van afvoeren over de verschillende riviertakken dynamisch (Kleinhans *et al.*, 2012). In de directe omgeving van het splitsingspunt, maar **benedenstrooms van het instromen van de laatste grotere zijrivier** (de Lippe; fig. 2), is overstromingssignaal van de **volledige Rijnafvoer** in de afgesneden meanderbochten **ongedeeld geregistreerd**. Dit definieert de bovenrand van het ideale studiegebied. Deze ligt bij Wesel. Een tweede grote zijrivier, met een groter debiet dan de Lippe, is de Ruhr die haar samenvloeiing met de Rijn in Duisburg heeft. Geulvullingen uit oude meanders tussen Duisburg en Wesel zijn in aanvulling op die uit het eigenlijke apex-gebied gebruikt.

De benedenrand van dat ideale gebied wordt gevormd door het eerste splitsingspunt van de delta (de apex-splitsing). Deze ligt bij Lobith en lag tot 2500 jaar geleden bij Nijmegen. Als sedimentair archieven van langs individuele vertakkingen van de rivier worden verworven, mag verwacht worden dat de daaruit gereconstrueerde geschiedenis vooral voor die specifieke riviertak geldig is. Voor zeer grote overstromingen die onderwerp zijn van deze studie geldt echter, dat ze ook over aanzienlijke afstand stroomafwaarts van het eerste splitsingspunt nog de volle breedte van de delta onder water zetten.

BOX 2 – Korrelgrootteverschillen in bezonken overstromingssediment

Om de volgende redenen zijn uitschieters in de grofheid van laagjes van overstromingssediment (een grotere spreiding van korrelgroottes, een grove staart aan de verdeling), op verschillen in de sedimentlast tussen normale en zeldzaam grote piekafvoeren terug te brengen:

1. Grotere stroomsnelheden in de hoofdgeul brengen er meer zand in beweging. Dat beweegt daar deels over de bodem als duinen ('bodemtransport'), maar een ander deel wordt bijmenging van het suspensief transport in de geul, en een deel daar weer van wordt onderdeel van het suspensief transport in het water dat naastgelegen vlaktes overstroomt.
2. Tijdens grotere piekafvoeren zijn de waterdieptes in de overstromingsvlakte hoger, waardoor overstromingswater er harder stroomt en grovere korrels in het suspensief transport er over grotere transportlengte meegedragen kunnen worden dan tijdens minder hoge afvoeren.
3. Het bezinken van grove korrels uit het suspensief sediment is veel eerder voltooid dan het bezinken van het fijne sediment, door de verschillen in uitzaknelheid tussen grotere en fijnere fracties van het suspensief transport, en het zich langduriger voortzetten van de aanvoer van fijn sediment (ook in de fase van *waning flow*). De grofste laagjes kunnen exclusief gezien worden als afzettingen van tijdens het moment met de grootste stroomsnelheden over het transport pad tussen rivier (actieve geul) en invanglocatie (restgeul), op het piekmoment van de overstroming.

Pas benedenstrooms van de lijn Tiel-Wijk bij Duurstede zijn er afvoerverdelingseffecten te verwachten¹⁵. Geulvullingen in oude meanders in de Overbetuwe, Ooijpolder, Liemers en in de uiterwaarden van het rivierengebied zijn daarmee potentiële onderzoekslocaties. Figuur 4 toont het uiteindelijk bestreken onderzoeksgebied, en haar relatie met delta apex en de Lippe-samenvloeiing.

3.2 Methode-ontwikkeling

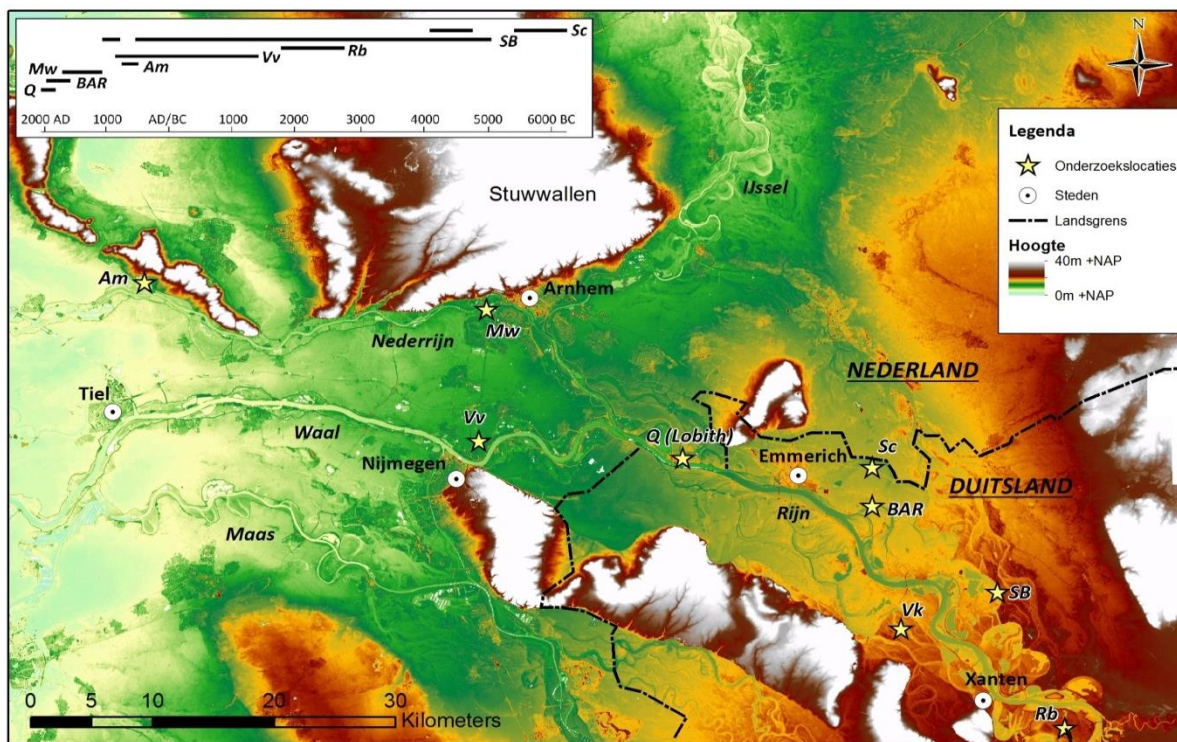
Het opwerken van boorkernen met overstromingsafzettingen uit meters-diepe geulvullingen, via de variaties in de korrelgrootteverdelingen van opeenvolgende dunne laagjes, tot een overstromingschronologie waarin aan de opeenvolgende geregistreerde grootste events herhalingstijden en magnitudes zijn toegekend, volgde vijf hoofdstappen:

- Selectie en bemonstering van de onderzoeklocaties,
- Dateringen en opstellen van het ouderdom-diepte model,
- Meten van korrelgrootteverdelingen,
- Berekenen van de overstromingsmagnitudes,
- Compileren tot één overstromingschronologie op grond van de dateringen en de magnitudes.

3.2.1 Selectie en bemonstering onderzoeklocaties

Op basis van informatie uit eerdere paleogeografische studies (Berendsen & Stouthamer, 2001; Zhou, 2000; Shala, 2001; Erkens *et al.*, 2011; Janssens *et al.*, 2012; Cohen *et al.*, 2012) en onderliggende boringendatabase (UU-LLG; Berendsen & Stouthamer 2001) is een groot aantal potentiële sites gescreend. Hieruit zijn zeven onderzoekslocaties geselecteerd voor bemonstering en detailanalyse. Alle locaties zijn opgevulde afgesneden meanderbochten (Foto 2).

¹⁵ De locaties Wijk bij Duurstede en Tiel, en de Peelrandbreukzone die er de delta kruist, fungeren in de jongste 6000 jaar steevast als vertakkingslocaties. Juist hier hebben tenminste 8 grotere avulsies plaatsgevonden (Stouthamer & Berendsen, 2000; Berendsen & Stouthamer, 2002; Cohen *et al.*, 2002; 2005; Stouthamer *et al.*, 2011).



Figuur 4: Onderzoeklocaties in de apex van de Rijn-Maas delta (Toonen, 2013). Q: afvoerserie Lobith, BAR: Bienener Altrhein, Mw: Meinerswijk, Am: Amerongen, Vv: Visveld (Lent), Rb: Rheinberg (10 km zuidelijk), SB: Schloss Bellinghoven, Sc: Schriek (Netterden), Vk: Vossekuhl 'slackwater' lokatie. De bestreken periode per onderzoeklocatie is linksboven weergegeven.

Met behulp van een Livingston *piston corer* zijn op de meest geschikte positie in de geulvullingen boringen tot maximaal 12 meter gezet. De boring wordt daarbij meter per meter als een serie kernsegmenten omhooggehaald en verpakt voor transport naar het lab. In principe is steeds geboord tot in het zand of grindcontact dat de bodem van de voormalige geul markeert.

In het laboratorium zijn de kernen gefotografeerd en beschreven. Vervolgens is beslist wat het voor het overstromingsonderzoek bruikbare deel van de gekernde geulopvulling was. De bovenste meter van de invulling was in de regel sterk beïnvloed door oxidatie, bioturbatie en mogelijk ook door golferosie in ondiep water en is daarom van detail-bemonstering uitgesloten. Het overige deel van de geulvulling heeft in de regel over 5 tot 10 meter dikte een sterk horizontaal gelaagde opbouw, die het in §1.1 en §3.1 beschreven afzettingsmilieu van geïsoleerde meertjes in de overstromingsvlakte representeert, met onderscheidend vermogen tussen laagjes van normale en van extreme overstromingen (Box 3).

Het geselecteerde traject met de te exploiteren onregelmatig gelamineerde opeenvolging van ingevangen overstromingssediment is op hoge resolutie continu bemonsterd voor korrelgrootte-analyse en organisch stofgehalte. De dikte van individuele monsters was 2 cm in kerndelen zonder zichtbare gelaagdheid. Ze was 1 tot 2 cm in kerndelen met zichtbare laminaties, met de grenzen op de overstromingslaagjes aangepast. In de meest organische deeltrajecten, en deeltrajecten met zichtbaar organisch materiaal (takjes, bladresten) is materiaal verzameld voor ^{14}C -datering. Monsters voor ^{14}C -dateringen zijn meestal genomen in de restgeulvullingen nabij herkenbare lithologische veranderingen of in humeuze intervallen waar zich relatief veel dateerbaar materiaal bevindt.

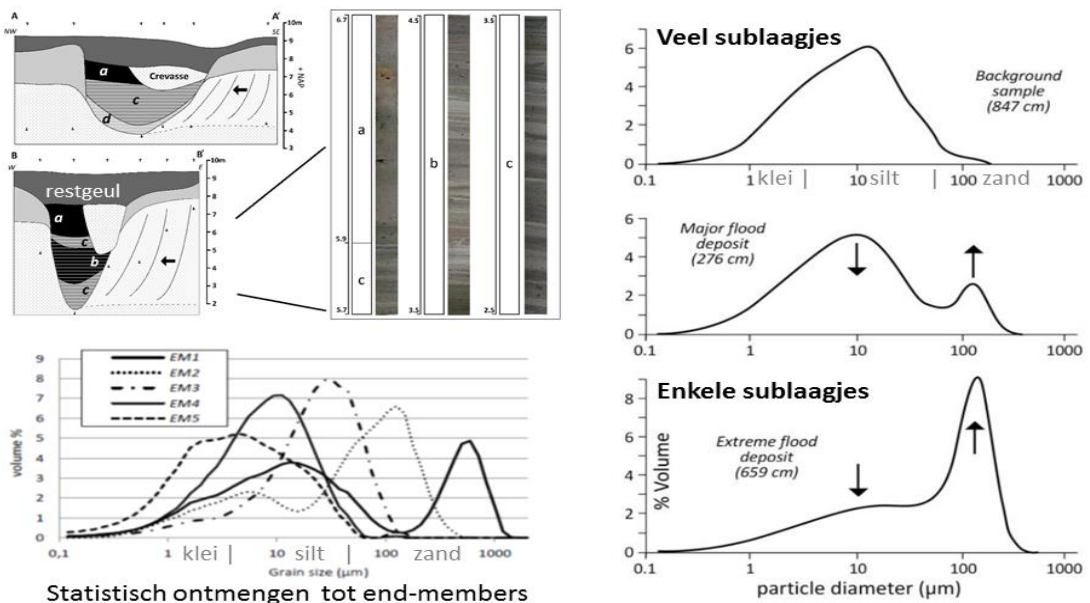
BOX 3 – LAAGKENMERKEN VAN EXTREME OVERSTROMINGEN

Individuele overstromingslaagjes in geulvullingen die bij relatief grotere piekafvoeren en stroomsnelheden gedurende de passage van de piekafvoer zijn ingevangen (Box 2) uit het suspensief transport (§1.1; Box 1), onderscheiden zich van de overstromingslaagjes van kleinere afvoeren door:

- Een relatief grotere bijmenging aan zandkorrels aanwezig in het slib en daardoor een relatief grovere staart van de korrelgrootteverdeling t.o.v. normale laagjes;
- Een grotere laagdikte, waardoor de *event*-beds van de grootste events macroscopisch te herkennen zijn en de gelaagdheid minder gevoelig voor verstoring is.
- Sterkere verticale concentratie van de grovere korrels in het onderste deel van het overstromingslaagje, bedekt door overwegend fijner sediment naar de top van het laagje.

Deze kenmerken tonen zich ook in de End-Member verdelingen die per onderzoekslocatie uit de reeksen korrelgroottebepalingen van de gelamineerde geulvullingen zijn bepaald (figuur 7).

Hoge scores op End-Member 1 en 2 worden geacht condities van diepe inundatie van de overstromingsvlakte en hoge stroomsnelheden te representeren, zoals bij passage van zeer hoge piekafvoeren optreedt. End Members 3, 4 en 5 representeren condities met lagere stroomsnelheden en beperkte inundatiediepte, bij 'normale' piekafvoeren en condities bij dalende waterstanden enige tijd na het passeren van afvoerpiek ('waning stages').



Het dateren van organisch materiaal uit de incidentele grofkorrelige inschakelingen is vermeden, omdat in zulke laagjes verzameld materiaal een grote kans heeft kort voor afzetting lokaal herwerkt te zijn, en dus ouder kan zijn dan de afzetting. Organisch macro-rest materiaal van oevervegetatie verdient de voorkeur, omdat daarin seizoenale zaad- en bladval de aanwezigheid van macro-resten verklaart en materiaal en sediment daarmee grote kans hebben even oud te zijn. Voor de ^{14}C -dateringen zijn vooral zaden en bladresten gebruikt van terrestrische oeverplanten, om dateringen van eenjarige producten te verkrijgen en hard water-effecten uit te sluiten (Törnqvist *et al.*, 1992).

Per onderzoekslocatie is er naar gestreefd minimaal 4 dateringen te verkrijgen, verspreid over het verticale bereik van de geulvulling. Zulk 'macrorest-materiaal' wordt in het gelamineerde kleiige deel van de geulvullingen vooral aangetroffen in die intervallen waar de matrix van het sediment ook humeus is. In organische diepte-intervallen (gyttja, veen) is eigenlijk altijd wel dateerbaar materiaal voor handen, maar in de clastische diepte-intervallen van de geulvulling ligt dit anders (Minderhoud *et al.*, 2013; 2016). In welke laagjes binnen die intervallen wel of niet macroresten worden aangetroffen, is er ongerelateerd aan de grofheid en dikte van de laminaties (en daarmee ook ongerelateerd aan de grootte van de overstroming). Van op welke dieptes in de kernen dateerbaar materiaal verworven kon worden, is willekeurig. Dit is de reden dat de nodige aandacht is besteed aan het specificeren van de nauwkeurigheid van het ouderdom-diepte model langs het onregelmatig gelamineerde (en dus onregelmatig gesedimenteerde) deel van de kern waarin de overstromingsinformatie ligt besloten is besteed. Er is niet gepoogd om in de boorkernen specifiek de allergrofste laagjes het meest precies te dateren: de dateringen zijn verzameld t.b.v. ouderdomsmodellering van de geulvullingen van de diverse locaties (fig. 5, fig. 6).¹⁶

3.2.2 Opstellen ouderdom-diepte model

Voor ¹⁴C-calibratie en de ouderdomsbepaling van tussenliggende lagen en individuele overstromingen is op iedere onderzoekslocatie uitgegaan van een lineair sedimentatie model met knikpunten. Dit is per locatie steeds beschreven als een *U_sequence* CQL-model voor gebruik in het computerprogramma OxCal (Bronk Ramsey, 2009). Hiermee worden de ¹⁴C ouderdommen volgens Bayesiaanse statistische principes gecalibreerd: met medeneming van superpositie (in stratigrafische volgorde: in sequentie). De 1- σ betrouwbaarheidsintervallen van de calibratie wordt daarmee verder ingeperkt t.o.v. losse calibratie van individuele dateringen (fig. 6).

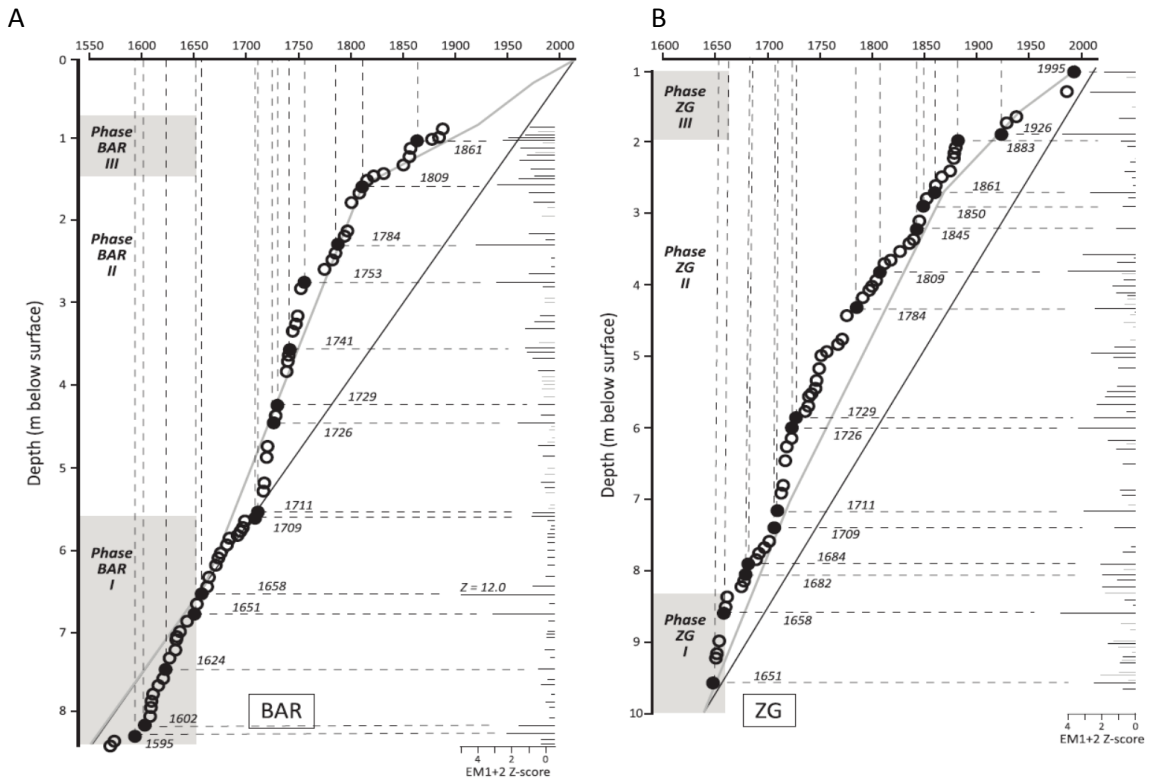
De genoemde knikpunten in het *U_sequence* model, volgen uit dieptes waarop de grootste veranderingen in sedimentaire karakteristieken en organisch stofgehalte werden aangetroffen. De precieze ligging van die grenzen is exploratief statistisch bepaald (met change point analyse op de LOI en de korrelgrootte data; zie ook 3.2.4), maar ook uit alleen de visuele inspectie en beschrijving blijken de markante texturele grenzen aan de onderzijde (naar beddingzand) en bovenzijde (naar veen of bodemvorming-beïnvloedde klei) van het gelamineerde deel van de geulvulling al wel. Het ouderdoms-diepte model voegt zich op deze manier met knikpunten naar lithologische overgangen die op sterke verandering in sedimentatiesnelheden wijzen.

Ouderdom en betrouwbaarheidsinterval van individuele laagjes - en dus de overstromingen - volgen direct uit het ouderdom-diepte model. Daarnaast geeft het ouderdom-dieptemodel inzicht in de totale duur van sedimentaire registratie *per locatie*. Dit is van belang voor het berekenen van herhalingstijd voor de relatief grofste overstromingslaagjes, en wordt uiteindelijk gebruikt bij het toekennen van relatieve overstromingsmagnitudes in de samengestelde reeks.

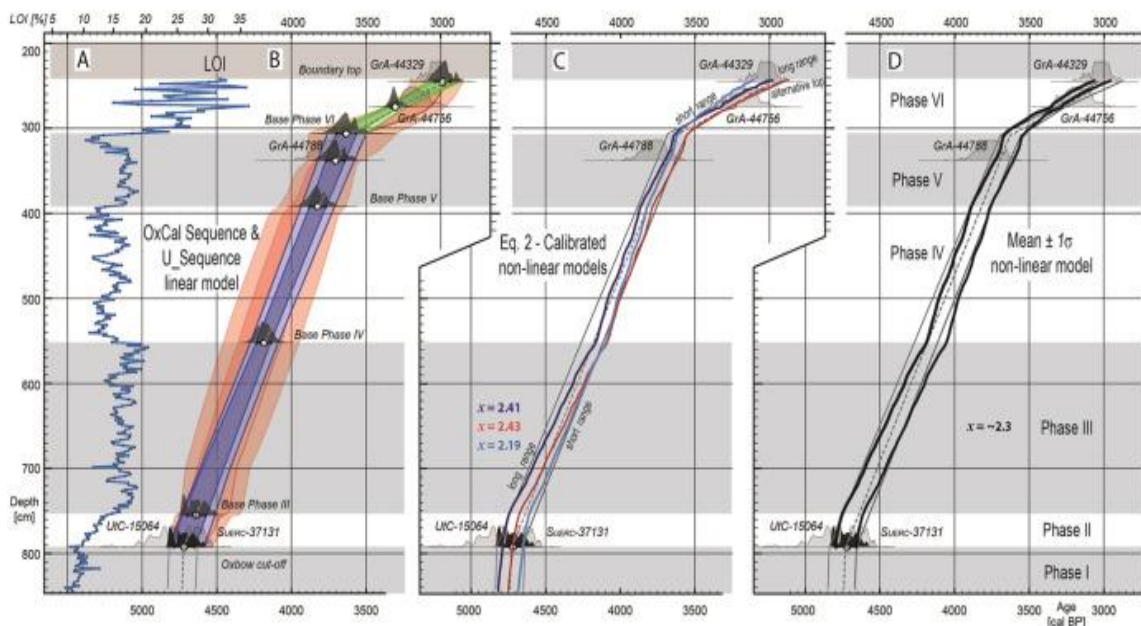
In het bereik van historische bronnen zijn ouderdom-dieptemodellen verfijnd door *tuning* van de grootste-grofste overstromingslaagjes (Toonen *et al.*, 2015). Hierbij is het getrapte lineaire sedimentatiemodel gebruikt als de initiële ouderdomsindicatie. De grootste historische overstromingen zijn, vanwege de schade die ze veroorzaakten, beschreven in historische documenten, waarbij de timing van de overstroming vaak tot op de dag nauwkeurig bepaald kan worden. In ouderdom-diepte modellen op basis van ¹⁴C-dateringen is de nauwkeurigheid

¹⁶ Het zijn ook niet per definitie de onderzoekslocaties die het meest geschikt zijn voor registratie van de complete overstromingsgeschiedenis, die ook het meest geschikt zijn voor exacte datering van de allergrootste prehistorische events. Verdere precisering van de ouderdommen van de grootste overstromingen vereist juist de integratie van de dateringsresultaten uit dit onderzoek met die uit andere contexten binnen het overstromde landschap. Zie ook H4.

bepikt tot 30-100 jaar (1σ). Waar historisch bekende grote overstromingen binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval van de ouderdom van een grof overstromingslaagje volgens het ouderdom-dieptemodellag, is de historische ouderdom overgenomen.



Figuur 5: Voorbeeld van ouderdom-diepte model in het historische bereik, op basis van historische vermelding (jaren zwarte bolletjes) en korrelgrootte karakteristiek (EM1+2 Z-score). Locaties A: BAR (meander, Bienener Alrhein) en B: ZG (wiel, Zwarte Gat). Uit: Toonen et al., 2015 / Bijlage C.

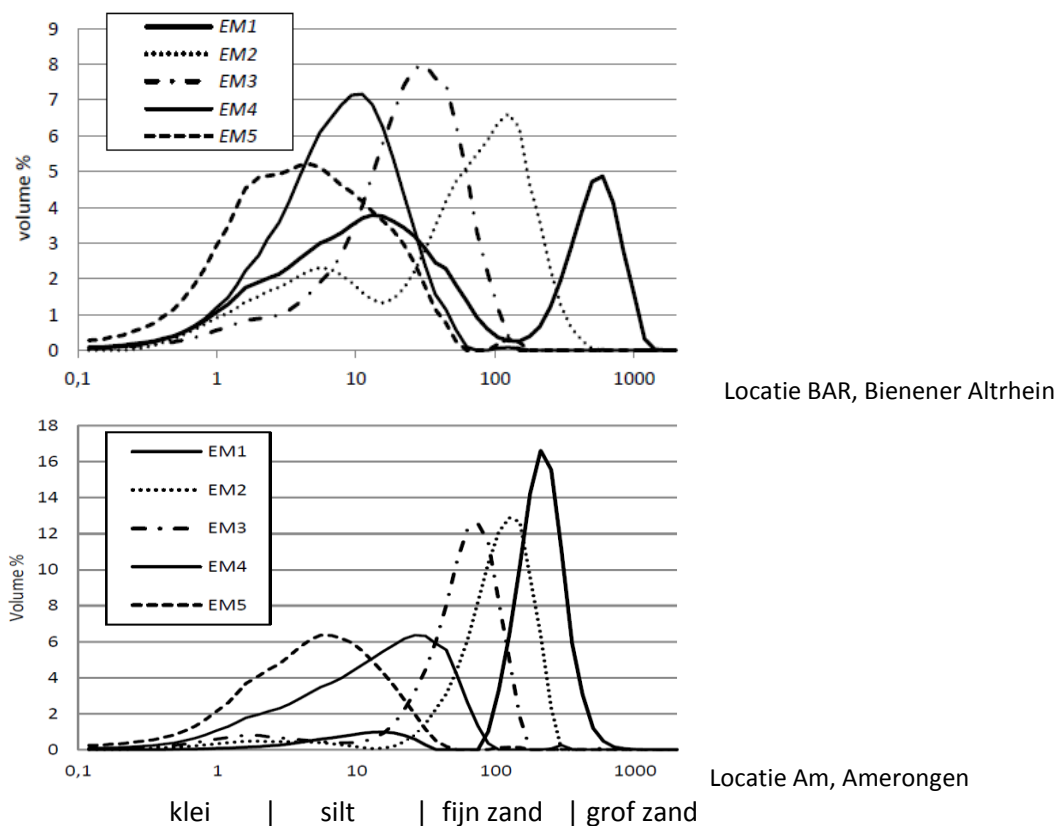


Figuur 6: Voorbeeld van ouderdom-diepte model in het pre-historische bereik, gebaseerd op de sedimentologie (A) en ^{14}C dateringen (B). Locatie Rb. Uit: Minderhoud et al., 2016 / Bijlage D.

3.2.3 Meten van korrelgrootteverdelingen

De korrelgroottebepalingen zijn uitgevoerd in het sedimentair laboratorium van de VU Amsterdam, i.s.m. Dr. M.A. Prins. De monsters werden voorbehandeld met zoutzuur om calciumcarbonaten op te lossen, met waterstofperoxide om organisch materiaal te verwijderen en met natriumpyrofosfaat om de cohesie tussen korrels op te heffen en flocculatie te voorkomen (protocollen: Konert & Vandenberghe, 1997). Korrelgrootteverdelingen van de monsters zijn gemeten met een Sympatec HELOS KR laserdiffractie particle-sizer.

Eerder onderzoek heeft bevestigd dat vooral de ‘grove staart’ van korrelgrootteverdelingen samenhangt met overstromingsmagnitude (Toonen *et al.*, 2015). Statistische parameters zoals gemiddelde of modale korrelgrootte zijn veel minder differentiërend tussen normale en grote afvoeren. Om de grove staart van korrelgrootteverdelingen te karakteriseren zijn grootheden die de grove staart karakteriseren gebruikt: het 95^e percentiel van de korrelgrootteverdelingen (P95) en proportionele bijdrage van de grofste ontmengde korrelgrootte-populatie, volgend uit statistische End Member Modelling (EMM, Weltje & Prins, 2007). In het laatste geval wordt de grofheid van een laagje wordt uitgedrukt als de proportionele contributie (%) van de hoogst gerangschikte End Member(s) (EM1,EM2 in fig. 7).



Figuur 7: Voorbeeld van End-Member onderscheid in korrelgrootte-populaties van ingevangen suspensief-transport sediment. De X-as geeft de korrelgrootte weer (naar diameter, op logaritmische schaal). Bijlage A geeft per onderzoekslocatie de karakterisering in vier tot vijf End-Members.

3.2.4 Zeldzaamheid, absolute herhalingstijden en relatieve grootte

Om overstromingsmagnitudes te berekenen uit P95 en end-member data zijn nog enkele stappen vereist. Allereerst is er gekeken naar stapsgewijze en geleidelijke lineaire veranderingen in de grofheid van achtergrondsedimentatie in de boorkernen. Dergelijke trends in de korrelgroottedata zijn toe te schrijven aan processen als migratie van de toenmalig actieve geul weg van of naar de onderzoekslocatie toe, door natuurlijke bochtafsnijdingen (plotseling) en laterale bochtuitbouw (geleidelijker). Daardoor verandert de afstand tot de onderzoekslocatie, en daarmee de korrelgrootteverdeling zoals die bij 'normale' overstromingen neerslaat.

Taylor (2000) ontwikkelde software waarmee met een *bootstrapping*-methode zulke sprongen in de data objectief statistisch te identificeren, en noemde dit change-point analyse (website: www.variation.com). De gegevens-series zijn op de plek van 'change-points' gesplitst. Alle deelseries zijn vervolgens individueel genormaliseerd (lineaire detrending). De na normalisatie overgebleven variatie in het signaal wordt beschouwd als het gevolg van afwisselende grotere en kleinere overstromingen, ontdaan van sedimentaire veranderingstrends.

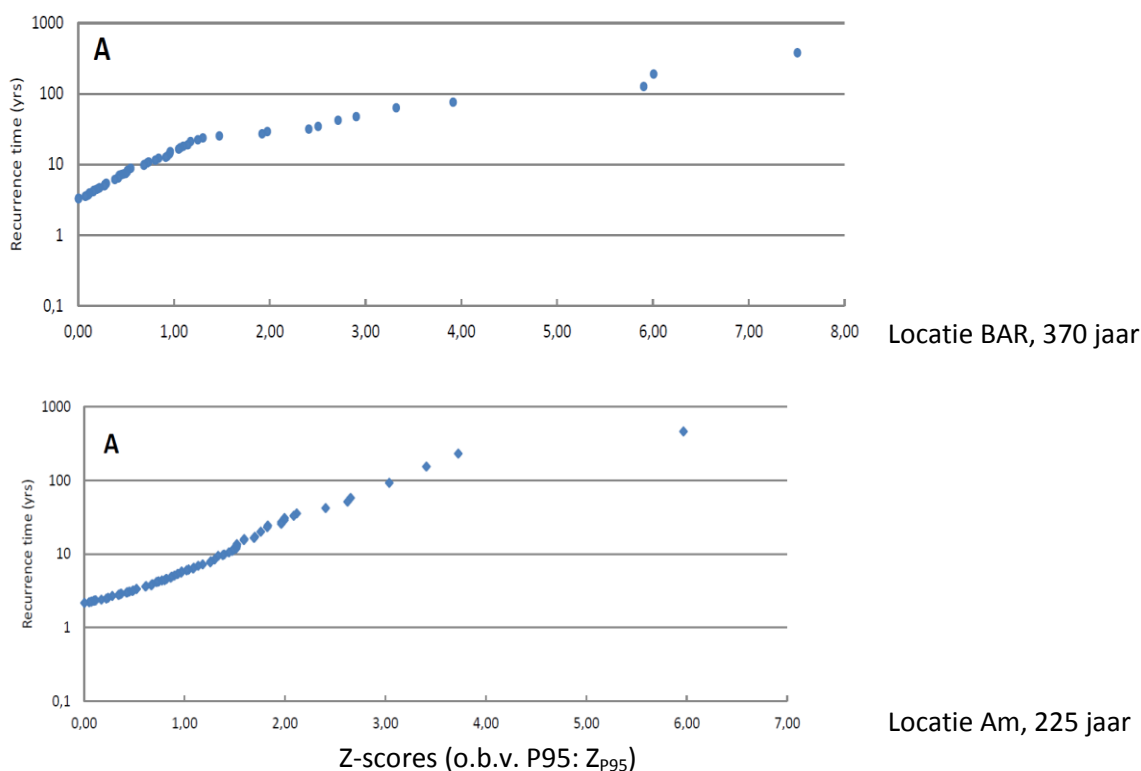
Een tweede noodzakelijke stap om data van verschillende secties en van verschillende locaties te kunnen vergelijken is het omschrijven van de korrelgrootte data naar Z-scores. Z-scores drukken de grofheid van een laagje (x) uit ten opzichte van de gemiddelde achtergrondwaarde (μ) in aantal malen de standaard deviatie (σ), volgens: $Z = \frac{(x - \mu)}{\sigma}$. Ze zijn berekend na normalisatie van de meetgegevens voor gradueel verloop en blijvende sprongen in de gemiddelde achtergrondwaarde langs de boorkern: μ heeft met toenemende diepte dus niet steeds dezelfde grootte. Bijlage A toont de gegevens voor en na normalisatie voor trends en breaks in de achtergrondwaarde voor alle onderzoekslocaties. De berekende Z-scores drukken de zeldzaamheid van het voorkomen van een bepaalde (relatieve) grofheid uit. Dit maakt herhalingsstatistiek per onderzoekslocatie mogelijk, en dient ook de onderlinge vergelijking van signalen van meerdere onderzoekslocaties. De Z-scores zijn parallel berekend over 'P95' en over 'de grofste End Members'.

Als laatste stap zijn de Z-scores omgerekend naar statistische herhalingstijden. Op basis van de frequentieverdeling van Z-scores en de functiebeschrijving voor statistische herhalingstijd (dezelfde functie als ook in de voorspellingen o.b.v. meetreeksen in gebruik is), is per onderzoekslocatie een regressievergelijking opgesteld. De herhalingstijd van het event met de hoogste Z-score is hiermee op een tweede manier te berekenen. De eerste manier van berekenen betrof simpelweg de op de onderzoekslocatie omspannen tijd (fig. 8). Dat levert op proximale locaties waar de geulen in relatief korte tijd opgevuld raakten, relatief grote onzekerheid over de herhalingstijd van het grootste event: De beperkte tijdsduur van zulke archieven limiteert hoe accuraat de herhalingstijd van dat grootste event ingeschat kan worden (op dezelfde manier als dat voor de lengte van de moderne meetreeks geldt; zie H1 en Toonen, 2015).

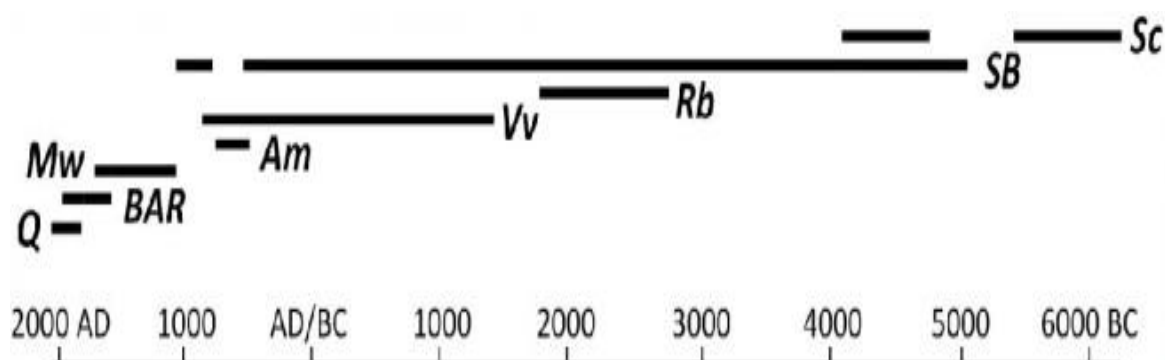
Dit geeft een ondergrens voor de herhalingstijd: als het archief langer was geweest, is het denkbaar dat ook in dat deel nog steeds geen tweede even extreem event was voorgekomen, wat het wel aangetroffen event des te extremer maakt. Om dit effect met een niet-sedimentair voorbeeld te illustreren: de afvoer van 1926 is de grootste overstroming in de meetreeks sinds 1901 op basis van afvoermetingen, en óók de grootste sinds 1772 op basis van waterstandsaflezingen. Volgens de eerste reeks, is de jaarlijkse kans op overschrijding van die magnitude c. 1/100, volgens de tweede reeks c. 1/250.

De tweede manier, met de regressievergelijking, betreft ook de verdeling van matig-grote events in de berekening van de herhalingstijd van het grootste event. Hieruit blijkt of het allergrootste event in de onderzoekslocatie als een extreme uitbijter gezien moet worden (en er dus als een zeldzamer event dan wat de eerste methode aangaf zou kunnen worden beschouwd) of dat deze qua grootte aansluit op de verdere verdeling van net-iets-minder-groot ingeschaalde events (in dat geval geven beide methodes een vergelijkbare herhalingstijd voor het grootste event).

De eerste methode leverde een op telling en datering gebaseerde ondergrens voor de herhalingstijd, en de tweede methode een op kansverdelingsfuncties gebaseerde schatting van de herhalingstijd met een betrouwbaarheidsinterval er omheen. Voor alle onderzoekslocaties is dit andermaal uitgewerkt voor zowel de over 'P95' berekende Z-scores, als over 'de grofste End Members'. Dit levert dus per extreme overstromingen, per onderzoekslocatie 2 minimum schattingen en 2 regressie-bepalingen van de herhalingstijden op (bijlage A).



Figuur 8: Voorbeelden van plots van Z-scores, gerangschikt naar terugkeerfrequentie (recurrence time). Bijlage A bevat deze plots voor alle onderzoekslocaties. De Z-scores zijn berekend over P95 (de bijlage toont ze ook over End-Members berekend). De berekening van terugkeerfrequenties gebruikt de door de geulvulling bestreken tijdsduur (Bienener Altrhein BAR: c. 370 jaar van c. 1550 tot 1920 AD; Amerongen Am: c. 225 jaar van c. 575 tot c. 800 AD). Het event op locatie BAR met Z-score 7.5 is toegeschreven aan 1658, de twee events met $Z_{P95}=6$ aan 1784 en 1571 (vergelijk fig. 5a, Z_{EM1+2}). Dit zijn alle jaren met (ook) ijsdammen. Het event van 1651 heeft een $Z_{P95}=4$ en een Z_{EM1+2} . Op locatie Am dateert het event met $Z=6$ rond 690 AD. Bovenstaande plots zijn wat in de hoofdttekst als Methode 1 voor de bepaling van de herhalingstijd / zeldzaamheid van de overstromingen wordt beschreven. Als op bovenstaande gegevens, als Methode 2, een kansverdeling-beschrijvende functie wordt gefit (regressie-analyse), worden voor de hogere Z-scores wat langere herhalingstijden verkregen. Methode 1 geeft een ondergrens van de herhalingstijd. Methode 2 een gemiddelde met onzekerheid.



Figuur 9: Dekking in de tijd en overlappende overstromingsregistratie van de 7 onderzoekslocaties (series BAR, MW, Am, Vv, Rb, SB, Sc; Bijlage A) en directe metingen van afvoer (Q; RWS Waterbase 2012).

3.2.5 Compileren tot één overstromingschronologie

In deze stap is de informatie van meerdere onderzoekslocaties gecombineerd, waar deze volgens de ouderdom-diepte modellen overlap in de tijd vertoonden en de event-laagjes van de allergrootste overstromingen zich op meerdere locaties registreerden (fig. 4, fig. 9). Hierbij zijn de event-laagjes (grote staart korrelgrootteverdeling) van vergelijkbare zeldzaamheid (Z-score; genormaliseerd voor verschillen in proximaliteit) en timing (ouderdoms-diepte model; genormaliseerd voor veranderingen in sedimentatiesnelheden tussen *change-points*) met elkaar gelijk gesteld. Om als signaal van één-en-dezelfde extreme overstroming beschouwd te worden, dient het event-laagje volgens het ouderdom-diepte model van de meest nauwkeurige dateerbare locatie, zich binnen het 2σ -betrouwbaarheidsinterval hetzelfde veronderstelde event van de minder nauwkeurig gedateerde locatie(s) te bevinden.

Een verdere check was of alle events waarvan dat op basis van drempelwaarden van registratie op meerdere locaties verwacht mocht worden, ook daadwerkelijk op iedere locatie geregistreerd werden. Bijvoorbeeld: de zeldzamere grotere onder de vele events op de relatief proximale locaties Rb en Vv, en hun reproductie als events met vergelijkbare zeldzaamheid en ouderdom op de meer distale locatie SB, waar kleinere events niet individueel registreerden.

Waar dat niet het geval was, is de opeenvolging en het ouderdom-diepte model nogmaals geïnspecteerd op aanwijzingen voor hiaten in registratie en organische (top)intervallen die ongeschikt zijn voor overstromingsregistratie (sites Vv, Mw, Sc, SB); mis-identificatie van grof materiaal van zeer lokale herkomst als overstromingslagen, zoals bij lokale crevassevorming, ijssdam-effecten (site BAR: Toonen *et al.*, 2015; site Mw); afspoeling van nabije terrasrand (site Am¹⁷). Voor de bepaling van de spreiding in ouderdom en overstromingsmagnitude van individuele extreme events is geput uit alle informatie van gelijktijdig registrerende locaties.

¹⁷ Dit is in 2012-2013 onderzocht in een masteronderzoek van studenten Aardwetenschappen aan de VU Amsterdam, onder begeleiding van M.A. Prins en W.H.J. Toonen. De grof-korreligheid van overstromingslaagjes in de kern Am: Amerongen relateert aan korrelgrootteverdelingen van zand uit de bedding van de Holocene Rijn. Ze relateert niet aan lokaal terrasrand-sediment dat verder naar de rand van de overstromingsvlakte wordt aangetroffen (plaatselijk van de Utrechtse Heuvelrug afgespoeld stuwwal- en sandr-materiaal).

3.3 Resultaten

3.3.1 Overstromingschronologie en tabel met grootste overstromingen

Het gecompileerde sedimentaire overstromingsarchief voor de Beneden Rijn (fig. 10) reikt terug tot ruim 8,000 jaar geleden (≈ 6000 v. Chr.). Afhankelijk van de locatie dichtbij of op grotere afstand van toenmalige actieve rivieren, varieert de registratie van individuele overstromingen. Op grotere afstand van de actieve rivier worden alleen de grootste overstromingen gedifferentieerd geregistreerd, op kleinere afstand een veel groter aantal overstromingen. De locaties op grotere afstand ontvingen per overstroming minder sediment en dekken daardoor een langere tijdsperiode (millennia) dan locaties op korte afstand (eeuwen). Iedere locatie, en ieder deelinterval dat er is onderscheiden (§3.2.2), heeft daarmee een eigen drempelwaarde waarboven alle overstromingen registreerden. Voor de periode van 600 na Chr. tot in de 19^e/20^{ste} eeuw, zijn overstromingen met een herhalingsstijd van 10 jaar en groter gedocumenteerd. Voor de periode 6000 v. Chr. tot 600 na Chr., is de drempelwaarde voor registratie een herhalingsstijd van 30 à 50 jaar, en voor de periode 5300 tot 5000 v. Chr. is de reeks incompleet.

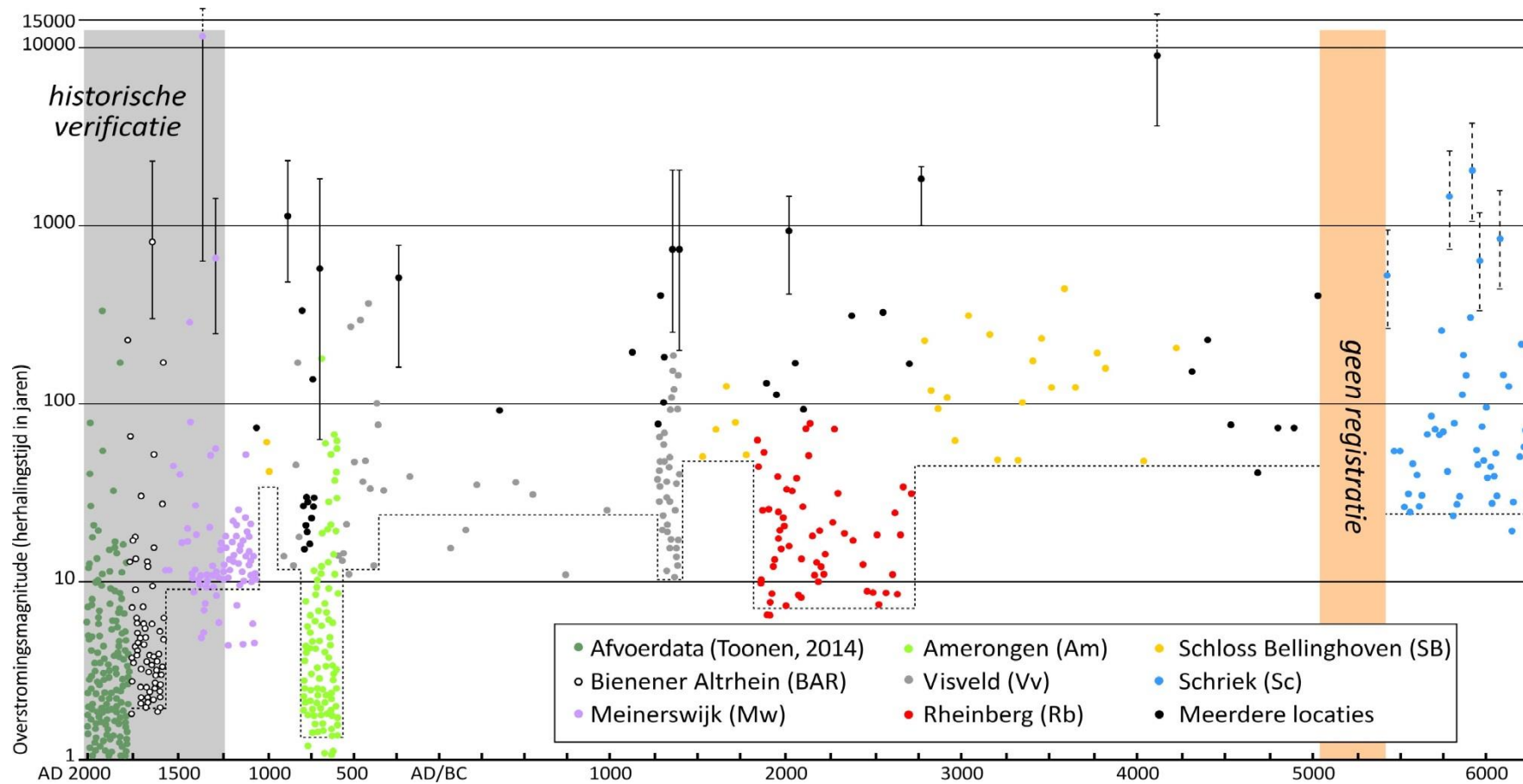
Tabel 1 geeft een overzicht van de grootste overstromingsevents in de Beneden Rijn, volgens de gecompileerde reeks in figuur 10. In de tabel zijn alle events met een herhalingsstijd van meer dan 500 jaar opgenomen: de grootste overstromingen / de hoogste piekafvoeren. De allergrootste events (met een herhalingsstijd groter dan 1000 jaar) zijn in de tabel in **vetgedrukte tekst** aangegeven. In het overzicht zijn de prehistorische events vernoemd naar de onderzoekskern uit de huidige studie (fig. 4, fig. 9, bijlage A), waarin ze als eerste in sedimentaire geregistreerde vorm zijn herkend. Aan jongere grootste eventlaagjes die aan historische gebeurtenissen gecorreleerd zijn, is de naam van die gebeurtenis gekoppeld.

Op basis van het sedimentaire overstromingsarchief, vonden de grootste overstromingen plaats in 1374 en ~ 784 na Chr., en ca. 2680, 4080, 5750, en 5880 v. Chr. De overstroming van 1374 na Chr. en die van 4080 voor Chr. zijn op basis van het sedimentaire archief samen de allergrootste geweest. Historische bronnen (Buisman, 1996) beschrijven de verwoestingen in 1374 uitvoerig. Daarnaast heeft eerder onderzoek uitgewezen dat in 1374 te Keulen afvoeren hebben plaatsgevonden van om en nabij $18.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Herget & Meurs, 2010). Ter vergelijking de grootste afvoer van de laatste eeuw (1926) was slechts $12.600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. De statistische herhalingsstijd zoals die voor de afvoer van 1926 wordt ingeschat is ongeveer 150 (Chbab, 1996; o.b.v. meetreeks sinds 1901) tot ongeveer 350 jaar (Toonen, 2013; o.b.v. meetreeks sinds 1772).

3.3.2 Nauwkeurigheid van de ouderdom-dieptemodellen

De tabel geeft de meest waarschijnlijke ouderdom van de events en de 2σ spreiding daar omheen aan. De ouderdom wordt in kalenderjaren (BP: *Before Present* = 1950 na Chr.) en in jaren voor/na Christus gegeven. Waar deze ouderdom uit beschouwing van nog andere gegevens dan alleen de ^{14}C dateringen (met OxCal 4.2 en de IntCal2013 curve gekalibreerd; Bronk-Ramsey 2009; Reimer *et al.*, 2013) en ouderdom-diepte modellering op onderzoekskern volgt, is in een derde kolom de grootte van de afwijking weergegeven. Waar deze kolom leeg is gebleven, is de ouderdom sec op de geologische gegevens in bijlage A gebaseerd. Waar deze kolom een waarde geeft, is historisch interpreterend (jongste 4 events) of geologisch daterend en correlerend (twee oudere events) een andere ouderdom bepaald.

In Tabel 1 worden twee ouderdommen gerapporteerd. Als eerste wordt de meest waarschijnlijke 'ouderdom' van de overstroming gegeven (in jaren cal BP en in jaren voor/na Christus). Vervolgens wordt het aantal jaren gegeven, dat die ouderdom zou afwijken als sec het jaartal volgens de tijd-diepte modellering op de boorkernen gebruikt zou worden.



Figuur 10: Overstromingschronologie van de Rijn in de laatste ca. 8200 jaar, naar boringlocatie/bronreeks (fig. 4; tabel 1). De stippellijn geeft de drempelwaarde in herhalingstijd/magnitude weer, waarboven iedere optredende overstroming geregistreerd is. De waarde varieert van kern tot kern over de bestreken periode, en ook binnen één en dezelfde kern wanneer de afstand tot de toenmalige actieve rivier tijdens de vorming van het sedimentaire archief veranderde.

Voor de periode sinds 1350 na Chr. geldt dat alle grotere piekafvoeren/overstromingen ook uit schriftelijke bron bekend waren (historische verificatie van de magnitudeschattingen). Voor de periode voor 1350 AD zijn herhalingstijden/magnitudes van overstromingen die op meer dan één boringlocatie sedimentair geregistreerd werden met een aparte signatuur weergegeven ('meerdere locaties'). Van overstromingen met een herhalingstijd >500 jaar die in meerdere boorkernen als relatief grofkorrelig laagje geregistreerd werden, is die afschatting meervoudig uitgevoerd en is de spreiding ervan weergegeven.

Tabel 1: Overzicht van de grootste Holocene piekafvoeren/overstromingen in de Beneden Rijn (Keulen-Lobith-Betuwe; sedimentaire events met herhalingstijden groter dan 500 jaar).

In vet zijn de allergrootste events ('millennium-overstromingen') aangegeven. Zie tekst voor toelichting op de kolommen 'afwijking ouderdom' en 'toegekende herhalingstijd'.

Naam event	Ouderdom (jr)		Afwijking ouderdom (jr)	Archeologische Periode	Toegekende herhalingstijd (bereik afz. schattingen)	Boringlocatie, bronreeks
	cal. BP $\pm 2\sigma$	voor/na Chr. (2σ)	t.o.v. lineair tijd-dieptemodel			
1658 overstroming (regen+sneeuw Kleine IJstijd)	312 \pm 20	1658 na Chr. (1618-1658)	20 jr eerder * (1638 na Chr.)	Nieuwe Tijd	835 (300 – 2750)	BAR, hist.
1374 overstroming (Keulen peilmerken)	597 \pm 31	1374 na Chr. (1322-1384)	21 jr eerder ** (1353 na Chr.)	Late Middeleeuwen	12000 (630 - >15000)	Mw, hist.
1342 overstroming (Magdalenenhochwasser)	668 \pm 26	1342 na Chr. (1256-1308)	60 jr eerder ** (1282 na Chr.)	Late Middeleeuwen	665 (250 – 1650)	Mw, hist.
ca. 784-5 overstroming (Karel de Grote veldtocht)	1085 \pm 127	ca. 784-5 na Chr (738-992)	80 jr later *** (865 na Chr.)	Vroege Middeleeuwen	1150 (500 – 2600)	Vv, SB, (Am), hist.
Amerongen-1.3 event	1264 \pm 69	ca. 686 na Chr. (617-755)		Vroege Middeleeuwen	575 (50 – 2050)	Am, Vv
Visveld-1.7 event	1668 \pm 182	ca. 282 na Chr. (100-464)	45 jr eerder**** (237 na Chr.)	(Laat) Romeinse tijd <i>vermoedelijk eind 3^e eeuw</i>	525 (150 – 800)	Vv, SB
Visveld-3.3a event	3274 \pm 137	ca.1324 v. Chr. (1187-1461)		Bronstijd	750 (250 – 2250)	Vv, SB
Visveld-3.3b event	3306 \pm 139	ca.1356 v. Chr. (1217-1495)		Bronstijd	750 (200 – 2250)	Vv, SB
Rheinberg-3.9 event	3937 \pm 89	ca. 1987 v. Chr. (1898-2076)		Neolithicum-Bronstijd	940 (400 – 1500)	Rb, SB
Vossekuhl-4.7 event	4720 \pm 70 (4625 \pm 161)	ca. 2770 v. Chr. (2514-2836)	95 jr later***** (2675 v. Chr.)	Neolithicum	1875 (1000 – 2500)	Vk+Rb (SB)
Schloss Bellingh.-6.0 event	6029 \pm 223	ca. 4079 v. Chr. (3856-4302)		Neolithicum	9400 (3350 – >15000)	SB, (Vk)
Schriek-7.3 event	7344 \pm 51	ca. 5394 v. Chr. (5343-5445)		Meso-/Neolithicum	530 (500 – 550)	Sc
Schriek-7.7 event	7698 \pm 41	ca. 5748 v. Chr. (5707-5789)		Mesolithicum	1485 (1250 – 1700)	Sc
Schriek-7.8 event	7828 \pm 44	ca. 5878 v. Chr. (5834-5922)		Mesolithicum	2125 (1725 – 2500)	Sc
Schriek-7.9 event	7870 \pm 45	ca. 5920 v. Chr. (5875-5965)		Mesolithicum	645 (600 – 700)	Sc
Schriek-8.0 event	7986 \pm 50	ca. 6036 v. Chr. (5986-6086)		Mesolithicum	870 (800 – 950)	Sc

Voetnoten bij tabel 1, kolom ouderdom afwijkingen t.o.v. lineair ouderdom-diepte model.

- *) Afwijking t.o.v. historische ouderdom, volgens het lineaire ouderdomsmodel voor locatie Mw, in top van geulvulling. Op locatie BAR: <5 jr, op diepte in geulvulling.
- **) Afwijkingen t.o.v. historische ouderdom, volgens het lineaire ouderdomsmodel voor locatie Mw, op diepte in de geulvulling.
- ***) Afwijking t.o.v. historische ouderdom, volgens het lineaire ouderdomsmodel voor locatie Vv, nabij top van geulvulling. Op locatie Am: <30 jr., in top geulvulling.
- ****) Afwijking t.o.v. bayesiaans gecalibreerde ouderdom met Vv-1.7 event *na* 1900 ± 30 ¹⁴C (ontbreken indicaties Vechten (Fectio) locatie; Van den Bos, 2014), volgens ouderdom-dieptemodel voor locatie Vv.
- *****) Afwijking t.o.v. bayesiaans gecalibreerde ouderdom voor locatie Vk+Rb (4720 ± 70 ; Minderhoud *et al.*, 2013/Toonen 2013:H4; Minderhoud *et al.*, 2016), volgens het lineaire ouderdom-diepte model voor locatie SB.

De afwijking is dus het aantal jaren dat die ouderdommen zijn bijgesteld, op grond van correlaties met historische gegevens en ¹⁴C dateringen van andere locaties dan de boorkernen. De grootte van die bijstellingen geven ook enig inzicht in de mate waarin de nu gerapporteerde ouderdommen voor grote overstromingsevents in de toekomst nog zouden kunnen verschuiven. Voor de overstromingen van 1658, 1374 en 1342 geldt dat de in bijlage A geconstrueerde ouderdom-diepte modellen (*stepped-linear*, paragraaf 3.2.2) op de onderzoekskernen BAR (Bienener Altrhein; nabij Rees) en Mw (Meinerswijk; nabij Arnhem) respectievelijk tot op 20, 21 en 60 jaar benaderen.

Van de aan de protohistorische aanwijzingen voor een hoogwater in het jaar 784/5 gecorreleerde event-laagje in de onderzoekskern Vv (Visveld, Nijmegen-Lent), is de afwijking 80 jaar. Dit event is overigens ook in de top van de vulling van onderzoekskern Am (Amerongen) herkend en gedateerd. De afwijking bedraagt daar minder dan 30 jaar. Het toegekende jaartal 784/5 AD volgt uit een doorinterpretatie (zie Buisman, 1996) gebaseerd op een enkele verwijzing in de schaarse historische overleveringen voor deze periode, en is dus onzeker. Voor het Visveld-1.7 event, geldt dat het ouderdom-diepte model op deze diepte in de onderzoekskern een grote spreiding heeft (± 182 jaar bij 2σ).

Uit diverse archeologische, geologische en protohistorische gegevens kan eigenlijk uitgesloten worden dat een zeer grote overstroming in de Vroeg en Midden Romeinse tijd plaatsvond (wel 'normale' hoge piekafvoeren, geen 'super-diluvium'). In de onmiddellijke nabijheid van het castellum Vechten (Fectio), is een geulvulling bekend die doorloopt tot het begin van de derde eeuw (1900 ± 30 ¹⁴C BP; Van den Bos, 2014) en indicatie voor een ingeschakelde echt grote overstroming ontbreekt eveneens in die kern. Het Visveld-1.7 event wordt daarom vermoed van (het begin van) de Laat Romeinse tijd te dateren, en jonger te zijn dan de genoemde top van de geulvulling bij Vechten.

Voor het Vossekuhl-4.7 event gaat eenzelfde argumentatie op. Dit event is oorspronkelijk op basis van een slackwater-afzetting in een hoog deel van de overstromingsvlakte herkend (locatie Vk; Toonen *et al.*, 2013) en vervolgens ook als event-laagje in de onderzoekskern SB (Schloss Bellinghoven). Het ouderdomsmodel van kern SB geeft een datering met een brede spreiding. Een nauwere datering is mogelijk als de datering van locatie Vk en die van de basis van de geulvulling van locatie Rb (Rheinberg) gecombineerd worden (zie ook §4.1.1).

Redenen voor bescheiden verdere bijstelling van de ouderdommen in de toekomst¹⁸ zouden kunnen zijn: (i) methodische verbeteringen op ouderdom-diepte modelleren t.o.v. de huidig gebruikte relaties (Bijlage A), (ii) het verrichten aanvullende dateringsactiviteiten op materiaal uit de kernen, en (iii) het opzetten van complexere geochronologische kruiscorrelaties (event-correlaties in netwerk van sites; gekoppeld kalibreren van dateringen).

¹⁸ Archeologisch gebruik in de zin van de verdere hoofdstukken kan aanleiding geven tot bijstellingen van type (iii).

Als ook sedimentaire informatie uit de boorkernen in het ouderdomsmodel wordt betrokken (organisch stofgehalte en/of korrelgrootte-gegevens), kan het ouderdom-diepte model nog verder geoptimaliseerd worden. Het ouderdom-diepte model verloopt dan non-lineair tussen de aangegeven grenzen, met versnelling van de sedimentatie in de grof-klastische lagen en vertraging in de meest organische intervallen. Dat de sedimentatie non-lineair verlopen moet zijn volgt uit sedimentologische procesbeschouwingen, zoals de start-stop signatuur van riviersedimentatie op deze verticale resolutie. Dat de versnellingen en vertragingen in dit afzettingsmilieu inderdaad aanzienlijk zijn en de variaties sterk aan *relatieve* korrelgrootte en *relatieve* afstand t.o.v. de actieve rivier gecorreleerd, is o.a. in onderzoekskern BAR voor de jongste eeuwen gedemonstreerd (Toonen *et al.*, 2015 – Bijlage C). Voor de onderzoekskern Rb is zo'n non-lineair model beschikbaar en daarmee verschuift de ouderdom in delen van de kern tot maximaal 100 jaar t.o.v. het lineaire model (Minderhoud *et al.*, 2013; 2016 – Bijlage D).

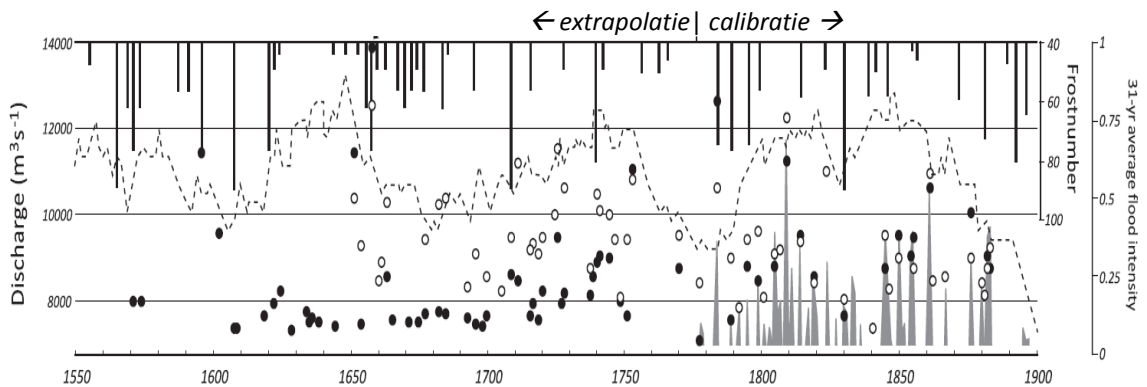
3.3.3 Overstromingsgeschiedenis en archeologische periodisering

Het onderzoek heeft zich vooralsnog (binnen het kader van het promotieonderzoek) beperkt tot het onafhankelijk vaststellen van veranderingen in overstromingsfrequentie in de tijd. Of er ook oorzakelijke verbanden vast te stellen zijn tussen de gelijktijdige archeologische veranderingen (waar de vervolghoofdstukken in dit rapport aanzet toe geven) en klimatologische veranderingen (waarop zich het Rubicon-postdoc onderzoek van WHJ Toonen zich thans richt), zal duidelijk moeten worden uit kritisch gebruik en nieuw gericht onderzoek.

Het oudste deel van de tijdreeks is vooralsnog slechts op één onderzoekslocatie (Sc: Schriek) gebaseerd. Het ontbreken van dubbele registratie beïnvloedt de onzekerheid van zowel de ouderdom als de grootte van de cluster overstromingen van rond 6000 v. Chr. Voor deze overstromingen is er pas één waarneming en het is mogelijk dat ook lokale factoren (zoals de vorming van chute-geulen en –banken en crevasse-waaiers in de nabijheid van de onderzoekslocatie) bij sommige van de overstromingen hebben meegespeeld. Vanaf 5000 v. Chr. is er voor de grootste events steeds registratie op tenminste twee locaties.

Uit de reeks kunnen individuele extremen 'zeldzamer dan 1/500 jaar' specifiek aangehaald en onderzocht worden (fig. 10; tabel 1), en er kan op periodisering van het algemene optreden van overstromingen van meer normale grootte (bijvoorbeeld met een 1/50 jaar terugkeerkans) gefocust worden. Het valt op dat er vooral vroeg in de reeks (6000-5700 v. Chr.; Vroeg-Neolithicum, Vroeg Atlanticum) relatief veel zeer grote overstromingen voorkwamen (vier 1/500 overschrijdingen in ca. 300 jaar). Dit valt samen (al dan niet toevalligerwijs) met de klimatologisch warmste periode uit het Holoceen (McDermott *et al.*, 2001; Davis *et al.*, 2003) en fasen uit de Bandkeramische periode in het Rijndal bovenstrooms van Nederland.

In de 4500 jaar daarna (5700 tot 1300 v. Chr) is als een periode met gemiddeld voorkomen van grote overstromingen te beschouwen. Rond 3300 jaar geleden (medio 1300 v. Chr.) is er een korte periode (een eeuw) met veel relatief zware overstromingen. Daarna, vanaf de Midden-Bronstijd, lijken er tot en met het Romeins Warm Interval (McDermott *et al.*, 2001), 1500 jaar lang amper echt zware overstromingen te zijn geweest. Dit veranderde rond 250 na Chr. Vanaf toen was er een toename in het optreden van grote overstromingen, al dan niet toevalligerwijs samenvallend met de val van het West-Romeinse Rijk, de 'volksverhuizingen', en de Merovingische 'Dark Ages' in de Vroege Middeleeuwen (Büntgen *et al.*, 2011a). In grote lijnen blijft daarna het voorkomen van de allergrootste overstromingen gelijk tot vandaag de dag.



Figuur 11: Afvoerreconstructie voor Lobith (linker as, discharge, m^3/s) op basis van de korrelgrootte-gegevens van onderzoeklocatie Bienener Altrhein (1550-1900) en historische waterstand en ijsgang gegevens. Langs de rechter as is de strengheid van de winters (hangende staafjes; aantal vorstdagen, Frostnumber) en is een index van overstromingsintensiteit (streeplijn; 31-yr average flood intensity) weergegeven. De laatste is een indicatie voor regionaal-klimatologische variaties in het gemiddelde jaarlijkse hoogwater, zonder directe link met de echt extreme hoogwaters. Bron: Toonen et al. (2015 / Bijlage C)

De resolutie van de reeks is in de jongste 1400 jaar het hoogst, en de drempelwaarde voor sedimentaire registratie ligt er steeds op of zelfs beneden de herhalingskans van eens per 10 jaar. Tussen ca. 600 en 850 na Chr. levert dit een hoger aantal overstromingen, dan gemiddeld over de laatste 1400 jaar. Deze periode komt overeen met wat Büntgen *et al.* (2016) recent als de *Late Antique Little Ice Age* betitelen.

Van de 10e tot de 13e eeuw zijn er daarna juist relatief weinig overstromingen. Die laatste periode valt samen met het relatief warme en droge klimaatoptimum van de Middeleeuwen (Büntgen *et al.*, 2011b). In de delta valt de periode samen met het sluiten van de bandijken langs de grote rivieren (Henderikx, 1988; Spek *et al.*, 1996; Van Hall, 1997). De 14e eeuw was een periode met veel overstromingen op de overgang van het Middeleeuwse klimaatoptimum naar de Kleine IJstijd (zie ook §4.2). Tijdens de Kleine IJstijd is het aantal overstromingen vervolgens relatief laag, ondanks het voorkomen van ijsdammen. Sinds de jaren '20 van de 20e eeuw neemt het aantal gemiddeld grote piekafvoeren weer toe (Toonen, 2015).

Voor de jongste 700 jaar (sinds 1350), zijn correlaties tussen historische afvoergegevens en klimatologische schommelingen zoals de Kleine IJstijd eerder ook al wel uitgewerkt (bijv. Glaser & Stangl, 2003). Figuur 11 (Toonen *et al.*, 2015) laat zien dat dergelijke analyses met de sedimentaire archiefopwerking uit dit hoofdstuk kunnen worden uitgebreid, en afvoerschattingen op basis van regressie analyse op korrelgrootte-gegevens kunnen worden gedaan. In fig. 11 is daartoe het tijdvak 1770-1900 (nog niet genormaliseerde rivier) als het calibratie interval gebruikt (staand in grijs, jaarlijks hoogste afvoerpieken; Toonen, 2015), en voor het tijdvak 1550-1770, zijn de afvoerschattingen nieuw resultaat (zwarte bolletjes, af te lezen op de linker as). In de eerste helft van de 17e eeuw neemt de overstromings-frequentie tijdelijk toe, en valt daarna weer terug naar relatief laag (fig. 11; Toonen *et al.*, 2015).

Bij de huidige stand van het onderzoek, kan de volledige reeks (fig. 10) dus geperiodiseerd worden op grond van de frequenties waarmee op relatief grote afstand van de rivier zeldzaam grote overstromingen registreerden (herhalings tijden > 100 à 250 jaar, berekend over millennia) – en kan de historische periode ook op hoog frequentere variaties in de terugkeer van matig-grote overstromingen (herhalings tijden > 25 à 50 jaar, berekend over anderhalf millennium). In dat laatste geval, wordt de klimatologische variabiliteit over kortere perioden (decennia) zichtbaar en is koppeling met regionale klimatologische reconstructies mogelijk (Toonen *et al.*, 2016).



Foto 3. Onderlopende uiterwaard, Januari 2016, normaal hoogwater. Foto: Menno Straatsma, UU.

4 Gebruiksmogelijkheden van de reeks overstromingen in de archeologie

In Hoofdstuk 2 is beschouwd hoe en waarom kennis over de overstromingsgeschiedenis van de Rijn van belang kan zijn voor de archeologie van het riviereengebied in Nederland. In dit hoofdstuk worden gebruiksmogelijkheden concreter uitgewerkt, met de in Hoofdstuk 3 en Bijlage A en B geïntroduceerde tijdreeks van grootste overstromingen in de laatste 8000 jaar als uitgangspunt. De insteek van de verkenning in dit hoofdstuk, is dat de tijdreeks van extreme overstromingen in de archeologische gebruikstoepassingen:

- I. extra dateringscontrole zou moeten kunnen bieden, zowel aan lagen op opgravingslocaties (waaronder de Malta-praktijk) en aan veranderingen in het bewoonde landschap op regionale schaal (overzicht en synthese studies);
- II. een groter oorzakelijk begrip zou moeten kunnen bieden, van ontwikkelingen en overgangen in de bewoningsgeschiedenis van de diverse delen van het riviereengebied (zoals voortkomend uit archeologische en historische onderzoek);
- III. een groter oorzakelijk en dateringsbegrip van landschapsveranderingen biedt, die met de bewoningsgeschiedenis nauw verbonden zijn en doorwerken in het archeologische gebruik.

Paragraaf 4.1 vat samen hoe overstromingen op lokale landschapsveranderingen doorwerken (lokaal is hier: gebieden ter grootte van één meanderbocht of nederzetting), en verkent waar en hoe dit archeologische van belang kan zijn. Paragraaf 4.2 werkt uit hoe de geïdentificeerde extreme overstromingen van belang zijn voor de geschiedenis van rivierverleggingen (landschapsverandering op de schaal van het hele riviereengebied). Beide paragrafen behandelen vooral het dateren en van plaats tot plaats kunnen correleren van extreem-event-geforceerde blijvende veranderingen. Paragraaf 4.3 behandelt de impact van overstromingen op archeologische sites en geeft enkele voorbeelden waar en hoe laaggrenzen in proefsleuven en opgravingen als grote overstromingen zijn herkend. De aandacht ligt hier op de rol van overstromingen in de taphonomie van archeologische sites.

De achtergrondgedachte is dat gebruik van de overstromingsreeks een manier is de kwaliteit er van verder te toetsen, bijvoorbeeld wat betreft de nauwkeurigheid van de datering van de extreme piekafvoeren. Reflectie op kwaliteit en uitwisseling van ouderdomsinformatie tussen het rivieroverstromings- en het rivierbewoningsonderzoek, zouden maken dat met het archeologisch gebruik ook het gebruik in geologische, fysisch-geografische en historisch-geografische kringen weer gediend is. Onderzoekend gebruik in de archeologische praktijk zou in dit hoofdstuk veronderstelde koppelingen in voorkomende gevallen juist ook kunnen ontkrachten (vermoedelijk vooral waar het gaat om de impact van middelgrote events).

Het onderzoekend gebruik kan ook nuttig zijn van het leggen van een cesuur tussen normale en extreme events op basis van grootte van impact op bewoning (i.p.v. op arbitraire herhalingsduur van 1/500 of 1/1250). Dat is wenselijk ter vervolmaking van de compleetheid en nauwkeurigheid van de inzichten zoals die nu bestaan. De gebruikstoepassingen zoals die in paragraaf 4.3 behandeld worden zijn hiervoor van kritisch belang. Pas nadat taphonomisch aannemelijk gemaakt is dat het overstromingslaagje in de opgravings sleuf echt van een extreme overstroming geweest moet zijn (op grond van hoogtepositie, afwijkende verbreiding en lithologie, geassocieerde vondstinhoud, relaties met archeologische sporen), kan verdere ouderdomsinformatie van onderliggende en afdekkende lagen/structuren de datering van de extreme overstroming gaan helpen verbeteren. Het is niet verstandig om koppelingen tussen afvoerreconstructies in figuur 10 en verschijnselen in een archeologische site sec op basis van overeenkomst in datering aan te nemen. Hier wordt in Hoofdstuk 5 verdere aandacht aan besteed.

4.1 Bochtafsnijding en extreme overstromingen

Overstromingen moeten allereerst gezien worden als de aandrijving van de erosie- en sedimentatiemechanismen die aanleiding geven tot bochtafsnijding en rivierverlegging (§2.4-2.6). Met het beschikbaar komen van een langs onafhankelijke weg verkregen inzichten in de timing van de grotere overstromingen, kan nu de timing van het beginnen en uiteindelijke slagen van bochtafsnijdingen en rivierverleggingen in de delta, met die van het optreden van grotere overstromingen vergeleken worden.

Door de twee typen gegevensbronnen te combineren, kunnen er nieuwe afwegingen over de meest waarschijnlijke dateringen van 'beginnen' en 'doorslaggevend slagen' van afsnijdingen en verleggingen gemaakt worden. Potentieel kan dit de dateringonzekerheid die er voor individuele verleggingen bestaat verkleinen.

Als demonstratie-voorbeeld wordt eerst uitgewerkt, hoe voor een specifieke cluster Midden-Holocene meanderbochten tussen Wesel en Rees in Duitsland (fig. 2), de datering van de meanderafsnijdingen met behulp van informatie over de ouderdom en grootte van extreme overstromingen scherper kan worden gemaakt. Vervolgens wordt verkend of dit principe ook voor de afsnijding van jongere meanderbochten, bijvoorbeeld die van middeleeuwse ouderdom in de uiterwaarden wat meer benedenstrooms in het studiegebied, de dateringsscherpte kan verbeteren.

4.1.1 Demonstratie: 4.7-ka meanderafsnijding bij Rheinberg (D)

In het bovenstroomse deel van het studiegebied, is in eerdere karteringen (Schirmer, 1995; Erkens *et al.*, 2011) een cluster van Midden-Holocene meanderafsnijdingen herkend die rond 4700 jaar geleden (ca. 2770 v. Chr.) moet zijn ontstaan. Een van die locaties is de palaeomeander van Rheinberg (Rb), die in dit onderzoek gebruikt is. De datering van die meanderafsnijding uit de basis van geulvulling (Erkens *et al.*, 2011), valt samen met die van een extreme overstroming die als een *slack-water* afzetting op onderzoekslocatie Vk: Vossekuhl is waargenomen (fig. 4; Toonen *et al.*, 2013).

Als het optreden van een zeer grote piekafvoer langs onafhankelijke weg op een locatie in het dal van de Rijn wordt waargenomen (locatie Vk), dan maakt die observatie het waarschijnlijker dat de cluster meanderafsnijdingen uit de zelfde periode, inderdaad met het passeren van deze extreme afvoer samenhangt, en dat betekent dan ook dat de ¹⁴C dateringen van de locaties Vk en Rb gecombineerd gebruikt kunnen worden bij het bepalen van de event-ouderdom.

Twee observaties op een derde onderzoekslocatie SB: Schloss Bellinghoven, versterken die hypothese nog eens verder. De 4.7-ka extreme overstroming is ook in die paleomeander als een zeldzaam grof event-laagje in de geulvulling geregistreerd (tabel 1, fig. 10). In de verticale opeenvolging in die geulvulling is er bovendien een drastische verandering van de achtergrond-sedimentatie, vanaf het optreden van het event (*change point* op 386 cm diepte in de kern, bijlage A). De verklaring voor die verandering in sedimentsamenstelling, is de verlegging van de hoofdgeul naar een positie dichtbij de SB paleomeander. Ook 20 km stroomafwaarts van locatie Rb (= 3 meanderlengtes benedenstrooms) vond ten tijde van het grote event dus een bochtafsnijding plaats.

Tenslotte blijkt uit de korrelgrootte-opwerking van de restgeulvullingen van zowel locatie Rb als SB, dat binnen ca. 150 jaar na de Vossekuhl-4.7 overstroming en de meervoudige meanderverleggingen, er nog een grote overstroming volgde van het kaliber 1/100 à 1/500 herhalingskans (fig. 10, bijlage A). Dat de eerste extreme overstroming anderhalve eeuw later gevolgd werd door een tweede overstroming van behoorlijke grootte, zal op het preservareren van de meanderbocht van Rheinberg ook zijn invloed gehad hebben (Minderhoud *et al.*, 2013/Toonen 2013: H4).

De datering van de basis van de geulinvulling op onderzoekslocatie Rb is dan ook op dat voorkeursscenario gebaseerd (zie onder). De interpretatie is, dat de 4.7-ka overstroming (geholpen door de nabrander ca. 150 jaar later), in ieder geval in het deel van het rivierdal tussen locaties Rb en SB een zodanig grote/radicale verandering van de ligging van meanders heeft veroorzaakt, dat hier uit deze tijdsperiode een bovengemiddeld aantal oude meanderbochten bewaard is gebleven.

Het voorkeursscenario stelt dat de ¹⁴C-datering van de afsnijding van de Rb meander (Bijlage D) en die van de *slackwater* afzetting bij Vk op hetzelfde extreme overstromingsevent betrekking hebben en dat hun gezamenlijke kalibratie (Minderhoud *et al.*, 2013/Toonen 2013: H4) daar de beste datering voor geeft (2770 ± 70 BC). Het ouderdom-diepte model dat voor de geulvulling op locatie SB verkegen is (berekend tussen dateringen wat dieper en wat hoger dan het '4.7-ka' overstrominglaagje met de uiterst grove staart in de korrelgrootte verdeling) biedt verder vergelijkingsmogelijkheid (zie §3.3.2).

Het ouderdomsmodel voor SB zou in detail verder fijn te regelen te zijn, door aan het betreffende overstromingslaagje de ¹⁴C ouderdommen van sites Vk en Rb toe te kennen, als extra informatie in de *stepped-linear* calibraties met behulp van OxCal (bijlage A) en/of zoals eerder genoemd in een niet-lineaire sedimentologisch meer verantwoorde ouderdom-diepte modellerende variant (Minderhoud *et al.*, 2016 / Bijlage D).

Wordt de dateringsinformatie van locatie Vk+Rb (twee dateringen) onafhankelijk van die op site SB (twee dateringen) gehouden, dan wijkt de wederzijds verkregen dateringen c. 95 jaar af (tabel 1). Binnen de analytische onzekerheid van de ¹⁴C laboratorium metingen komen de gecalibreerde dateringen overeen. De onzekerheidsmarge op de op locatie Vk+Rb betrokken datering is kleiner dan die van de op locatie SB betrokken datering.

4.1.2 Potentiële toepassing: Middeleeuwse meanderafsnijdingen

Als de passage van grote overstromingen bepalend (doorslaggevend, H2) is voor het verplaatsen, afsnijden en doen preservareren van meanders, dan zou het ook voor jongere bochten mogelijk moeten zijn afsnijdingsmomenten te correleren aan het optreden van (clusters) grote overstromingen. Omdat uit jongere tijden een vooralsnog completere set van afgesneden bochten bestaat dan uit oudere tijden, zouden zulke op correlatie gebaseerde ouderdomsinschattingen directer toetsbaar en controleerbaar moeten zijn dan het hierboven uitgewerkte Midden Holocene voorbeeld.

Vooraf voor het begrip van de ontwikkeling van de rivierbochten in de Late Middeleeuwen (in de uiterwaarden tussen de toen net aangelegde bandijken) lijken er goede kansen, omdat de resolutie van de overstromingsgeschiedenis voor die periode het hoogst is (§3.3.1; fig. 10). Immers, enerzijds liggen er langs alle riviertakken aanzienlijke oppervlakken Romeins en Middeleeuws-verlaten meanderbochten (Cohen *et al.*, 2014a), en anderzijds is er juist voor die periode veel detail en controle op de tijdreeks (§3.3).



Figuur 12. Kaart Tiel en omgeving [ca. 1559-1575. Jakob van Deventer]. De uiterwaard bij Wamel tegenover Tiel toont in donkergroen twee geulvormige laagtes – die eerder in de Middeleeuwen als watervoerende geulen beschouwd kunnen worden. Het noordwaarts opschuiven van de Waal bocht tot onder de (teruggelegde) dijk bij Tiel zou tijdens de 14e eeuwse hoogwaters (1342, 1374) kunnen zijn begonnen. Bron: Gelders Archief 0963 Collectie Plattegronden PL41.

In geomorfologische interpretatie van historische uiterwaardlandschappen (bijvoorbeeld fig. 12), kunnen de grootste overstromingen worden opgevoerd als de momenten dat er sterke buitenbochterosie en binnenbochtuitbouw optrad, en als het omslagpunt in het optreden van natuurlijke doorsnijdingen. Wanneer dat laatste gebeurde fossiliseerde de oude bocht, en werd bijvoorbeeld stadswaard. Dit zijn dan eerste inschattingen en interpretaties ('nulhypotheses'), die met het verzamelen van daadwerkelijke dateringen getoetst moeten worden. De nieuwe inzichten in de overstromingsgeschiedenis kunnen zowel bij het maken van de eerste inschatting, als bij het verwerken van toetsende dateringen gebruikt worden.

Een systematische vergelijking van de inventaris en ouderdommen van oudere rivierbochten die in de uiterwaarden van Waal, Nederrijn en IJssel en de Niederrhein (Bovenrijn) in het Duits-Nederlandse grensgebied, met het optreden extreme hoogwaters volgens de overstromingsgeschiedenis is in principe goed mogelijk. De mogelijkheid fasen van verhoogde erosie aan de jaren met de grote overstromingen toe te schrijven is door historici vaak ook al wel onderkend, het idee dat juist het afgesneden raken en conserveren van een bocht aan een event te koppelen zou zijn, is wat minder vaak onderkend.

De archeologische reden voor systematische vergelijking van overstromings- en rivierbocht-ouderdommen, is dat inzicht in de timing van het verplaatsen en drastisch veranderen van de toestand in de rivier bijdraagt aan het begrip waarom sommige nederzittingslocaties langduriger bewoond bleven (bijvoorbeeld continuïteit van bewoning in de directe nabijheid

van Romeinse castella¹⁹ in de eerste helft van de vroege middeleeuwen). Het kan ook duidelijk maken vanaf wanneer nieuwe locaties langs de veranderde rivier blijkbaar gunstiger vestigingslocaties werden.

Met een systematische daterende aanpak, moet het in ieder geval mogelijk zijn de potentiële bepalende invloed van de overstromingen van 1342 en 1374 na Chr. (tabel 1) op gepreserveerde meandermorfologie te onderzoeken (fig. 12). Voor veel steden langs de Gelderse IJssel wordt op grond van historische bronnen en archeologische indicaties voor erosie van vroegmiddeleeuwse (Zutphen, Deventer) en vol-middeleeuwse stadsdelen (Zutphen, Deventer, Doesburg, Arnhem) verondersteld dat de IJsselmeanders zich in de 14^e eeuw dynamisch verplaatsten.

4.2 Avulsies en overstromingen 500 BC – 900 AD

4.2.1 Avulsiefasering en timing grootste overstromingen

Naast vele lokale bochtafsnijdingen langs alle riviertakken, hebben zich in de loop van het Holoceen ook een flink aantal totale rivierverleggingen voorgedaan (avulsies, Stouthamer, 2001). Dat waren landschapsveranderingen op regionale schaal waarbij nieuwe takken ontstonden. In Hoofdstuk 2 stelde al dat dateringsinformatie over rivierverleggingen en extreme overstromingen gekoppeld kan worden, en dat aan de overstromingen dan initiërende en doorslaggevende rollen in het beginnen en slagen van de verlegging kunnen worden toegekend (§2.3 en §2.4).

Die koppeling is hier nader uitgewerkt door de traditionele dateringsinzichten in de serie rivierverleggingen van het 'Utrechtse' stroomstelsel (Kromme Rijn, Oude Rijn) naar het 'Krimpense' stroomstelsel (Linge en Waal, Lek en Hollandse IJssel²⁰) in tabel te zetten, en te vergelijken met de dateringen van de grootste overstromingen in dezelfde periode (500 BC tot 1000 AD: Late IJzertijd, Romeinse tijd, Vroege Middeleeuwen).

Tabel 2 geeft een overzicht van dateringen van 'begin van sedimentatie' en de datering van de 'bloiefase' van de nieuwe takken. Ook de getroffen afvoer-verliezende takken zijn genoemd. De fasering van het verlaten raken van deze takken is verder niet uitgewerkt²¹. Tabel 2 geeft verder aan welke grootste overstroming(en) als doorslaggevend voor het ontstaan van de nieuwe tak beschouwd moeten worden, en welke verdere zeer grote overstromingen tijdens de bloiefase zijn opgetreden.

¹⁹ Hier is de vermoedde serie castella van het aan de Nederrijn verbonden segment van de Limes bedoeld: tussen Bijland/Lobith, via Meinerswijk (het enige exact gelokaliseerde castellum langs dit segment), richting Kesteren, Rijswijk en Maurik (tegen over Wijk bij Duurstede). Dit deel van de rivier heeft relatief veel middeleeuwse meanderactiviteit gekend. Wat dat betreft staat dit segment van de Limes in scherp taphonomisch contrast met bovenstroomse delen (Xanten-Kleef-Nijmegen) en benedenstroomse delen langs Kromme Rijn en Oude Rijn (Vechten-Utrecht-Woerden-Alphen-Leiden).

²⁰ Berendsen & Stouthamer (2001) rekenen ook de Nederrijn en Gelderse IJssel tot het Krimpense stelsel. Cohen et al., (2012) rekenen die takken in het oostelijke riviereengebied tot een eigen 'Liemers' stelsel.

²¹ Het promotieonderzoek van Marieke van Dinter (Universiteit Utrecht, Gemeente Utrecht e.a.) bevat een uitwerking van de verlatingsgeschiedenis van het Kromme Rijn–Oude Rijn systeem over de periode 500 BC–1000 AD, zoals veroorzaakt door de opeenvolgende avulsies in tabel 2. Naar verwachting verschijnt het artikel/hoofdstuk in 2016. Het is gelijktijdig met dit rapport, in wederzijdse uitwisseling en onderlinge afstemming geschreven.

Tabel 2: Datering rivierverleggingen en grote overstromingen tussen 500 BC en 1000 AD

Nieuwe Tak	Verlozende Tak	TPQ Begindatering Nieuwe Tak 1 ^e mogelijkheid	¶	TPQ Begindatering Nieuwe Tak 2 ^e mogelijkheid	¶
Nederrijn Lobith–Arnhem– Wageningen	Reorganisatie van takken in Overbetuwe (Baal-Ressen)	c. 500 v. Chr. c. 2500 ¹⁴ C BP	1	20 ± 60 v. Chr. 2000 ± 65 ¹⁴ C BP	2
Waal-Bruchem Tiel–Rossum–Gorkum- Almkerk-omgeving R'dam	Nederrijn en stroomafwaartse takken	c. 500 v. Chr. 2560 ± 40 ¹⁴ C BP 2340 ± 30 ¹⁴ C BP	1	c. 200 v. Chr. 2110 ± 35 ¹⁴ C BP 2195 ± 35 ¹⁴ C BP	2
Lek-Hollandse IJssel WbD.–Vianen–Montfoort ?Rotterdam en/of ?Woerden	“Utrechtse Rijn” (Kromme Rijn, Oude Rijn, Utr. Vecht)	293 ± 62 v. Chr. 2220 ± 35 ¹⁴ C BP	1	96 ± 75 v. Chr. 2070 ± 60 ¹⁴ C BP	2
Linge stroomafwaarts van Tiel	Nederrijn en stroomafwaartse takken	229 ± 103 v. Chr. 2160 ± 60 ¹⁴ C BP	1	18 ± 46 v. Chr. 2010 ± 40 ¹⁴ C BP	1
Hollandse IJssel stroomafwaarts v. Montfoort	Reorganisatie van takken in ZW-Utrecht	96 ± 75 v. Chr. 2070 ± 60 ¹⁴ C BP	2	217 ± 73 na Chr. 1805 ± 50 ¹⁴ C BP	1
Lek stroomafwaarts van Vianen	“Utrechtse Rijn”			44 ± 30 na Chr. 1950 ± 30 ¹⁴ C BP	1
Waal stroomafwaarts van Rossum	Nederrijn en stroomafwaartse takken	219 ± 58 na Chr. 1795 ± 30 ¹⁴ C BP	1	465 ± 56 na Chr. 1600 ± 50 ¹⁴ C BP	1
Gelderse IJssel Arnhem–Zutphen–Zuiderzee	Nederrijn en stroomafwaartse takken	314 ± 48 na Chr. 1720 ± 25 ¹⁴ C BP	1	481 ± 44 na Chr. 1575 ± 35 ¹⁴ C BP	2

Bronnen (¶ kolommen) **1**: Berendsen & Stouthamer, 2001; **2**: Cohen *et al.*, 2012 (basisbestand Paleogeografie RM-delta) en detailbeschouwingen per riviertak: **Lek, Hollandse IJssel**: Berendsen (1982), Guiran (1997); **Linge, Waal, Bruchem; Alm**: Törnqvist (1993), Weerts & Berendsen (1995), Vos (2015: 264-293 Vergulde Hand West); **Nederrijn, Gelderse IJssel**: Teunissen (1990); Makaske *et al.* (2008), Cohen *et al.* (2009; 2012)

De begin- en bloiefasedateringen van de beddinggordels, volgen uit de traditionele manier van ¹⁴C-dateren van rivieractiviteit (§2.4.1). Organisch materiaal (veen, kleiig veen, humeuze klei) van lagen direct onder de oudste kleilagen van de nieuwe takken is daarbij ter datering geselecteerd en de lab-uitslag wordt dan als Terminus Post Quem (TPQ, ‘tijdslijm vanaf waarna’) voor het beginnen opgevoerd (Berendsen, 1982; Berendsen & Stouthamer, 2001).

Series van zulke dateringen²², deels verzameld onder de flankerende oeverwallen op kortere afstand van de riviergeul – maar deels ook onder komklei op wat grotere afstand van de tak – geven inzicht in het gefaseerde verloop van de rivierverlegging. TPQ dateringen op kortere afstand benaderen dan het beginmoment van de nieuwe tak (initiatie), en TPQ dateringen die iets jonger uitvallen en op wat grotere afstand van de rivier zijn verzameld het moment waarop de rivier verder was uitgegroeid (maturiteit, bloei). In beide gevallen geldt dat de eigenlijke te dateren gebeurtenis net iets ná het TPQ tijdstip moet vallen.

²² “Type 1” dateringen cf. Berendsen 1982; Berendsen & Stouthamer, 2001.

(vervolg tabel 2)

Doorslaggevende overstroming(en)		BloEIFase	¶	Grootste overstromingen	
Nieuwe Tak	(jaarlijkse herhalingskans)	Nieuwe Tak		tijdens bloEIFase	(jaarlijkse herhalingskans)
260 ± 100 v. Chr.	(c. 1/100)	na 314 ± 48 na Chr. 1720 ± 25 ¹⁴ C BP	2	282 ± 182 na Chr. 682 ± 70 na Chr. 784/5 na Chr.	(< 1/500) (<1/500) (<1/1000)
		<i>stroomafwaarts Rossum</i> na 500 v. Chr. tot 219 ± 58 na Chr	1	260 ± 100 v. Chr.	(c. 1/100)
260 ± 100 v. Chr.	(c. 1/100)			282 ± 182 na Chr.	(< 1/500)
260 ± 100 v. Chr.	(c. 1/100)			282 ± 182 na Chr.	(< 1/500)
282 ± 182 na Chr.	(< 1/500)	voor 800 na Chr	1	682 ± 70 na Chr. 784/5 na Chr.	(<1/500) (<1/1000)
282 ± 182 na Chr.	(< 1/500)	rond 700 na Chr.	1	682 ± 70 na Chr. 784/5 na Chr.	(<1/500) (<1/1000)
282 ± 182 na Chr.	(< 1/500)	vanaf 450 na Chr.	1	682 ± 70 na Chr. 784/5 na Chr.	(<1/500) (<1/1000)
682 ± 70 na Chr.	(<1/500)	rond 950 na Chr. <i>na</i> 735 ± 62 na Chr. TPQ 1295 ± 35 ¹⁴ C BP	2	784/5 na Chr. 1342 na Chr. 1374 na Chr.	(<1/1000) (<1/500) (<1/1000)

Alle hier genoemde ¹⁴C-dateringen zijn van relatief organische lagen direct onder siltig-kleiiger afzettingen, wijzend op toegenomen overstromingssedimentatie.

Alle ouderdommen en herhalingskansen voor grote overstromingen zijn die volgens tabel 1 en fig. 10. De notatie (< 1/500) betekent daarbij dat de 'jaarlijkse terugkeer overschrijdingskans kleiner is dan 1/500', oftewel 'het event is er een zeldzamer dan 1/500' en 'de statistische herhalingsstijd van dit event is als langer dan 500 jaar in te schatten'.

De dateringen van de grootste overstromingen, volgen uit de ouderdom-diepte modellering van boorkernen (H3, bijlage A) en zijn specifiek voor het optreden van event (fig. 13). Ze zijn dus niet voor een moment 'net daar voor' of 'net daar na' zoals de TPQ avulsie ouderdommen. Bij het vergelijken en combineren van dateringen van beide typen zoals in tabel 2, moet met dat verschil in betekenis van het dateringsresultaat rekening gehouden worden.

Als de in deze tabel veronderstelde relaties tussen enerzijds het overstromingsarchief (ingeschakelde event-laagjes in restgeulvullingen) en anderzijds de TPQ dateringen van de verleggingsfasering (klei-op-veen overgangen) voor waar aangenomen worden, dan kan de kalibratie van ouderdommen van de overstromingen nog verbeterd worden. Dit is zeker niet de enige manier waarop de datering van rivieroverstromingen en –verleggingen wederzijds kunnen worden verbeterd (zie ook §5.2), maar om twee redenen van fysisch-geografische aard wel een belangrijke. De eerste reden is dat het een mechanistische koppeling van twee delen van het geologisch archief betreft, die 'op de hele delta' doorwerkt (super-regionaal). De tweede reden is dat er netwerkrelaties bestaan tussen de avulsies die uiterst bovenstrooms (Lobith, Arnhem) en op diverse afstanden meer benedenstrooms (Tiel, Wijk bij Duurstede, Utrecht, Vianen) plaatsvonden.

4.2.2 500 BC – 200 AD: meer sediment, meer avulsie

In het laatste millennium voor Chr. zijn er weinig 'zeer grote' overstromingen (de tijdreeks kent dan geen overstromingen met herhalingskansen die 1/500 overstijgen; tabel 1). Zowel het Lek-Hollandse IJssel²³ deel van het rivierennetwerk benedenstrooms van Wijk bij Duurstede als het Linge-Waal²⁴ deel benedenstrooms van Tiel, waren in de IJzertijd reeds als kleinere crevasse- en riviervertakkingen actief. In feite ontstonden de latere grotere riviertakken Hollandse IJssel, Lek, Linge en Waal uit deze stelsels van kleinere takken en volgden ze op. Het ontstaan van de Linge en de Waal-Bruchemse stroomgordel in deze periode leidde tot waterverlies van de Nederrijn bij het toenmalige splitsingspunt in de omgeving van Nijmegen.

Gecombineerd met het ontstaan van de Hollandse IJssel leidde dit al voor de Romeinse tijd tot enig waterverlies voor de "Utrechtse Rijn". Vanaf ca. 500 v. Chr. nam sedimentatie langs de voorloper takken geleidelijk toe (Erkens 2009), waarmee siltig-kleilig overstromingssediment zich over organisch komafzettingen uitbreidde. De dateringen van begin van sedimentatie van de takken Lek, Hollandse IJssel, Linge en Waal (tabel 2), komen van locaties waar een dergelijke toename van sedimentatie op architecturele gronden kon worden vastgesteld (fig. 13, linker paneel).

De grootste overstroming uit de periode 500 v. Chr. tot ca. 100 na Chr. moet rond 260 ± 100 voor Chr. geplaatst worden en daar is, over de volledige tijdreeks beschouwd, een zeldzaamheid van 1/100 jaar aan toegekend (fig. 10). De cluster begindateringen rond 2200 ¹⁴C BP van de Linge en proto-Waal (Bruchemse stroomgordel) en de Lek-Hollandse IJssel (Ravenswaaij stroomgordel) is mogelijk aan deze overstroming te relateren.

Rond 2050 ¹⁴C BP is er een tweede cluster begindateringen voor dezelfde takken. Bij kalibratie levert dit TPQ dateringen van 260 ± 50 respectievelijk 50 ± 60 v. Chr. op, voor de faseringen van de verleggingen. Merk op dat de bloeifase van Lek-Hollandse IJssel en Linge en Waal eeuwen later dan deze begindateringen wordt geplaatst (tabel 2 en bronnen daarin), en dat dat ook voor het verlaten raken van de Utrechtse takken geldt (fig. 14).

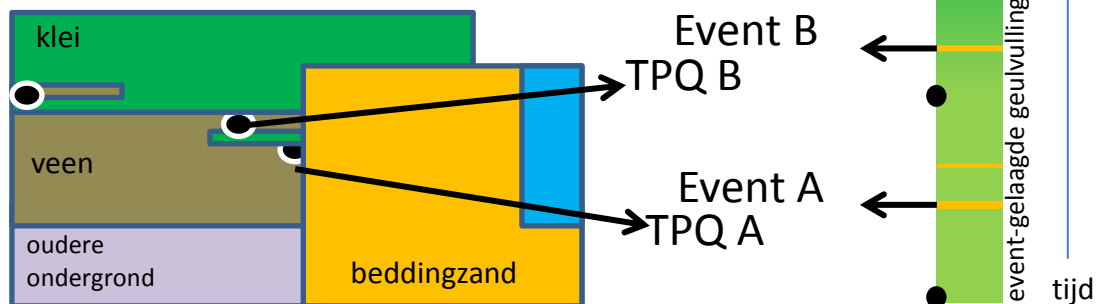
Het toenemen van sedimentatie is indicatief voor een geleidelijke toename van de sedimentlast in reactie op algemene ontbossing in het achterland (Erkens, 2009; Hoffmann *et al.*, 2007; 2009). De toegenomen hoeveelheid aangevoerd fijn sediment (klei en silt) biedt een verklaring voor het ontstaan van de Hollandse IJssel, Lek, Linge en Waal. Dit is het deel van de sedimentlast waarmee door de rivieren cohesieve oevers opgebouwd worden, en met de vergrote aanvoer is de natuurlijke capaciteit voor het afsluiten van verlaten lopen en vastleggen van actieve geulen vergroot. Dit werkt door op de dimensies van crevasse-systemen (hogere oevers = diepere crevasse-geulen; meer sediment is groter crevasse-splay complex) en daarmee mogelijk ook op de slaagkansen van avulsies (voortbouwend op mechanismen besproken in Stouthamer, 2001).

²³ Bedoeld en gedateerd is hier een voorloper crevasse-complex in het bovenstroomse deel van Hollandse IJssel- Lek (Ravenswaaij systeem; Berendsen & Stouthamer, 2001; Stouthamer, 2001). Pas in de Romeinse tijd / Vroege Middeleeuwen worden dit grotere rivieren (blauwe pijlen in figuur 14).

²⁴ Bedoeld en gedateerd is ook hier een zeer groot crevasse-complex in het oosten van de Tielerwaard, tussen de huidige Linge en Waal. De Linge zelf bestond al in de Late IJzertijd als een wat grotere tak. Het tracé van de Waal stroomafwaarts van Tiel werd pas vanaf de Laat Romeinse tijd een grotere tak (fig. 14), door een gebied waar eerder vele kleinere sterk vertakte voorloper geulen lagen (Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen *et al.*, 2012).

Begindatering onder oever

● ¹⁴C monsterlocatie

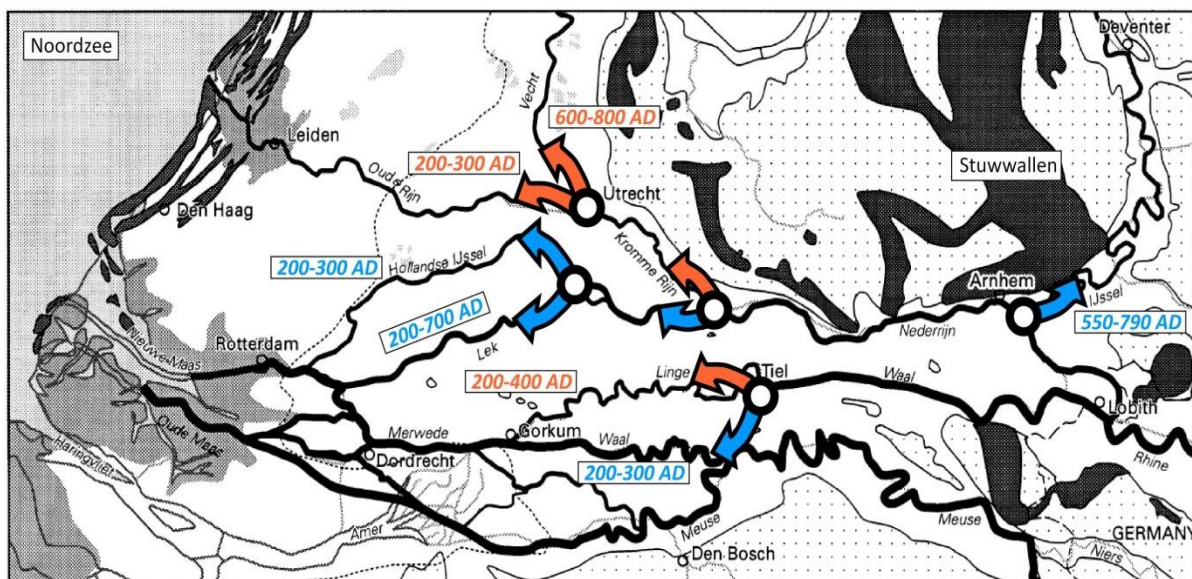


Figuur 13: Gekoppeld gebruik van dateringsmethoden voor begin en bloeifase van riviertakken (links) en optreden van grote overstromingen (rechts). Er worden Terminus Post Quem dateringen met Event-dateringen verknoot. De extreme overstroming wordt daarbij gezien als doorslaggevend moment in de omslag van veen naar klei- sedimentatie op enige afstand van rivier en haar beddinglichaam.

Anders dan de avulsiegeschiedenis en ontwikkeling van de sedimentlast, toont de overstromingsgeschiedenis in de aanloop naar de Romeinse tijd geen opvallende extremen, in tegenstelling tot in de Laat Romeinse tijd en de Vroege Middeleeuwen (§4.2.3). De aanloop naar de Romeinse tijd was dus een periode met relatief weinig echt grote overstromingen, maar desondanks wel een groot aantal avulsies. In deze periode kan de geleidelijk toegenomen sedimentlast daarmee als de belangrijkste verklarende factor voor de netwerkveranderingen naar voren worden geschoven (fig. 15).

Die sedimentlasttoename is vastgesteld op grond van de extensievere sedimentatie van komklei (over een toenemend areaal) en grotere dikte en breedte van oeverwallen en crevasse-complexen vanaf deze periode (Gouw & Erkens, 2007; Erkens, 2009; Pierik et al., in prep.). Ze wordt ook onderschreven door een toename van de hoeveelheid silt in de komen oeverwalafzettingen van de delta (Erkens, 2009; Erkens et al., in prep.). Het laatste is ook in detailbeschouwingen van korrelgrootte karakteristieken in de restgeulvullingen waarneembaar (bijlage A: verschuivingen in relatief aandeel van fijne End Members tussen oudere en jongere vullingen, onafhankelijk van verschillen in proximateit).

In de periode 500 tot 900 na Chr. worden de riviertakken zelf groter (getuige breedtes van de zandlichamen en meanderlengtes; Weerts & Berendsen, 1995; Berendsen & Stouthamer, 2001). In het verleden is op grond van die waarneming wel geopperd, dat het afvoerregiem van de rivier zou zijn toegenomen (ibid.). Het huidige inzicht is echter dat deze morfologische verandering erop wijst dat de toegenomen sedimentlast en oeveropbouw ook op de dimensies van de hoofdgeul doorgewerkt heeft (Kleinhans *et al.*, 2013; Stouthamer *et al.*, 2015). Die kreeg met de opgehoogde oevers een groter bergingsvermogen (= grotere *bankfull*-discharge = grotere meanderlengte). Er hoeft geen sterke verandering in het afvoerregiem van water te worden opgevoerd, om het vergroten van de rivieren te verklaren.



Figuur 14 Netwerkveranderingen in de Rijn-Maas delta door grotere rivierverleggingen in het 1^e millennium na Chr. (naar, Berendsen & Stouthamer, 2000; 2001; Cohen e.a. 2012). Blauwe pijlen geven voor jonge Rijntakken het ontstaan en het sterk toenemen van de afvoer aan. Rode pijlen geven voor oudere Rijntakken sterk verlies aan afvoer en uiteindelijk verlaten raken aan.

Noch de geomorfologische inzichten uit de delta, noch die in de overstromingsgeschiedenis dragen redenen in zich een toename van de Rijnafvoer in de periode 500 BC – 200 AD te moeten veronderstellen. De rivieren en overstromingsvlakten van de Rijn-Maas delta lijken gaande de IJzertijd steeds vatbaarder te zijn geworden voor het beginnen van rivierverleggingen, als gevolg van de toegenomen sedimentaanvoer en daarmee efficiëntere oeveropbouw.

4.2.3 200 AD – 450 AD: meer overstroming, nieuwe takken

In het eerste millennium na Chr. zijn er relatief veel 'zeer grote' overstromingen (de tijdreeks kent dan drie overstromingen die 1/500 overstijgen; tabel 1). Deze gebeurtenissen moeten invloed gehad hebben op het slagen van de Lek en Waal als avulsies en het uitgroeien van deze rivieren tot de grootste takken (fig. 14). Vanaf de Laat Romeinse tijd is er daarmee ook een sterkere koppeling tussen 'zeer grote overstromingen' en 'verleggingen' te veronderstellen dan in de IJzertijd en vroegere Romeinse tijd ervoor. De eerste 1/500-overstijgende overstroming moet in de Laat Romeinse tijd geplaatst worden (282 ± 182 na Chr.). Overigens nam ook de sedimentlast van de rivier in deze periode verder toe (Erkens, 2009). De grotere overstromingen en de blijvend hoge sedimentlast verklaren dus samen de vatbaarheid van de delta voor verleggingen in het eerste millennium AD.

Uit historische bronnen over de Beneden Rijn en de Rijndelta uit die tijd (provincie Neder-Germanië, *Germania Inferior*) is niet één specifieke zeer grote overstroming bekend. Het geschiedkundig overzicht van Ammianus Marcellinus dat de 4^e eeuw goed dekt, bijvoorbeeld, maakt geen melding en de bronnen over de 1^e eeuw vermelden wel overstromingen (o.a. 70 n. Chr. in de nadagen van de Bataafse opstand) maar geen uitzonderlijk grote. Er zijn echter ook perioden binnen de Romeinse tijd waarvan slechts indirecte bronnen zijn overgeleverd en steeds was de provincie een randgebied voor de geschiedschrijvers van het Romeinse Rijk. De bronnen geven geen positief bewijs of aanwijzing, maar door het fragmentarische karakter ervan sluiten ze een zeldzaam grote overstroming in de Romeinse tijd evenmin uit.

De '<1/500'-overstroming uit de Romeinse tijd (Visveld-1.7 event; tabel 1) is vooralsnog niet nauwkeurig te dateren met alleen de ouderdom-dieptemodellen van de boorkernen van het overstromingsonderzoek (Hoofdstuk 3, bijlage A). Om de onzekerheid van de datering 282 ± 182 na Chr. (100-464 AD) voor deze specifieke grote overstroming op geologische wijze terug te brengen, zou in het apex-gebied van de delta van extra locatie een geulvulling uit deze periode moeten worden gekernd en de korrelgrootte- en ouderdomsgegevens worden opgewerkt.

In afwachting van uitvoering van zulk onderzoek is de alternatieve aanpak, om reeds beschikbare geo-archeologische en protohistorische informatie voor de periode nader te onderzoeken op daarin mogelijk aanwezige aanwijzingen voor grotere overstromingen. Een overstroming van deze grootte zou Romeinse steden en forten die op lage terrassen langs de Beneden Rijn gevestigd waren omspoeld en overspoeld moeten hebben (bijvoorbeeld Xanten: Colonia Ulpia Traiana of C.U.T., in 276 na Chr. verlaten; en Tricensimae, van 308 tot ca. 400 na Chr. als mini-stad binnen de oude bewoond). De vondstlagen van Midden Romeinse, Laat Romeinse en Vroeg Middeleeuwse bewoningsfasen (als de laatsten al aanwezig zijn) zijn dicht langs de rivier vaak gescheiden door aanzienlijke klei-sedimentatie. Dit geldt ook voor lage delen van Laat Romeins en Vroeg Middeleeuws Keulen. In een gunstig geval zouden overstromingslagen met Romeinse munten gedateerd kunnen worden (verbetering type iii cf. §3.3.2; voetnoot 16) – of bij beschouwing van gearchiveerde opgravingsgegevens al blijken te zijn. De afdekkende stratigrafie van zulke Laat Romeinse sites bevat mogelijk specifieke overstromingsgelaagdheid die aan events uit de middeleeuwen gecorreleerd kan worden (zie ook §4.3.1).

Bij de huidige stand van gegevens, is de Visveld-1.7 overstroming ofwel tussen 276 en 310 na Chr. (toen Romeins gezag langs de Limes niet of nauwelijks gehandhaafd werd), ofwel tussen 390 en 450 na Chr. te plaatsen. Met een detailbeschouwing van in archeologisch kader verzamelde opgravingsgegevens zou dit nader onderzocht en bevestigd of ontkracht kunnen worden. Mogelijk bieden ook Laat Romeinse historische bronnen en archeologie uit het Moezel-gebied (Trier) hier aanknopingspunten. Bij herkennen van deze specifieke overstroming op een relatief hoog gelegen archeologische locatie (zoals Xanten), zouden zelfs paleohydrologische berekening van de afvoer mogelijk kunnen worden, volgens de vergelijkbare methode als in Toonen *et al.*, 2013 voor de 4.7-ka overstroming.

Ook het verschoven militaire belang van de noordelijke Limes langs de Rijn (tot aan 276) naar de zuidelijke "Limes" langs de route Boulogne-sur-Mer – Cambrai – Tongeren - Keulen (in de 4^e eeuw; Brulet 1990; Brulet *et al.*, 1995; Bazelmans *et al.*, 2004), kan mede op aanmerkelijke veranderingen van het riviernetwerk in de tussenliggende periode wijzen. Dit is in het verleden daarom als aanwijzing voor het ontstaan/vergroten van de Waal beschouwd (Bogaers, 1971). De op 282 ± 182 na Chr. gestelde '<1/500'-overstroming uit de onderzoekskern Visveld (Vv) biedt een nieuw aanknopingspunt voor dat idee, maar er moet gewaarschuwd worden dat voor dat event ook een datering in het begin van de 5^e eeuw niet volledig kan worden uitgesloten.

4.2.4 450 AD – 900 AD: grotere overstromingen, doorzetten verleggingen

In de afloop van de Romeinse tijd volgen op het hierboven besproken '<1/500'-event aan het begin van de Merovingische periode drie overstromingen zeldzamer dan 1/200, die relatief kort na elkaar plaatsvonden (fig. 10). Deze serie van vier overstromingen overlapt met het bereik aan begindateringen voor Lek, Hollandse IJssel, en Waal (1950 tot 1600 ¹⁴C BP, tabel 2), met de bloeifase van de Nederrijn nabij Arnhem en in de tweede helft van de periode met het ontstaan en uitgroeien van de Gelderse IJssel als nieuwe tak.

Ook de loop van de Nederrijn tussen Rhenen en Amerongen lijkt zich in deze periode nog fors te hebben gereorganiseerd. Het afgesneden en opgevuld raken van de onderzoekslocatie Am: Amerongen (H3; bijlage A) is hiermee in verband te brengen. De vermoedde ligging van de limes door dit deel van het rivierengebied (Kesteren-Lienden-Maurik; Van Enckevort & Vos, 2006), op ruime afstand ten zuiden van de huidige Nederrijn, houdt met de rivieractiviteit in de (laat) Merovingische periode verband.

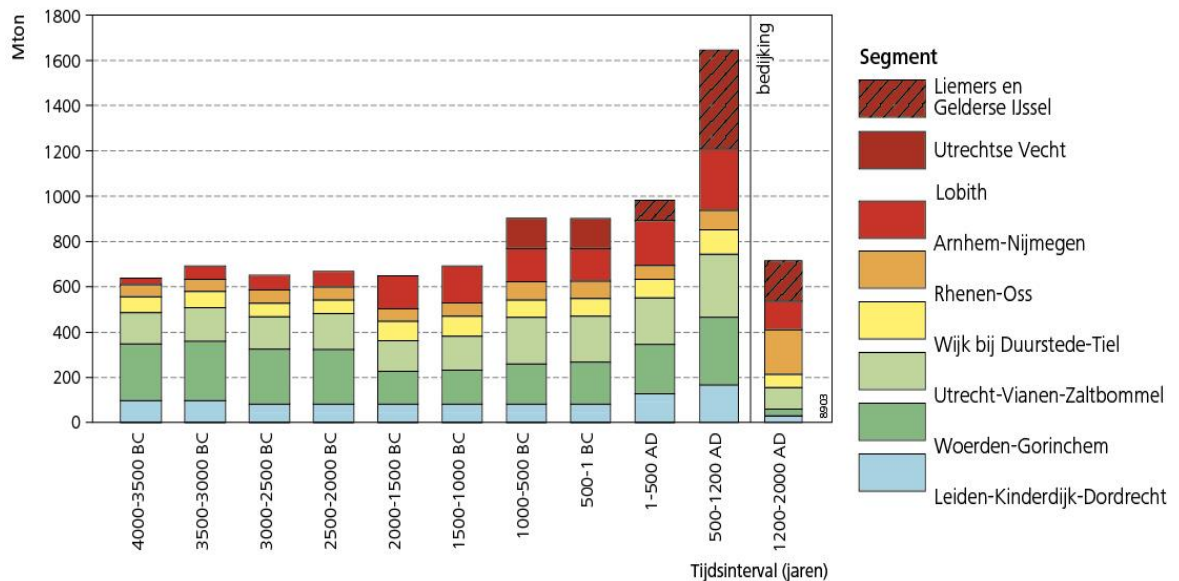
Langs de Waal (stroomafwaarts van Tiel) en langs de Nederrijn (Arnhem Velperbroek), kon uit de ruimtelijke verbreiding van de klei- en veenlagen vastgesteld worden dat er daadwerkelijk meerdere fases van klei-uitbreiding over weinig-kleiig gebied hebben plaatsgevonden, wat impliceert dat de spreiding in de dateringsuitslagen niet puur is toe te schrijven aan oxidatie of erosie op het contactvlak van veen en klei. Voor de laatste rivier is de serie ¹⁴C-dateringen van Teunissen (1990) uit afwisselend veniger en kleiiger lagen in komafzettingen bij Arnhem van belang (2000 tot 1575 ¹⁴C BP; locaties Velperbroek, Lathumerbroek, en ook Elden: Oude Zeeg). In de Merovingische periode is uitbreiding van kleiig gebied er met de bloeifase van de Nederrijn in verband te brengen. Pas tegen het einde van de periode is de verdere uitbreiding (van kom naar oeversedimentatie) aan het ontstaan van de Gelderse IJssel te koppelen (§2.6; Teunissen, 1990; Berendsen & Stouthamer, 2001; Makaske *et al.*, 2008; Cohen *et al.*, 2009; 2012).

De begindateringen voor de Lek zijn dunner gezaaid en onduidelijker dan die van Waal en Nederrijn. Dit is een van de redenen dat hier op dit moment hernieuwd dateringsonderzoek naar loopt²⁵. De wat oudere TPQ dateringen voor de Lek (Berendsen, 1982) relateren vermoedelijk aan de grootste laat-romeinse overstroming (vermoedelijk op de overgang 3e/4e eeuw), de wat jongere TPQ dateringen aan de serie zeer grote overstromingen in de vroeg Merovingische periode (eind 5^e en gehele 6^e eeuw – de Donkere Middeleeuwen of *Dark Ages*).

In het tweede deel van de Merovingische periode volgt rond 686 ± 69 na Chr. andermaal een 1/500-overstijgende overstroming. Een á twee eeuwen later volgt in het begin van de Karolingische periode, de grootste overstroming van het eerste millennium (1/1000 overstijgend). Vermoedelijk was dit in het jaar 784/5 na Chr. (tabel 1), tijdens het bewind van Karel de Grote (grote hinder tijdens veldtocht volgens historische bronnen; o.a. Gottschalk, 1971). Rond dat moment waren alle nieuwe 'Krimpense' takken Waal, Linge, Hollandse IJssel en Lek aan hun bloeifase begonnen (Berendsen, 1982; Törnqvist, 1993), maar was ook de oude 'Utrechtse' Kromme Rijn/Vecht/Oude Rijn vertakking nog actief (Berendsen, 1982; Van Dinter, 2013).

De grote overstromingen van rond 686 ± 69 na Chr. en van ca. 784/5 na Chr. kunnen als doorslaggevend voor het uitgroeien van de Nederrijn-Lek als noordelijke hoofdtak worden gezien (fig. 14). Dat wil zeggen dat de rivieractiviteit tijdens en in de nasleep van de overstromingen, de afvoerdeling op de splitsingspunten bij Lobith (met de Waal), Arnhem (met de Gelderse IJssel), Wijk bij Duurstede (met de Utrechtse Rijn, toenmalig Dorestad) en Vianen/Jutphaas (met de Hollandse IJssel) zodanig beïnvloedde, dat Nederrijn-Lek afvoer bleef houden (bloeifase cf. Berendsen, 1982), dat de Utrechtse tak haar afvoer definitief ging verliezen (Van Dinter *et al.*, subm. / voetnoot 21), en dat ook de Hollandse IJssel al weer begon te verliezen (onderwerp van studie in Pierik in prep. / voetnoot 25) ten gunste van Waal en Lek.

²⁵ Promotieonderzoek H.J. Pierik (Universiteit Utrecht) als onderdeel van het Dark Ages onderzoeksproject (Jansma, Stouthamer e.a. 2012-2017).



Figuur 15: Toenemende hoeveelheid sedimentatie van klei en silt in de Rijn delta, uitgesplitst naar segment en tijdsperiode. De tonnages nemen voorzichtig toe vanaf 1000 a 500 BC, en nemen sterk toe in de Vroege Middeleeuwen. Bron: Stouthamer et al., 2015, naar Erkens 2009.

De bloeifase van de Lek tussen Vianen en Krimpen begin mogelijk pas met deze grote overstromingen. De overstromingsevents lijken op kleinere schaal ook de restgeulmeandermorfologie te hebben beïnvloed (o.a. Schorn, 2013), en oeverwalvorming en geulpatronen direct rondom splitsingspunten (o.a. Van Rooijen, 2010; Van Dinter et al., subm.: splitsingspunt van Vecht in Utrecht).

Op vergelijkbare wijze kan het laat Merovingische/vroeg Karolingische paar van extreme overstromingen als doorslaggevend gezien worden voor veranderingen in afvoerverdelingslangs langs de zuidelijke hoofdtek Bovenwaal-Waal-Linge-Merwede (fig. 14). De afvoerverdeling op het bovenstroomse splitsingspunt, in een sterk meanderend grindig-zandig rivierbed, moet in die periode als afwisselend de Nederrijn resp. de Waal bevoordelend worden gezien (blijkens de lokale geomorfologie en onderschreven met modelberekeningen, Kleinhans et al., 2008; 2012).

Op dat splitsingspunt zullen normale voortgaande meanderverplaatsingen sowieso tot wisselingen in de afvoerverdeling geleid hebben, en hoeven specifieke allergrootste overstromingen daarin niet belangrijker te zijn geweest dan normale hoogwaters. Maar op de splitsingspunten verder benedenstrooms in het vertakkende netwerk, waar de rivieren minder sterk meanderden en hun verhang en typische stroomsnelheid geringer was, is de verwachting dat het optreden van grote hoogwaters sterker doorslaggevend was (deze hypothese is vooralsnog niet modelmatig onderzocht).

Langs de zuidelijke tak zou bijvoorbeeld de verdeling tussen Waal en Linge op het splitsingspunt bij Tiel in het uiteindelijk voordeel van de Waal, tijdens de grote vroeg Middeleeuwse hoogwaters bepaald kunnen zijn. Gelijktijdig dus met de ontwikkelingen langs de Lek. Als dat het geval is, kan het einde van Dorestad en de opkomst van Tiel als rivierhandelslocatie en veranderingen van de Merovingische naar de Karolingische periode niet alleen als cultureel maar ook als regionaal landschappelijk beïnvloed worden gezien.

Ook voor de Gelderse IJssel als derde grote tak van de Rijn delta, was het laat Merovingische/vroeg Karolingische overstromingspaar vermoedelijk doorslaggevend. Voor het ontstaan van deze tak is het niet zozeer de rivieractiviteit ter plaatste van het splitsingspunt

bij Arnhem die verondersteld wordt van belang te zijn, maar de activiteit verder stroomafwaarts langs het pad van de noordwaartse uitbraak van de nieuwe tak, in voormalig waterscheidingsgebied nabij Zutphen (Cohen *et al.*, 2009). De redenatielijijn voor wat betreft de koppeling aan grotere overstromingen is: “Als het niet al een vroeg Merovingische overstroming was die die waterscheiding voor het eerst overtopte (6^e eeuw), dan was het wel de laat Merovingische (eind 7^e eeuw) of de vroeg Karolingische (gesteld op 784/5 AD)”, en “Als de IJsseltak net al permanent in gebruik was na de eerste van die overstromingen, dan werd ze het wel na de tweede of derde”.

De oplopende (relatieve) magnitude voor de serie overstromingen – herhalingsstijd 1/200 in de 6^e eeuw, 1/500 in de 7^e eeuw, 1/1000 in 784/5 – zoals die met de overstromingsreeks uit het Rijn-apexgebied onafhankelijk kon worden vastgesteld (H3, fig. 6, tabel 1), ondersteunt die redenatielijijn verder. Beginnende doorbraken vanaf de 6^e eeuw en definitief slagen van de doorbraak in de 7^e-8^e eeuw komt overeen met het in §2.6 gepresenteerde kartering- en dateringsoverzicht voor de Gelderse IJssel. Het splitsingspunt van Nederrijn en IJssel moet in dit tijdsbestek zijn veranderd van het samenvloeiingsgebied van lokale afwatering langs de voet van de Veluwezoom (verlengde van de Oude IJssel en Berkel) met de Nederrijn, naar een meanderende aftakking (met omgekeerde stroomrichting). Dit werd een tweede bovenstrooms splitsingspunt van sterk meanderende riviertakken, naast dat van Lobith.

4.2.5 Oorzaak in toename sedimentlast, overstromingsintensiteit of allebei?

Al met al lijkt de serie grote riviervleggingen (Figuur 14) in de IJzertijd en eerste deel van de Romeinse tijd in gang te zijn gezet (500 v. Chr. tot 250 na Chr.). Niet zozeer de overstromingsintensiteit als wel de sedimentatie-intensiteit was in deze periode toegenomen. Er was een min of meer gelijkblijvende afvoer / overstromingsregime als in de periode ervoor, ondanks de toename van de sedimentlast.

Het gevolg was dat er rond 250 na Chr. naast de oude takken (reeds ontstaan in de Bronstijd; het Utrechtse stelsel) een aantal nieuw riviertakken waren bijgekomen (het Krimpense stelsel; vanaf de (late) IJzertijd ontstaan). De takken van het Utrechtse stelsel hadden aan deze nieuwe takken afvoer verloren, maar nog niet in die mate dat die oude beddingen als verlaten moeten worden beschouwd: De geulen van Kromme Rijn, Oude Rijn en Vechten waren nog geen ‘restgeulen’, maar nog steeds watervoerend. Wel waren de beddingen aan het verzanden en stroomde het overgebleven water er trager dan voorheen (Van Dinter *et al.*, subm.). Dit proces van afvoerterlies en verzanding zette zich in de daaropvolgende 6 á 7 eeuwen door (250 tot 900 na Chr.), totdat de rivier uiteindelijk niet langer watervoerend was. Pas in de eindfase was er sprake grotendeels dichtgeslibde restgeulen (vrijwel stilstaand water).

Ook in dat voltooiingsstadium van de grote vleggingen bleef de sedimentlast van de rivier toenemen en bijdragen aan het dichtslibben van rivieren en ophogen van oevercomplexen (Figuur 15). Pas in deze periode, vooral in de Laat Romeinse tijd, Merovingische en Vroeg Carolingische tijd (250 na Chr. tot 900 na Chr.) lijkt naast de sedimentatie-intensiteit ook de overstromingsintensiteit te zijn toegenomen. Het meermaals optreden van bijzonder grote overstromingen vanaf c. 250 na Chr., is dan ook aanleiding te veronderstellen dat de serie gebeurtenissen doorslaggevend was voor de water- en sedimentverdeling zoals die aan het einde van het eerste millennium was ontstaan op de avulsiepunten bij Vianen (Lek i.p.v. Hollandse IJssel), Utrecht (verdeling Vecht-Oude Rijn); Wijk-bij-Duurstede (Dorestad: Lek i.p.v. Kromme Rijn), Arnhem (Gelderse IJssel naast Nederrijn) en Tiel (verdeling Waal-

Linge)²⁶ – en in het bedijkingsprocessen vervolgens door de mens min-of-meer gefixeerd zou worden (Kleinhans et al. 2013; Stouthamer et al., 2015).

4.3 Lokale impact: overstromingslagen op archeologische sites

Naast landschapsveranderingen in fysisch-geografische zin zoals de bochtafsnijdingen en avulsies (§4.1 en 4.2), hebben grotere overstromingen van tijd tot tijd ook impact gehad op bewoningslocaties. Uit archeologisch onderzoek op site-niveau zijn er door de opeenvolgende perioden duidelijke aanwijzingen dat de mens van tijd tot tijd schade ondervond van overstromingen, en dat men daarop reageerde en zich lokaal aanpaste.

Met de opkomst van sedentaire bewoning en de opkomst van landbouw werd voor bewoners de potentiële schade door overstromingen groter, al was het alleen maar omdat bezittingen moeilijker verplaatst konden worden. Van het Neolithicum naar de Bronstijd werd de bewoning meer permanent en nam de dichtheid ervan toe (Arnoldussen, 2008). Vanaf de Romeinse tijd zijn er in het rivierengebied ook aanpassingen die bedoeld waren de impact van overstromingen en riviermigratie te beperken; zoals het opwerpen van kades en dijken (in de 13^e eeuw volledig in het Nederlandse rivierengebied; Hesselink, 2002), het verstevigen van oevers om erosie tegen te gaan (Van der Kamp, 2009; Luksen-IJtsma, 2010), het graven van afwateringskanalen (Van Londen, 2006; De Kort & Raczynski-Henk, 2014), en het ophogen van bewoningsplekken (Van der Kooij *et al.*, 2005; Blom & Vos, 2007/8).

4.3.1 Romeins voorbeeld: overstroomde Limes-castella

Uit de Romeinse tijd is het inrichten van castella langs de Limes een nieuwe militaire vorm van bewoning pal langs de rivier, die veel archeologische aandacht heeft gehad. De positionering van veel forten op de relatief lage oevers dichtbij de actieve riviergeul maakte de forten van nature kwetsbaar voor overstromingen. Zo zijn er te Meinerswijk (al dan niet Castra Herculis; Willems, 1980; Hulst, 2001), Vechten (Fectio; Zandstra & Polak, 2012), Utrecht (Trajectum; Ozinga, 1989), Woerden (Laurium; Blom & Vos, 2007) en Alphen a/d Rijn (castellum Albania; Polak *et al.*, 2004) meerdere fasen van ophoging gevonden die door de auteurs gerelateerd worden aan het optreden van overstromingen (en het reageren van de mens daarop).

In sommige gevallen zijn 'individuele' overstromingslagen van meer dan een meter aangetroffen en is het complete fort met meer dan 1.5 meter opgehoogd (Vechten; Utrecht; Meinerswijk). Vergelijkbare overstromingslagen zijn ook aangetroffen in de buurt van Wijk bij Duurstede (de Horden; Hensing, 1994) en nabij Bodegraven (Van der Kooij *et al.*, 2005). Dit overzicht kan met bevindingen op Romeinse sites langs de Beneden Rijn in Duitsland aangevuld worden. Een systematisch overzicht hiervan in dit gebied is ons niet bekend. Uitwerking daarvan valt buiten de scope van dit onderzoek, maar is waarschijnlijk wel mogelijk (en gewenst).

Voor de meeste overstromingslagen is geen nauwkeurige datering beschikbaar. In enkele publicaties worden de jaartallen ca. 40/41, ca. 175, en de tweede helft van de 3^e eeuw na Chr. gesuggereerd als jaren van grote overstromingen (o.a. Zandstra & Polak, 2012). Die laatste identificatie valt samen met het tijdelijk vertrek van de Romeinse legeronderdelen uit de Rijn-Maas delta omstreeks 260-270 na Chr. Ondanks het inzicht dat uit de sedimentaire archieven nu over overstroming in de Romeinse tijd bestaat, is het niet zonder meer mogelijk om de enkele grootste events direct verantwoordelijk te stellen voor alle overstromingsafzettingen en ophogingsfasen op alle bewoningsplekken uit de Romeinse tijd.

²⁶ En mogelijk ook bij op het meest bovenstroomse avulsiepunt, Lobith – maar heeft meanderactiviteit van de rivier in het jongste millennium een groot deel van het landschap nog eens omgewerkt (Kleinhans et al., 2010) en is het beeld voor IJzertijd, Romeinse tijd en Vroege Middeleeuwen minder duidelijk (Cohen et al., 2014a).

De castella in de delta liggen op zeer korte afstand van de rivier, op locaties die ook bij minder hoge piekafvoeren al zouden kunnen overstromen. Op deze benedenstroomse locaties hangt de frequentie van overstromen en het soort sedimentatie dat dan plaatsvindt sterk samen met lokale ontwikkelingen. Aan overstromingen toegeschreven lagen sediment zijn daarmee moeilijker direct te koppelen aan alleen de grootste overstromingen. Het bovenstroomse gedeelte van de delta en het aangrenzende dal in Duitsland zijn veel sterker differentiërend in de impact van grote en kleine overstromingen (Toonen *et al.*, 2013). De Duitse Limes castella en steden als Kleef/Qualburg (Quadriburgium) en Xanten (Tricensimae, binnen Colonia Ulpia Traiana) lijken door hun hoogteligging in eerste instantie geschikter voor het herkennen van aan extreme overstromingen toe te schrijven inschakelingen in de archeologische opeenvolgingen, dan de castella langs de Nederrijn.

Voor het gedeelte van de Nederrijn tussen Wageningen en Wijk bij Duurstede, gedurende het hele Holoceen als riviertak gefunctioneerd heeft (Cohen, 2003:H4), geldt dat het met het ontstaan en opbloeien van de Waal en Gelderse IJssel, steeds meer *underfit* raakte. Er zouden hierdoor contrasten kunnen bestaan in de preservatie van eventuele Limes-archeologie langs dit deel van de Nederrijn (?Kesteren) en die bij Arnhem-Meinerswijk en Huissen-Loo-Herwen stroomopwaarts. Dit los van de eerder genoemde lokale verleggingen van de Nederrijn tussen Rhenen en Amerongen in de Vroege Middeleeuwen, van een positie verder in de riviervlakte, naar een positie pal aan de voet van de Utrechtse Heuvelrug (§4.2.4).

Er bestaat een duidelijk contrast tussen de Midden Romeinse archeologische neerslag langs de Limes en die uit Laat Romeinse tijd. Op veel locaties stopt de archeologische neerslag langs de Limes merendeels in het derde kwart van de derde eeuw (en dat is reden hier de cesuur tussen Midden en Laat Romeinse tijd in de Nederlandse periodisering te leggen). De duidelijkheid van die cesuur hoeft langs de rivieren niet alleen aan de politieke instabiliteit in die periode gekoppeld te worden, maar kan door het optreden van een zeer grote overstroming rond dat moment wel eens taphonomisch versterkt zijn (§4.2.3). Dat zou niet alleen de duidelijkheid van de cesuur verklaren, maar ook een verklaring bieden voor de wijze van conserveren van de Limes archeologie, en voor de Laat Romeinse en Vroeg Middeleeuwse landschaps- en hergebruikscontexten van de Midden Romeinse fort-ruïnes.

Systematische kennis van de ruimtelijke verspreiding van sites met waargenomen overstromingslagen is momenteel nog onvolledig. Vooralsnog ontbreekt een specifiek op grote overstroming gerichte uitwerking van de gegevens. Er kan op dit moment nog niet goed vastgesteld worden wat de verbreiding is van de overstromingsafzettingen uit de tweede helft van de 3^e eeuw, en of dit al dan niet gerelateerd is aan de vermoedde 1/500-overstijgende overstroming in die periode (tabel 1, H3). Ook moet eerst de resolutie van de tijdreeks (fig. 10) voor de IJzertijd en de Romeinse tijd verbeterd worden (zie ook §4.2.3) om de relatieve grootte van grotere overstromingen rond 40 en 175 na Chr. goed vast te kunnen stellen. Vervolgens zou dan, al correlerend tussen sedimentaire tijdreeks en lokale archeologische overstromingschronologieën, het onderscheid tussen overstromingslagen en ophooglagen in en om de Limes forten verbeterd kunnen worden (zie ook §5.1).

Op zulk onderzoek anticiperend, is het zeker zinnig om archeologische overzichten op te stellen voor sites uit de Romeinse tijd, Vroege Middeleeuwen en Volle Middeleeuwen. Daarbij kan in eerste instantie worden gericht op sites dicht langs de rivieroever, zoals bijvoorbeeld romeïns Meinerswijk en Nijmegen-Lent, vanwege de grotere sedimentatiesnelheden. Het is zinnig in zulke overzichten ook sites op enige afstand van de rivieroever te betrekken, zoals bijvoorbeeld romeïns Elst, ter contrast maar ook ter verkenning. Voor zulke sites zijn de ideeën over incidentele overstromingssedimentatie en archeologische laagopbouw nu nog veel minder ontwikkeld dan voor de sites op de actieve oevers.

4.3.2 Middeleeuwse overstromingen en stadsarcheologie

Voor de Late Middeleeuwen zijn er ook veel voorbeelden van lokale impact van overstromingen op archeologie. Ook hier geldt dat ons daarvan een systematisch overzicht ontbreekt. Historische overzichten van vernoemingen van overstromingen zijn wel beschikbaar (Gottschalk, 1971; Buisman, 1996-2000) en als onderdeel van het promotieonderzoek zijn uit deze nationale compilaties de vermeldingen van specifiek grote Rijn overstromingen apart getabelleerd (Toonen, 2013; 2015). Ook internationaal (lees: Duitsland) bestaan er de nodige overzichten en compilaties van in de Rijn en haar zijrivieren opgewekte hoogwaters die op historische bronnen gebaseerd zijn (Weikinn, 1958; Glaser & Stangl, 2003; Wetter et al., 2011; Glaser *et al.*, 2012; Brázdil *et al.*, 2012).

Historische vermelding van het hoogwater in 1342 gaan in Nederland terug op de Tielse Annalen (*Annales Tielenses*, c. 1440: overstroming van Overbetuwe, Nederbetuwe en Tielerwaard). Er zijn verder een groot aantal Duitse bronnen (Magdalenenhochwasser) langs de Main (Mainz, Frankfurt, Würzburg), Moezel (Trier), Lahn (Limburg) en Beneden Rijn (Keulen). Een recent overzichtsartikel over specifiek dit overstromingsjaar is dat van Herget *et al.* (2015). Stadsrekeningen van Deventer (Cameraarsrekeningen) en Arnhem voor de jaren 1374/75 vermelden de nodige schouwingen en maatregelen in januari 1374 (Gottschalk, 1971; Buisman, 1996). Aantekeningen betreffende dijkherstel in de stadsrekeningen van Doesburg werden aan het jaar 1374 gekoppeld (Van de Ven en Meihuizen, 1943; Gottschalk, 1971), maar zouden volgens Zondervan (1961) en Gaspar (2011) van 1389/90 dateren.

In gunstige situaties zouden archeologische lagen met een overstromingscontext net zo bruikbaar kunnen worden als waterlijnmarkeringen op gebouwen en peilschalen die nu voor historische hoogwateranalyses gebruikt worden. Eén voorbeeld van zulke overstromingslaagjes in de vroegste stadsfasen van Doesburg (12^e, 13^e en 14^e eeuw; Haans, 2008; Harenberg, 2008; Fermin & Groothedde, 2008) wordt hieronder ter illustratie ingebracht. In samenwerking met lokale specialisten zouden per middeleeuwse rivierstad een systematisch overzicht van overstromingslaagjes in de stadsophogingen aangelegd kunnen worden. Daarbij zouden steeds hoogteligging en archeologische datering vastgesteld kunnen worden²⁷. Vervolgens kunnen de voorkomens vergeleken worden met de timing en magnitude van grotere overstromingen uit de tijdreeks van figuur 10.

²⁷ Dit daadwerkelijk gaan doen, voor steden zoals Arnhem, Zutphen, Nijmegen, Rees, Emmerich, Kleef, is gepland als onderdeel van het "Floods of the past" onderzoeksproject in de komende jaren. Zie ook voetnoot 29 en 30.

4.3.3 Casus 14^e eeuws Doesburg

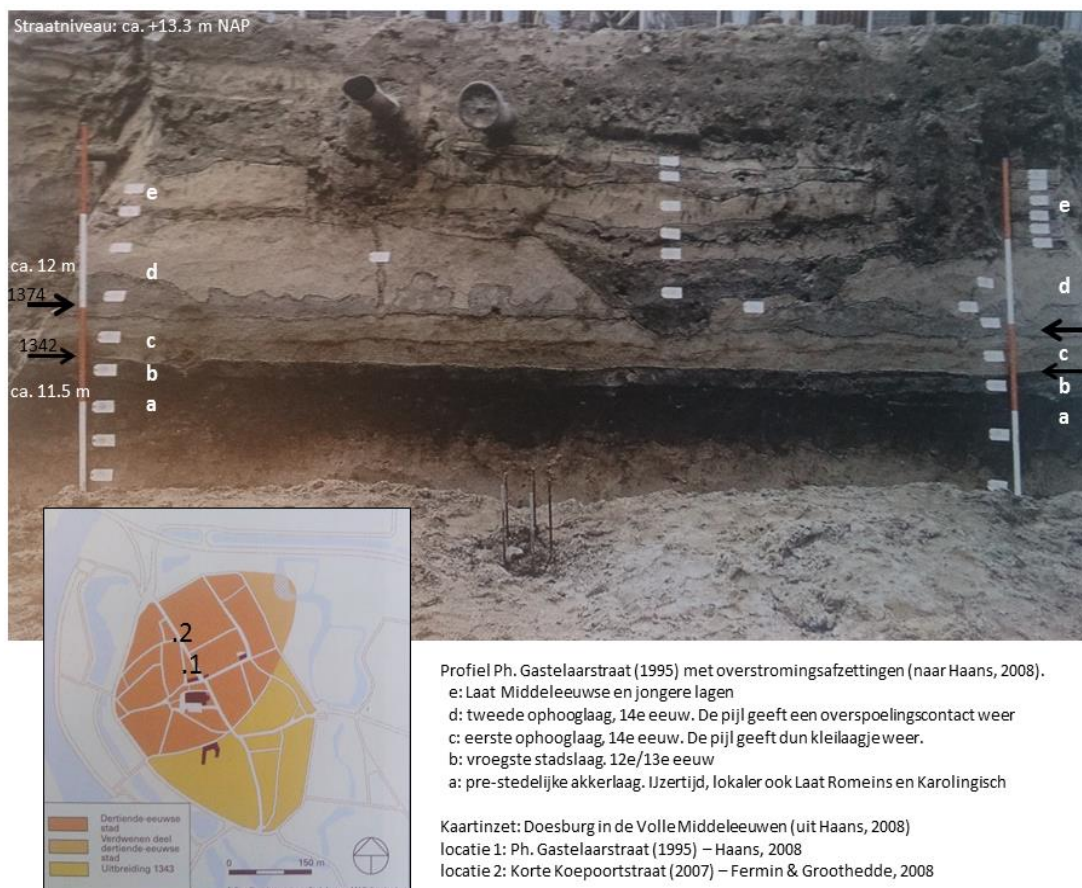
In het centrum van de stad, ten noordwesten van het Raadhuis zijn twee profielen in detail beschreven en archeologisch onderzocht (Ph. Gastelaarstraat, opgraving in 1995; en Korte Koepoortstraat, opgraving in 2007). De stad is in de Volle Middeleeuwen gesticht op een rivierduin met ontwikkelde podzolbodem, die in de IJzertijd extensief beakkerd is geweest, en lokaler ook in Bronstijd, in laat Romeinse tijd/Merovingische Tijd en in de Karolingische Tijd bewoond en beakkerd lijkt te zijn geweest.

In de Gastelaarstraat, waar het rivierduin het hoogst reikt (ca. 11,60 m +NAP), ligt op de akkerlaag een dm-dikke vroegste stadslaag in donkergrijsbruin zand met aan de top een dun kleilaagje. Het afzetten van dat kleilaagje moet op basis van onder en overliggende archeologie in de 14e eeuw geplaatst worden. Daarop ligt een zandophoging, ca. 25 cm dik, met aan de bovenkant een bij overstroming overspoelde loopvlaklaag (ca. 11,85m +NAP). Daar bovenop ligt andermaal een zandophoging van ca. 40 cm dik. De zandophogingen kunnen in de 14^e eeuw geplaatst worden. Het kleilaagje en de overspoelde loopvlaklaag kunnen aan respectievelijk de 1342- en 1374-overstromingen gecorreleerd worden. Het aanbrengen van eerste ophooglaag kan gezien worden als reactie op de overstroming in 1342. Het verder verhogen past dan als hernieuwde reactie op de 1374 overstroming. De dieptes van de overstromingslaagjes en diktes van de ophooglagen in reactie daarop zijn indicaties voor de bij deze overstromingen in dit deel van het IJsseldal behaalde (juist overschreden) waterstanden. De ophooglagen hangen ook samen met zuidoostwaartse stadsuitleg halverwege de 13e eeuw (fig. 16). Hiertoe werd in 1343 toestemming verleend, onder vermelding van wateroverlastproblematiek (Haans, 2008).

In de Korte Koepoortstraat, wat lager op het rivierduin en dichterbij de rivier, is een 13^e/14^e eeuws huis, in tegenstelling tot andere generaties huizen op het perceel niet door brand vergaan maar afgedekt met een kleiige laag. In de eerste helft van de 15^e eeuw werd hier een bakstenen huis gebouwd. De 13^e en 14^e eeuwse huisvloeren liggen op 11.5 tot 11.7 m +NAP. De vroeg-15^e eeuwse moppenvloer op de kleilaag ligt op 12.0 m. Geëvalueerd moet worden of de cesuur tussen het 14^e eeuwse huis en 15^e eeuwse huis (en de kleilaag) samenvalt met de overstromingen van 1342 en 1374. De tweede overstroming mag geacht worden hoger te hebben gereikt dan de eerste. Er zou in Doesburg in de middelhoge stadsgedeelten (in een maanvormige zone rondom het allerhoogste deel van het duin) van algemene herbouw van huizen in de laat 14^e en vroege 15^e eeuw sprake kunnen zijn, in reactie op aanmerkelijke waterschade in 1374. Als er nieuwe waarnemingen gedaan worden – ook in lagere delen van de stad en de stroomafwaartse zijde van het rivierduin – kan bovenstaand scenario verder onderzocht worden.

Het veronderstellen dat de overstromingen van invloed waren is voor de casus Middeleeuws Doesburg niet nieuw (Gottschalk, 1971; Fermin & Groothedde, 2008). Voor Doesburg wordt verder gezegd dat “Aan het begin van de 14^e eeuw” een noordoostelijk deel van de 13^e eeuwse stad door activiteit van de IJssel is opgegeven (Haans, 2008). De grote overstromingen van 1342 en 1374, in dit geval vermoedelijk vooral de eerste, kunnen als de oorzaak worden aangemerkt.

Lager langs het rivierduin zouden behalve 1342, ook aan de jaren 1290, 1305-1308, 1321-22, en 1336 toeschrijfbare aanwijzingen voor overstroming en/of ondergraving kunnen worden aangetroffen. Die reeks overstromingen was de vermoedelijke aanleiding voor het oprichten van het Waterschap Salland in 1308 (Spek *et al.*, 1996; Van Hall, 1997), en noopte op vele plaatsen in het rivierengebied tot dijkherstel (o.a. ter hoogte van onderzoekslocatie Meinerswijk van Toonen 2013), en wordt als aanleiding gezien tot toestemmingsverlening door de hertog van Gelre aan Doesburg tot stadsuitleg (in 1340 cf. Gottschalk, 1971; in 1343 cf. Haans, 2008).



Figuur 16. Doesburg in de 14^e eeuw en archeologische registratie van 1342 en 1374 overstromingen

Haans (2008) merkt voor Doesburg tenslotte op, dat niet zozeer de Gelderse IJssel, maar water in de Oude IJssel de eroderende kracht zou zijn. Het Oude IJssedal was een overlooproute voor de Rijn-overstromingen in deze periode. Dit was ook bij het grote hoogwater van 1926 het geval (fig. 17). Modelsimulaties van maatgevend hoogwater overstijgende piekafvoeren in de huidige situatie geven dit ook aan. De kolk het Waalsche Water in het smalste gedeelte van het holocene dal van de Oude IJssel bij Doetinchem dateert mogelijk uit deze periode (Cohen *et al.*, 2009; 2012). Deze locatie zou mogelijk gebruikt kunnen worden om het sedimentair archief van locaties zoals Mw: Meinerswijk te verifiëren / kruisvalideren. Hetzelfde geldt voor stads- en kasteelgrachtvullingen en zoals die langs de IJssel her en der bestaan²⁸. “Mogelijk al rond 1389-1390” (Haans, 2008) waren er bij Doesburg werkzaamheden aan een sluis in de Oude IJssel. Aan de noordoostzijde van de stad verscheen langs de nieuwe stadgrens in 1458 een watermolen, die ook op de kaart van Jacob van Deventer (ca. 1560) figureert.

In bovenstaand voorbeeld voor 14^e eeuws Doesburg zijn archeologische fenomenen aan grote overstromingen toegeschreven die uit historische bronnen al bekend waren. Voor de archeologie zit de meerwaarde van de nieuwe gegevens (de tijdreeks van Hoofdstuk 3) er vooral in dat de relatieve grootte van de overstroming in 1342 ten opzichte van 1374 onafhankelijk bekend is.

²⁸ In het geval van de Berkel bij Zutphen, waarvan de loop in de volle middeleeuwen omwille van de stadswatermolen is verlegd, zijn er zelfs geulvullingen die de Vroege Middeleeuwen omspannen (Groothedde, 2010).

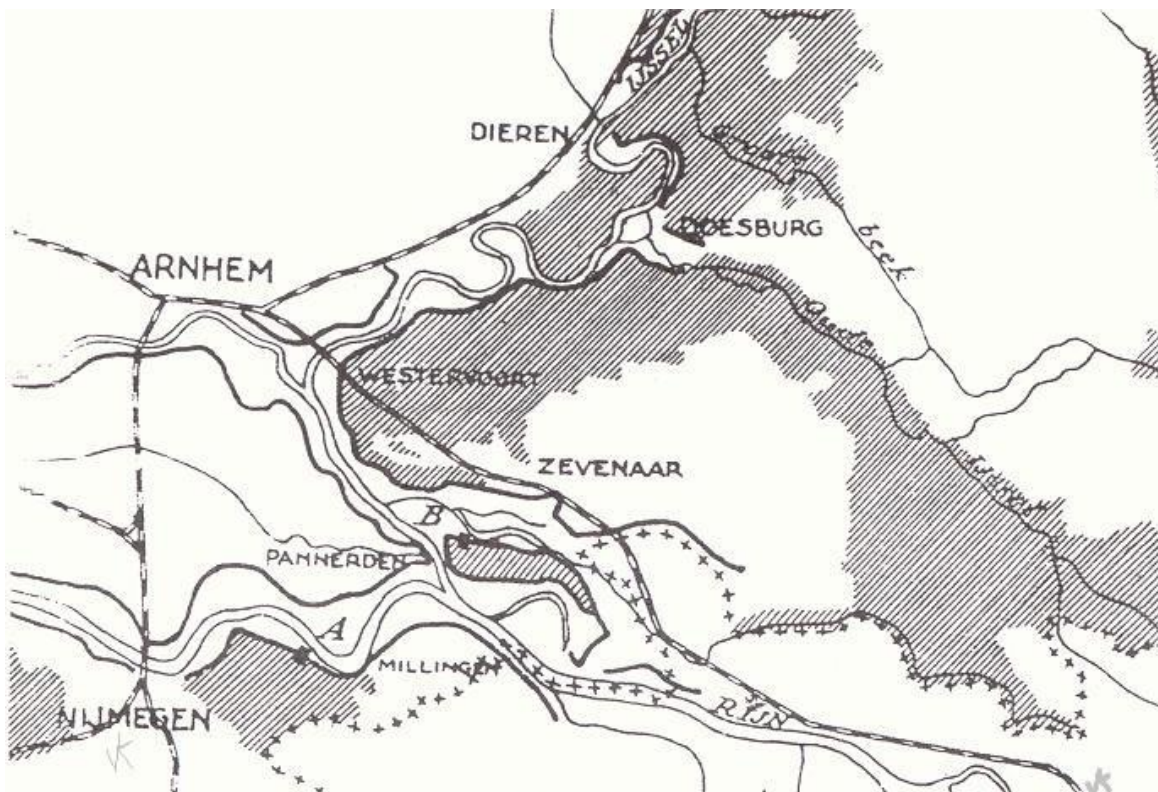
Verder biedt het archeologisch identificeren van overstromingsafzettingen in zeldzaam-hoge posities in contexten zoals in Doesburg, kansen deze overstromingen kwantitatief numeriek te modelleren²⁹ en daarmee de absolute grootte beter vast te stellen. In Keulen zijn de waterstanden van 1342 en 1374 zichtbaar als markeringen en inscripties bij de ingang van de romaanse St. Kolumbakerk, zoals die tot aan de bombardementen in de Tweede Wereldoorlog bestonden (0.8 resp. 2.5 meter hoger dan de hoogste peilen daar waargenomen in de 19^e en 20^e eeuw; Hergert & Meurs, 2010).

De voor 1342 (c. +11,60 m NAP) en 1374 (c. +11,85 m NAP) te Doesburg afgeleide waterstanden verhouden zich tot een waterstand (RWS Waterbase 2012, waternormalen) van +10,85 m NAP in 1926 en een ontwerphoogte van +11,10 m NAP bij een afvoer van 15.000 m³/s bij Lobith. Dit biedt dus ook in Nederland zelf directe informatie die laat zien dat de waterstanden en afvoeren in 1342 en 1374 zeer hoog en groot moeten zijn geweest. Hierbij moet opgemerkt worden dat (i) de IJssel in de 14^e eeuw vermoedelijk een groter percentage van de Rijnafvoer trok (mogelijk tot 1/6), dan dat ze dat in de huidige gereguleerde toestand doet (1/9; RWS Waterbase 2012), en dat (ii) de breedte van de overstromingsvlakte in het rivierengebied groter is dan in het Rijndal bij Keulen en de waterstandsverhoging bij toenemende afvoer daarmee geringer (zie ook §3.2.1).

Voor de afvoer door de bedding van de Gelderse IJssel mag gesteld worden dat in deze riviertak de grootste afvoergolven er in de 14^e eeuw gepasseerd zullen zijn. In de latere eeuwen, was de IJssel aan het verzanden en werd een relatief groter deel van de hoogwatergolven door de Waal afgevoerd (Van de Ven & Eymers, 2007; Kleinhans *et al.*, 2013). Van de 14^e eeuwse waterstanden uit Keulen is in onderzoek naar de grootte van de bij behorende piekafvoeren al wel gebruik gemaakt (Hergert & Meurs, 2010), maar er zijn nog geen studies waar zulke modelberekeningen ook zijn gekalibreerd op waterstanden in de delta, zoals die uit de Doesburgse archeologie (fig. 16). Zonder benedenstroomse controle op waterstanden blijven piekafvoer-modelsimulaties onnauwkeurig (de grootte ervan kan makkelijk overschat worden), en het voor de 14^e eeuwse en latere extreme hoogwaters beschikbaar hebben van waterstanden bij Doesburg biedt perspectief de afvoerreconstructies te verbeteren (Mulder-Noordermeer, 2008).

De ad-hoc ervaringen met overstromingsgelaagdheid in stadsarcheologische contexten zoals die van in Doesburg, suggereren dat het langs de bovenloop van IJssel, Nederrijn en Waal (Overbetuwe, Liemers, Oude-IJsseldal) mogelijk moet zijn meerdere waarnemingen van de grootste historisch bekende overstromingen te doen. Bovendien zijn er uit landschaps-archeologische en geomorfologische context in specifiek het Oude IJsseldal en IJsseldal tussen Doesburg en Zutphen mogelijkheden voor reconstructie van de hoogste incidentele waterstanden (Cohen *et al.*, 2009).

²⁹ Het inzetten van numerieke modellering in het paleohydrologische onderzoek werd door Cohen & Lodder (2007) aanbevolen, als de parallel aan de sedimentaire aanpak (resulterend in het proefschrift Toonen, 2013 en dit rapport) te bewandelen weg. Verkennende studies zijn hiertoe de afgelopen jaren uitgezet als MSc-stageonderzoek vanuit Universiteit Utrecht (bij Deltares) en als MSc-afstudeeronderzoek vanuit Universiteit Twente (bij Lievense-CSO i.s.m. Rijkswaterstaat). Ze tonen aan dat modellering van paleo-overstromingen technisch mogelijk is, maar ook dat zulke modellering zeer gevoelig is voor de schematisering van het overstroomde landschap en voor kalibratie op waterstanden. De verkennende studies gebruiken waterstanden en afvoeren ter hoogte van Keulen en simuleren vervolgens hoe voortplanting van de afvoerpiek benedenstrooms tot inundatie leidt. De verkenningen leverden een bandbreedte aan scenario's, waaronder zeer extreme, omdat de berekeningen onder andere erg gevoelig zijn voor keuzes in de schematisatie van het landschap in de modellen.



Figuur 17. Overstroomd gebied ten tijde van het hoogwater van 1926 (Departement van Waterstaat, 1926)

Een specifieke vraag voor de extreme hoogwaters in het bovenstroomse deel van het rivierengebied, is hoe het overschot aan overstromingswater (de overvloed aan afvoer die de rivier buiten haar bedding doet treden) zich tussen het IJsseldal en Overbetuwe verdeelde is veel minder duidelijk. Dat aspect van historische extreme overstromingen is de kern van het in 2016 te starten onderzoeksproject "Floods of the past"³⁰.

³⁰ In september 2015 is door NWO-STW vanuit de WATER2015 call een 4-jarige subsidie voor twee promovendi toegekend aan het project "Floods of the past, design for tomorrow", door Universiteit Utrecht (Middelkoop/Cohen) & Universiteit Twente (Hulscher/Schielen), i.s.m. diverse gebruikerspartijen waaronder Rijkswaterstaat, LANUV Nordrhein-Westfalen, Deltares en RCE. Het project is in Februari 2016 opgestart en heeft als doel de waterhoogte, voortplanting en afvoerverdeling van extreme piekafvoeren in het Nederrijn, Liemers/Oude IJssel en Overbetuwe gebied te modelleren. Kern van het project zal zijn voor historische extreme overstromingen (784/5, 1342 en 1374, 1651 en 1658, 1809, 1926) verantwoorde schematisaties te maken, de passage en verdeling van de afvoergolf in het Duits-Nederlandse apex-gebied, en de gevoeligheid van piekafvoergrootte en verdeling bij verandering en onzekerheid in waterhoogte te kwantificeren. Waar het project Toonen (2009-2013) als de uitvoering van 'Aanpak 2' in het RIZA rapport Paleogeografie en veiligheid tegen overstromen (Cohen & Lodder, 2007: Appendix 2) kan worden gezien, kunnen onderdelen uit Floods of the past worden gezien als verwezenlijking van 'Aanpak 1' en biedt Mulder-Noordermeer (2008) een uitgewerkt voorbeeld voor de 1926 casus.



Foto 4. Extreem hoogwater 1926 in Deventer langs de IJssel. Bron: Stadsarchief & Athenaeumbibliotheek Deventer

5 Aandachtspunten bij het potentiële archeologische gebruik

5.1 Het herkennen van overstromingslagen in opgravingen

Gezien de versheid van de geologische inzichten, is het in het bij gebruik van de overstromingsreeks in lokaal archeologisch onderzoek – waar het vooral om het verzamelen van nieuwe feitelijke informatie en dat combineren van bestaande informatie gaat – de komende jaren verstandig losse indicaties voor impact van overstromingen niet al te snel aan één-en-hetzelfde enkele event toe te schrijven. Het is verstandiger om van geval tot geval te leggen koppelingen tussen afvoerreconstructie en verschijnselen op archeologische sites steeds als hypothese te beschouwen, en de geldigheid ervan te onderzoeken.

Lang niet overal zullen mogelijke overstromingslagen uiteindelijk direct gerelateerd blijken te zijn aan juist één allergrootste overstroming. Bovendien kunnen er in opeenvolgende eeuwen grote verschillen ontstaan in de manier waarop en bij welke kritische afvoer lokaal overstromingslagen worden afgezet. Verder zullen natuurlijke overstromingslagen lang niet overal simpelweg van ophooglagen door menselijke activiteit te onderscheiden zijn. Ze zijn vaak afgeticheld of doorploegd en daarmee niet meer te herkennen.

5.1.1 Doorwerken van dateringonzekerheid bij correlaties

In veel gevallen zal het gebruik van de informatie uit het overstromingsonderzoek neerkomen op het (i) aantreffen van een aan een extreme overstroming toe te schrijven fenomeen, (ii) het grof bepalen van de ouderdom van het fenomeen op basis van informatie op de nieuwe onderzoekslocatie, en vervolgens (iii) vergelijking met en eventueel overnemen van een nauwer bepaalde datering uit overzichten zoals tabel 1, figuur 10 of bijlage A. De vergelijking komt dus neer op afwegen wat eigenlijk beter gedateerd is: het nieuw aangetroffen fenomeen in archeologische context, of de overstroming in de overzichten.

Veelal zijn archeologische vondstlagen in het riviereengebied gedateerd met nauwkeurigheden van 30 tot 200 jaar, op basis van ¹⁴C-datering, vondstassociaties en dendrochronologie. Nauwkeuriger dateringen komen ook voor, voornamelijk in de Romeinse tijd en vanaf de Volle Middeleeuwen. De nauwkeurigheid van dateringen van overstromingslagen (tijd-dieptemodellering) in de restgeulen varieert ook tussen ± 30 en ± 150 jaar (§3.2.5). De datering van rivierverleggingen (TPQ-dateringen, tabel 2) hebben individueel beschouwd een nauwkeurigheid van ± 150 jaar (tabel 2).

5.1.2 Archeologische locaties als specifieke afzettingmilieus

Beïnvloeding van het afzettingmilieu door ingrepen van de mens werkt door in de overstromingsafzettingen in en direct rondom archeologische sites, en is iets om bij het herkennen en vergelijken van overstromingslagen rekening mee te houden. In natuurlijke delen van het riviereengebied is in de regel sprake van sedimentatie tijdens overstromingen, volgens voorspelbare patronen als opslibbende oeverwallen langs geulen en verdikkende opvullingen in restgeulen en komgebieden. Om reden van het optreden overstromingen, zijn natuurlijke hoogten op enige afstand van de actieve rivier er de geijkte vestigingslocaties.

Als rondom een archeologische site langs de rivier omwallingen en omkadingen worden aangelegd tegen indringers en wateroverlast, stopt dat in eerste instantie sedimentatie tijdens normale overstromingen en verandert het verder de condities voor sedimentatie tijdens grote overstromingen. In de directe omgeving zal opslibbing doorzetten. Zonder overstromings-opslibbing en/of menselijke ophogingen, zou het loopvlak in het omwalde nederzettingsterrein in de loop van de tijd relatief lager komen te liggen. Dit betekent dat zelfs als een onderhouden omwalling overstromingswater en sediment enige tijd heeft weten buiten te

houden, er op zeker moment nog tot ophoging moet worden overgegaan omdat het binnenterrein anders zou verdrassen³¹.

Op oeverlocaties langs een actieve rivier, denk aan de Limes forten in Nederland, is het daarom niet onlogisch dat de archeologische pakketten relatief dik zijn. De situatie lijkt gunstig voor het herkennen van overstromingslagen als cesuren in de bouw- en bewoningsfasen van de castella (waarschijnlijk ook in de post-romeinse periode, zie ook §4.1). Juist voor sites in de nabijheid van de rivier, is het nodig criteria te ontwikkelen ter onderscheid van ophoging door de mens versus ophoging door overstromingen. Voor sites op grotere hoogte boven de rivier, zoals de 14e-eeuwse ophooglagen in het voorbeeld Doesburg, is het onderscheid eenduidiger omdat dit locaties zijn die sowieso alleen bij de meest extreme overstromingen overspoeld raken, en er dan slechts een dun laagje sediment wordt afgezet.

Archeologische locaties bieden dus om meerdere redenen een veel minder constant afzettingsmilieu voor overstromingssediment, dan bijvoorbeeld restgeulvullingslocaties. Archeologie gebruiken om lokaal overstromingschronologieën af te leiden kan daarom eigenlijk pas bij een gevorderde stand van gravend onderzoek, door waarnemingen van meerdere locaties in een beperkt gebied in 3D-verband te vergelijken, rubriceren en analyseren. Dit is wel een fase waar het lokale archeologische onderzoek in het rivierengebied op veel plaatsen zo langzamerhand is aanbeland, in ieder geval voor wat betreft de hoeveelheid beschikbare informatie.

Omdat de afvoerverdeling op natuurlijke splitsingspunten in de tijd varieert, zou bovendien de impact van overstromingen langs één riviertak een tijd lang relatief groot kunnen zijn en registratie ervan relatief gunstig, terwijl er in diezelfde periode langs een andere tak juist veel minder frequent duidelijke overstromingsimpact is waardoor die nauwelijks van andere ontwikkelingen op de archeologische sites langs die tak te onderscheiden is. Dit nog los van niet aan overstromingen te relateren archeologische verschillen tussen riviertakken in dezelfde periode (culturele bewoningsverschillen) en verschillen in de stand van het archeologisch onderzoek tussen en langs de takken (onderzoeksbias).

Al met al zal dit de mogelijkheden tot het opstellen van overstromingschronologieën op basis van archeologische sites langs sommige takken beperken en langs andere juist vergroten. Niet iedere site zal even geschikt zijn voor correlatie naar de tijdreeks uit Hoofdstuk 3 (fig. 10), laat staan voor onafhankelijke verificatie, maar er zullen zeker sites en regio's zijn waar de omstandigheden hiertoe voldoende gunstig waren.

In het geval van de allergrootste overstromingen is het waarschijnlijk dat meerdere gebieden vergelijkbaar zwaar getroffen werden. Met het aanleggen van dijken differentieerde de overstromingslast van polder tot polder per gebeurtenis. Door deze effecten is het overstromingsarchief in de jongste 2000 jaar het meest geldig voor het rivierengebied ten oosten van de lijn Utrecht - Wijk bij Duurstede - Tiel (en voor de IJssel tot aan Zwolle): het deel van de rivierdelta waar de effecten van getij en zee-inbraken verwaarloosbaar zijn, waar de riviervlakte relatief smal is en het aantal vertakkingen gering. Dit sluit niet uit dat het jongere deel van het overstromingsarchief ook als vergelijkingsmateriaal kan worden gebruikt ten westen van Tiel, maar het moet daar met wat meer slagen om de arm worden toegepast dan bovenstreams.

³¹ *Op iets grotere ruimtelijke schaal, speelt verandering in patronen van overstromingssedimentatie in interactie met menselijke maatregelen ook bij de aanleg van kades en dijken rondom dorpen, bijvoorbeeld in de aanloop naar algemene bedijking van het rivierengebied in de Volle Middeleeuwen.*

5.1.3 Toepasbaarheid van correlaties op grootte in benedenstroomse gebieden

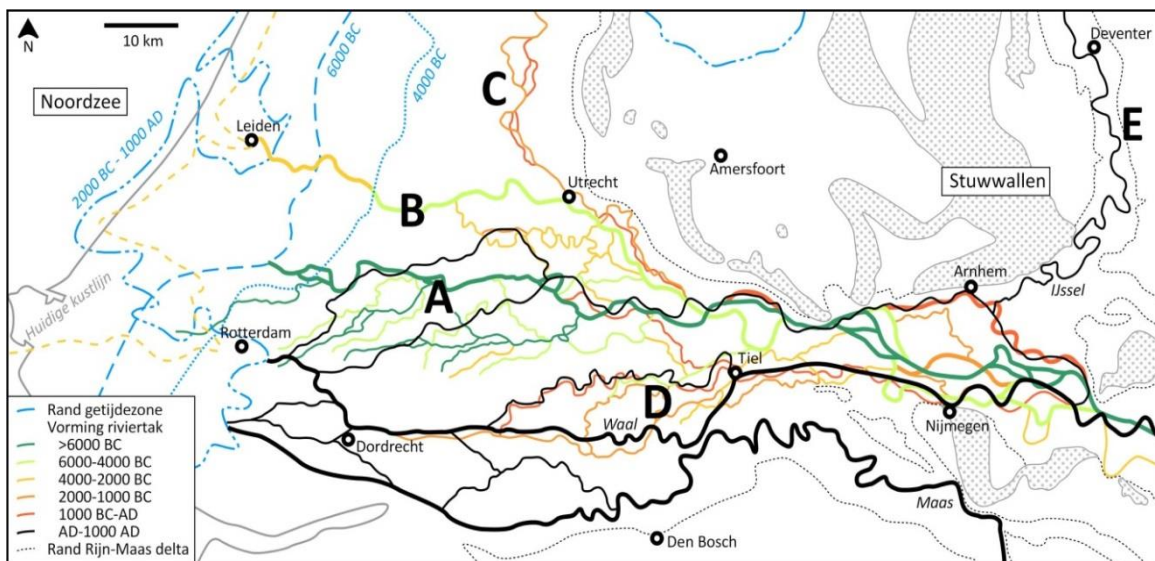
Op het rivierengebied verder benedenstrooms zullen de extreme overstromingen ook hun doorwerking gehad hebben, maar daar was de Rijn niet de enige veroorzaker van overstromingen en dus moet daar in het gebruik omzichtiger worden omgegaan met het leggen van correlaties. De volgende alinea's beschrijven tot hoe ver benedenstrooms in de delta, de eerder gepresenteerde overstromingsgeschiedenis (fig. 10; Hoofdstuk 3) en archeologische gebruiksverkenningen (Hoofdstuk 4) nog gedacht worden op te gaan, en in welke archeologische perioden dit van belang is.

Figuur 18 onderscheidt in het benedenstroomse rivierengebied, stroomafwaarts van de lijn Utrecht-Tiel vier deelgebieden (A-D). Het IJsseldal is een vijfde benedenstrooms gebied (E). Tabel 3 geeft de inschatting van de bruikbaarheid voor vijf opeenvolgende perioden weer, waarbij de begrenzingen op de grotere omslagen in het rivierennetwerk zijn gebaseerd. Figuur 18 geeft met blauwe lijnen ook weer tot waar op verschillende momenten in de tijd de getijdeninvloed reikte. In die gebieden is de tijdreeks van rivieroverstromingen zondermeer niet geldig.

Voor wat oudere perioden is het overstromingsarchief wat directer relevant voor delen van de benedenstroomse delta, en ligt de benedengrens van het toepassingsgebied verder stroomafwaarts dan in latere perioden (fig. 18, tabel 3). De reden hiervoor is dat in het Mesolithicum en Neolithicum er nog lagere relatieve zeespiegelstanden waren, waardoor stormvloed minder ver landinwaarts reikten. Tijdens deze periode ontstond geleidelijk een vrijwel gesloten kustlijn (strandwalcomplex tussen Maasmond bij Rotterdam en Rijn monding bij Leiden). Gelijktijdig heeft de hoofdloop van de Rijn zich over de periode 6000 v. Chr. tot 2000 v. Chr. avulsief naar het noorden verplaatst (van A naar B in fig. 18).

Door strandwalvorming en Rijnverplaatsing kon een groot gebied in het huidige Groene Hart tot veengebied worden. Dit beperkte sindsdien de reikwijdte van zee-inbraken. Er was hierdoor in de Bronstijd een duidelijke scheiding tussen het gebied dat door rivieroverstromingen beïnvloed werd; het latere Kromme Rijn gebied, Nederbetuwe, Tielerwaard en de Bommelerwaard, en gebied dat door getijdewerking vanuit zee opslibbing onderging: de Maasmond en de Rijnmonding (Berendsen & Stouthamer, 2001; Gouw & Erkens, 2007; Vos *et al.*, 2011; Stouthamer *et al.*, 2015).

Het veengebied in het Groene Hart (de latere polders Rijnland, Krimpenerwaard, Alblasserwaard, Grootte Waard/Biesbosch) scheidde daarmee de rivier- en zee-overstromingen. Dit is positief voor de toepasbaarheid van de rivieroverstromingsinzichten in gebied A. Menging van overstromingssignaal was tijdens de Bronstijd dus veel minder aan de orde dan in latere perioden. In de Mesolithische en Neolithische periode was er in het toenmalige Rijnmondingsgebied vermoedelijk meer menging van overstromingssignaal van zee en rivier dan in de periode er na.



Figuur 18: Gebiedsindeling voor benedenstroomse delen van de Rijndelta t.b.v. toepassingen van het overstromingsarchief uit het delta-apex gebied. Ouderdommen en groepering van de stroomstelsels naar Berendsen 1982; Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen et al., 2012.

	6500 - 4000 BC Meso - Neol	4000 - 1000 BC Neol - Brons	1000 BC - 500 AD Brons-IJZT-ROM	500 - 1200 AD VME-LME	1200 AD - NT
Bovenstrooms rivierengebied					
Apex, Betuwe	++	+++	+++	+++	++
Benedenstrooms rivierengebied					
A Oostelijke Groene Hart	+/-	+	++	++	+
B Oude-Rijn gebied	-	++	++	++	-
C Utrechtse Vecht gebied	-	-	+	+/-	-
D Zuidelijke delta	-	-	+	+	+
E Gelderse IJssel	-	-	-	++	++

+++ het primair bedoelde toepassingsgebied en -periode;
 ++ naar verwachting goed toepasbaar;
 + mogelijk goed toepasbaar, mogelijk zee- en/of Maas-beïnvloedde overstromingen;
 +/- naar verwachting beperkt toepasbaar, met zee-beïnvloedde overstromingen;
 - naar verwachting niet van toepassing, tenzij met extra identificerend onderzoek.

Tabel 3: inschatting van de bruikbaarheid rapportinzichten in toenemend benedenstroomse gebieden

Gedurende de Bronstijd was de Oude Rijn tussen Woerden en Alphen a/d Rijn (Gebied B) een relatief smalle corridor door het veengebied, dat vrijwel al het Rijnwater doorvoerde. Ter plaatse van de Beneden Merwede had ook de Maas zo een corridor gevormd. Die voerde vrijwel al het Maaswater door en ook overschotten aan overstromingswater van de Rijn dat er via de Tielerswaard naartoe vloeide. Buiten de corridors van de Oude Rijn en de Maas bestonden er geen andere rivierverbindingen tussen riviereengebied en kustzone (Berendsen & Stouthamer, 2001; Erkens, 2009; Vos *et al.*, 2011; Cohen *et al.*, 2012; Stouthamer *et al.*, 2015).

Gebied A werd in de Bronstijd een venig-kleilig randgebied dat in het zuidwesten vermoedelijk minder regelmatig overstroomde (alleen bij grotere hoogwaters) dan in het noordoosten. Dit gebied was rijk aan kleinere riviertakken, aftakkend van en parallel stromend aan de hoofdlopen van Rijn en Maas, en aan de benedenstroomse rand van het riviereengebied weer terug aansluitend op de bovengenoemde corridors. Bewoners van juist dit deel van de deltavlakte zullen op het voorkomen en terugkeren van grotere rivieroverstromingen geanticipeerd hebben. Archeologische theorievorming over deze bewoning, met aandacht voor het terugkerende natuurlijke verschijnselen langs de rivier en doorwerking daarvan op gedrag door opeenvolgende generaties bewoners (kennisoverdracht, collectief-geheugen, trouw aan vestigings-locatie) is voor vroegere boerengemeenschappen te vinden in Arnoldussen (2008).

Gaande de IJzertijd en Romeinse tijd nam in het zuidwesten van de Rijndelta het aantal zee-inbraken toe. Dit is vermoedelijk in de hand gewerkt door de ontginning van veengebieden (en nog versterkt door veenwinning, voortzettende natuurlijke bodemdaling en mogelijk verandering van het stormklimaat op de Noordzee (veel bronnen; Oost, 1995; Vos *et al.*, 2011/Vos, 2015; Stouthamer *et al.*, 2015). Eigenlijk trad pas in deze periode in de westelijke delta het probleem van vermenging van signaal³² van rivier-overstromingen en stormvloed op. De aanhoudende inbraken en vergrote kwetsbaarheid voor overstromingen waren aanleiding tot de bedijking (veel bronnen; Stouthamer *et al.*, 2015), als oplossing voor zowel wateroverlast bij stormvloed als bij rivierhoogwater. Hierbij moet ook de toegenomen sedimentlast in de rivieren Rijn en Maas als sturende factor in de landschapsontwikkeling niet vergeten worden (Erkens, 2009; Kleinhans *et al.*, 2013a).

5.1.4 Onafhankelijkheid van het Maas overstromingsregiem

De Maas ligt als regenrivier in dezelfde klimatologisch/meteorologische zone als de Moezel, en deze laatste is een belangrijke bijdragende rivier tijdens de hoogwaters van de Rijn. In veel gevallen zijn jaren met middelgrote hoogwaters in de Rijn dan ook jaren met hoogwaters in de Maas. Maar als het gaat om herhalingstijden en magnitudes van zeldzaam grote events, wordt het samenvallen met hoogwatergolven uit Midden Duitsland en het alpiene gebied belangrijk. Ook wordt de relatieve timing van neerslag en sneeuwsmelt in Ardennen, Eifel en Vogezen van belang. Daardoor zal zeker niet gelden dat aan ieder zeldzaam groot hoogwater in de Rijn een even zeldzaam en even groot hoogwater in de Maas hangt.

Pas als er ook een onderzoek dat specifiek op de Maas gericht is bestaat, kan vastgesteld worden in hoeverre er gelijkheid is in de frequenties van optreden van middelgrote overstromingen in de Maas en in de Rijn, en of de extremen voor de Maas vaker wel of niet samenvallen met die van de Rijn. Het is momenteel niet aan te bevelen om het Rijnarchief als leidend te beschouwen voor gebeurtenissen in het stroomgebied van de Maas. Hetzelfde geldt wanneer de apex Rijn-tijdreeks op individuele zijrivieren stroomopwaarts in het stroomgebied zoals de Lippe, Ruhr, Moezel, Main en Neckar van toepassing wordt verklaard.

³² Zowel in sedimentaire zin (§1.5), als in historisch-interpretatieve zin (vele voorbeelden in Gottschalk, 1971; Buisman, 1996; 2000).

Voor de Moezel en Main zal het wel zo zijn dat zeer grote overstromingen in de Beneden Rijn, ook aardig groot in deze zijrivieren zijn geweest, maar niet noodzakelijk de allergrootste. Omgekeerd heeft een zeer grote overstroming in één of meerdere bovenstroomse zijrivieren niet noodzakelijkerwijs tot een zeer grote overstroming in het apexgebied geleid. Bij het correleren van het sedimentaire archief aan middeleeuwse historische bronnen voor de Duitse zijrivieren dient hier ook rekening mee gehouden te worden.

5.2 Betere datering uit gekoppeld geologisch-archeologisch onderzoek

Rivierverleggingsoverzichten zoals in tabel 2 kunnen ook voor de eerdere archeologische perioden worden opgesteld. Figuur 10 suggereert dat dat vooral in de Bronstijd nuttig kan zijn. Mogelijk zijn de grotere overstromingen uit het tweede en derde millennium v. Chr. markante scheidingen in de fasering van stroomrug- en crevassevorming, en biedt dit aanknopingspunten voor interpretatie van de archeologie uit deze periode (e.g. Arnoldussen, 2008; Van Dinter & Van Zijverden, 2010).

5.2.1 Het verbeteren van verleggingsdateringen

Op basis van de verkenningen in dit rapport (H4) lijkt vooral de datering van de grootste events te kunnen worden verbeterd door combinerend gebruik van archeologische en fysisch-geografische gegevens. De verwachting is dat in de komende jaren archeologische toepassing van de inzichten in de overstromingsgeschiedenis daar aanleiding toe zal geven. Als nieuw combinerend gebruik in de komende jaren aantoont dat specifiek de allergrootste overstromingen bij nadere beschouwing inderdaad op meerdere archeologische locaties met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid herkend kunnen worden, dan gaat de kennis over de datering van extreme overstromingen ook event-stratigrafisch doorwerken in de datering van archeologische ontwikkelingen.

In §4.2 is voor het eerste millennium na Chr. de potentiële koppeling – op ‘event-chronostratigrafische gronden’ – van de overstromings- en de verleggingsgeschiedenis uitgewerkt. Het is belangrijk te herhalen

- (i) dat deze koppeling als uitgangspunt heeft dat zeer grote jaarlijkse piekafvoeren (zeldzame extreme overstromingen) inderdaad in zeer korte tijd geconcentreerd zeer veel geomorfologische arbeid verrichten, dan de zich veel vaker herhalende jaarlijkse piekafvoeren van normale magnitude;
- (ii) dat hoe zeldzamer, groter en geïsoleerder optredend een extreme overstroming was, hoe waarschijnlijker het is dat juist die grote overstroming de verlegging heeft doen doorslaan;
- (iii) dat de koppeling in perioden met verhoogde overstromingsintensiteit én verhoogde sedimentlast sterker zou kunnen zijn dan in perioden met relatief lage intensiteit.
- (iv) dat in verlegging-overstroming event-stratigrafische koppeling, in de tijd beschouwd de TPQ-verleggingsdateringen net iets eerder zou moeten vallen dan de overstroming in het gecompileerde restgeulvullingen-archief.

De inkadering voor het onder (i) genoemde uitgangspunt is in §2.4 gegeven. Punt (ii) impliceert dat verleggingen die in de delta rond 2770 v. Chr. plaatsvonden aan de in dat tijdvak herkende relatief geïsoleerde grote overstroming gekoppeld zouden kunnen worden. Berendsen (1982), Stouthamer (2001) en Berendsen & Stouthamer (2001) beschrijven in ZW Utrecht en de Nederbetuwe verleggingen in deze periode. Zulk onderzoek vereist een uitwerking van de beschikbare gegevens op een vergelijkbare manier als in tabel 2 en figuur 8 voor het eerste millennium AD gedaan is. Punt (iii) impliceert dat bijvoorbeeld van 6500 tot 5000 v. Chr., de invloed van verhoogde overstromingsintensiteit op verleggingen groter kan zijn geweest, dan in de periode daarna. Immers, tijdens en direct volgend op de transgressieve fase van deltavorming in het begin van het Midden Holoceen (‘snelle relatieve zeespiegelstijging’; Jelgersma, 1961; Van de Plassche, 1982; Hijma 2009; ‘veel subaquatische sedimentatie in nieuw-verdronken komgebieden’ Van der Woude, 1983; Hijma

et al., 2009) was er een groter sedimentatie-intensiteit in het benedenstroomse rivierengebied dan erna (Hollandveen).

Dit zou betekenen dat de in §3.3.3 geïdentificeerde perioden met tijdelijk verhoogde overstromingsintensiteit, koppeling van verleggingen en extreme overstromingen in een veel eerdere periode 6000-5700 v. Chr. potentieel makkelijker te onderzoeken (verifiëren, falsificeren) zijn dan voor latere van zulke perioden (zoals rond 1300 v. Chr.). Dit illustreert dat 'preservatie' en 'potentie voor reconstructie' niet altijd afnemen als verder in de tijd wordt teruggegaan: in tegenwoordig deltaïsche gebieden kan dat potentieel in het Midden Holoceen vanwege de toenmalige transgressieve omstandigheden juist toenemen.

Gezien de dichtheid en dateringsnauwkeurigheid van archeologische waarnemingen uit deze periode (Laat Mesolithicum, Neolithicum), is het lastiger de potentie van gekoppeld geologisch-archeologisch onderzoek in te schatten, dan dat voor de Romeinse en Middeleeuwse perioden is. Maar over het taphonomisch screenen van archeologische sites op impact van overstromingen en het wederzijds gebruik maken van dateringen (in archeologische context verworven; uit het sedimentaire overstromingsarchief betrokken) gaan in principe dezelfde gedachten, werkvormen en mogelijkheden op. Het punt (iv) over het verschil tussen TPQ/TAQ ouderdommen en die van event-laagjes volgens tijddieptemodellen van restgeulvullingen, gaat ook op voor de dateringen die archeologische opgravingen nog aan de gedeelde overstromingsgeschiedenis (figuur 10) kunnen leveren.

5.2.2 Het verbeteren van dateringen van meanderafsnijdingen

Bovenstrooms van de delta met haar avulsiepunten, en ook in de delta zelf nu de rivieren er bedijkt zijn, is het trekken van relaties tussen morfologische ontwikkelingen (bochtverplaatsing, bochtafsnijding, ondergraving van dijken) lastiger, omdat ze niet langer op regionale schaal plaatsvinden. Er zijn in de uiterwaarden wel de nodige deelgebieden aan te wijzen waarvan de vorming in de 11^e tot 16^e eeuw geplaatst moet worden (Cohen *et al.*, 2014a en veel bronnen daarin), waarbinnen het ontstaan van sommige strangen wel eens met de 14^e eeuwse grote afvoerpieken gekoppeld zou kunnen zijn.

Zulke potentiële koppeling zou daarvoor van geval tot geval onderzocht moeten worden, met gecombineerd dateringsonderzoek (¹⁴C, palynologisch, archeologisch) en historisch brononderzoek (kronieken, vanaf de 16^e eeuw ook oude kaarten). Als dan bijvoorbeeld blijkt dat een onevenredig groot aandeel van de bochten binnen de uiterwaarden is afgesneden in 1342 en/of 1374 in vergelijking met de eeuwen ervoor en erna, dan zou dat grote invloed van extreme piekafvoeren op de rivierdynamiek onderschrijven. Ook voor bochten die medio 1658 zijn afgesneden kan dat worden onderzocht, in combinatie met historische bronnen, archieven van waterschappen, vroegste historische kaarten.

Tot in de 18^e eeuw waren de splitsingspunten van Waal en Nederrijn (Lobith) en Nederrijn en IJssel (Arnhem) nog niet vastgelegd en dus instabiel in hun verdeling. Mogelijk was de passage van grote afvoerpieken, via veranderingen in geul- en bankligging op de dynamische splitsingspunten, daar doorslaggevend van invloed op afvoerverdeling (Kleinhans *et al.*, 2013ab). Het verzanden van de Gelderse IJssel in de Late Middeleeuwen, min of meer gelijktijdig met het economisch verval van de Hanzesteden en de opkomst van Hollandse handelssteden, zou op deze wijze door de piekafvoeren in de 14^e eeuw kunnen zijn ingeluid. Ook de 17^e en 18^e eeuwse riviergeschiedenis van Boven Waal, Nederrijn-bovenmond en Pannerdens Kanaal biedt aanknopingspunten voor zulke verklaringen (Van de Ven, 1976; Van de Ven & Eymers, 2007; Kleinhans *et al.*, 2012).

5.2.3 Ockham's razor en correlatie van overstromingen en avulsies

Het wetenschapsfilosofische principe 'Ockham's razor' (*novacula Occami*: het niet zonder noodzaak veeleer van de te evalueren mogelijkheden) kan worden ingezet om primair in te zetten op scenario's waarin veel geomorfologische verandering in de rivierlopen aan de enkele grootst-bekende piekafvoeren wordt toegeschreven (§4.2; Figuur 14). Pas als dateringen van een rivierverlegging niet meer met 'slechts' de datering van de allergrootste overstroming overeen kan komen, moet de onderzoeker er toe overgaan de betreffende verlegging (of ook: *fasering van de verlegging*) aan een wat kleinere overstroming toe te schrijven.

Ter illustratie zijn de redeneringen achter de in tabel 2 gemaakte koppelingen hier samengevat:

- Het scenario waarin Lek (van Wijk bij Duurstede tot Vianen) en Hollandse IJssel kort na 1950 of 1805 ¹⁴C BP 'tegelijktijd' ontstaan zouden zijn door de Laat Romeinse '<1/500' overstroming heeft vanuit dat principe voorrang op het scenario dat deze tak in twee fasen met ieder een eigen grotere overstromingen veronderstelt (waarvan dan één al dan niet aan de genoemde 1/500-overstijgende overstroming te correleren zou zijn). Ook TPQ-dateringen voor de Waal van 1815 en 1795 ¹⁴C BP zouden in het als eerste te onderzoeken scenario optie met die 1/500 overstroming gelijk gesteld worden. Het is dan niet mogelijk ook nog de TPQ-dateringen van 1600 ¹⁴C BP aan dat event te correleren, en het wordt daarmee dan waarschijnlijker dat die aan een tweede gebeurtenis gerelateerd moeten worden. Die jongere extreme overstroming zou dan eerste van de 1/200-overstijgende overstromingen van de 5^e en 6^e eeuw kunnen zijn, die ook de Lek stroomafwaarts van Vianen zou hebben getriggerd.
- Het scenario waarin de Gelderse IJssel relatief laat en in één keer ontstaat tijdens de '1/1000' overstroming van 784/5 na Chr. laat een zeer korte tijd tussen de vorming van de rivier en het ontstaan van deze vroege steden als Deventer en Zutphen als Frankische handelscentra langs die rivier (Groothedde, 2010; 2013). De avulsie toeschrijven aan de '1/500' overstroming van 686 ± 69 na Chr. laat al meer tijd (tabel 2). Het begin van deze avulsie toeschrijven aan een '1/250' overstroming in de 6^e eeuw (dendrochronologie geeft een aanknopingspunt op 530 na Chr.; Sass-Klaassen & Hanraets, 2006) blijft met het beschikbaar komen van de overstromingsreeks ook een mogelijkheid. Wie piekafvoeren niet alleen voor het beginnen, maar ook voor het verder doorontwikkelen van de Gelderse IJssel als doorslaggevend wil zien, heeft (ook met Ockham's razor toegepast) twee tot drie grote overstromingen nodig. De eerste daarvan is de overstroming die zorgt voor het 'overtoppen' van de waterscheiding en het gebruiken van het IJsseldal als overlaat-route. Een tweede grote overstroming maakt de doorbraak definitief en zorgt dat de route continu afvoer blijft trekken. Een eventuele derde grote overstroming verdiept en vergroot de bedding (en verandert de afvoerverdeling op het splitsingspunt bij Arnhem) zodanig, dat de IJssel haar maximale afvoer gaat trekken – en dat allemaal in de periode 500-900 AD. Daarna vindt er, in de inmiddels bedijkte situatie van de Late Middeleeuwen en Nieuwe Tijd, geleidelijk verlies van afvoer plaats, ten gevolge van dynamiek op de splitsingspunten bovenstrooms.

Bij dit detail-niveau van beschouwen van het ontstaan van een rivier, wordt het steeds belangrijker wat precies bedoeld wordt met 'het beginnen van de tak' en op welk traject van de rivier dat van toepassing is (Cohen *et al.*, 2009). Voor het benedenstroomse deel van de IJssel (Wijhe-Zwolle-Kampen), kan voorafgaand aan 'beginnende klei-sedimentatie' (vanaf de 8^e eeuw) en 'bloEIFase' (vanaf de 10^e eeuw; Makaske *et al.*, 2008; Cohen *et al.*, 2009; 2012) nog een fase van 'hydrologische verandering door initiële overstromingen' worden gedacht, die dendrochronologisch duidelijk geregistreerd lijkt (Sass-Klaassen & Hanraets, 2006) dan dat zij sedimentair herkend of gepreserveerd is.

Bij het opstellen van schema's zoals tabel 2, en vooral bij het vervolgens inzetten op correlaties tussen enerzijds riviervleggingen en anderzijds overstromingen om langs de idee van figuur 13 'zoveel mogelijk dateringen' te verkrijgen voor één enkel zeldzaam event, moet er wel voor gewaakt worden dat niet op een enkel scenario wordt ingezet. Anders dan Hoofdstuk 4 en tabel 2, zijn Hoofdstuk 3 en het artikel manuscript in Bijlage B om die reden vooralsnog juist conservatief in de rapportage van de ouderdommen. Alternatieve correlatiescenario's blijven denkbaar, en het verdient aanbeveling die ook uit te werken (bijvoorbeeld het scenario waarin al de overstroming van 686 ± 69 na Chr. voor de Gelderse IJssel de doorslaggevende is, versus een waar dat pas die in 784/5 na Chr. is).

5.2.4 Combinatiemogelijkheden met dendrochronologie

Een andere manier om de dateringonzekerheid van extreme overstromingen zou kunnen verkleinen, is de tijdreeks te correleren aan dendrochronologische groeischommelingenreeksen in bomen langs rivieren. Zulke reeksen zijn voor meerdere regio's in het rivierengebied en de delta beschikbaar en omspannen in iedere regio aanzienlijke delen van de laatste 4000 jaar (Sass-Klaassen & Hanraets, 2006; Jansma *et al.*, 2012). Het betreft zowel hout uit archeologische gebruikscontext als uit natuurlijke context.

De Nederlandse reeksen (boomringkalenders) van eiken uit het rivierengebied hebben een sterk paleohydrologisch signaal dat afwijkt van kalenders voor eiken van droge standplaatsen uit omliggende gebieden. De mogelijkheden tot combinerend onderzoek worden momenteel verkend³³. Zulk onderzoek zal moeten bezien in hoeverre we in de groeischommelingen van doen hebben met individuele extreme hoogwaters – of dat er een complexere vorm van hydrologische invloed op boomringgroei is (hoogwater specifiek in groeiseizoen, opeenvolgende hoogwaters in opeenvolgende jaren en daarmee meerjarige reducties in boomringdikte).

Bij koppeling van beide reeksen zal voor een aantal dendrochronologische bekende groeischommelingen zal zeker een link met de extreme overstromingen gemaakt kunnen worden, met aanzienlijke winst in dateringsnauwkeurigheid van de betreffende overstromingen. De vraag is vooral of er, buiten groeischommelingen door rivieroverstromingen, ook groeischommelingen met niet-overstromingsoorzaken kunnen worden aangewezen of verondersteld, met aanzienlijke winst voor paleohydrologisch en -klimatologisch gebruik van de dendroreeksen. Mogelijk is uit combinatie van de overstromingsreeks en dendrochronologische reeksen ook winst te behalen in het bepalen van de benedenstroomse rand van registratie van het rivieroverstromingssignaal in de deltavlake.

³³ Pers. com. 2013-2014: E. Jansma, W.H.J. Toonen, K.M. Cohen, E. Stouthamer. Universiteit Utrecht.



Foto 5: Waalbrug Nijmegen in (2010), voor aanvang dijkeruglegging Lent, tijdens normaal hoogwater.
Foto: Willem Toonen, UU.

6 Conclusies en Aanbevelingen

6.1 Conclusies

Dit rapport presenteert onlangs uit fysisch-geografisch onderzoek verworven kennis over extreme overstromingen van de Rijn, als een nieuw beschikbaar gekomen gegevensbron voor gebruik in de archeologie. De gegevensbron is een gecompileerde reeks (figuur 10) die is samengesteld uit op meerdere locaties in het bovenstroomse gebied van de Rijndelta verzamelde gegevens en volgens een hier specifiek voor ontworpen methode. Voor wat betreft historische en prehistorische tijdvakken is de overstromingsgeschiedenis van de Rijn hiermee op een nieuw detailniveau ontsloten. Het doel van dit rapport was het potentieel archeologisch onderzoeksgebruik van de nieuwe inzichten en reikwijdte van gegevensbronnen inzake de overstromingsgeschiedenis van de delta te verkennen, zowel voor lokale sites in het rivierengebied als op de landschappelijke schaal.

De onderzoeksmethode is ontwikkeld in het promotieonderzoek van Toonen (2013) en combineerde een veldstrategie gericht op sedimentaire vullingen van afgesneden meanderbochten, met korrelgrootte-analyse en dateringstechnieken met beschrijvende statistiek. Het ontwerp van de methode richtte zich erop het sedimentaire archief zo continu mogelijk te onderzoeken en ontsluiten. Daartoe:

- (i) werden meerdere boorkernen van afgesneden meanderbochtlocaties verzameld, waarvan de ouderdommen van de vullingen deels overlapten (H3, Bijlage A);
- (ii) werd de bemonstering van boorkernen voor korrelgrootte-analyse op continue wijze uitgevoerd (kerndeel voor kerndeel werd cm voor cm voor laboratoriumanalyse opgewerkt en doorgemeten; Bijlage A), waardoor ingeschakelde event-lagen van aller-grootste events opgespoord worden die ingebed liggen in sedimenten van normale overstromingen;
- (iii) werd eerst onafhankelijke dateringsinformatie voor het begin, verloop en einde van iedere geulvulling te verzamelen en tijd-diepte relaties per onderzoekslocatie vast te stellen (Bijlagen A, C en D); om vervolgens bij het compileren van de totaalreeks de dateringen van de grootste overstromingen aan te scherpen met event-stratigrafische dateringstechnieken;
- (iv) zijn de resultaten die de sedimentaire methode voor de jongste 450 jaar opleverde (Bijlage C), geverifieerd tegen onafhankelijke gegevens, zoals debiet- en waterstandsmetingen (RWS-Waterbase; meetreeksen bij Lobith, Keulen, Nijmegen, Arnhem, Emmerik; continu vanaf 1772 AD; Toonen, 2015) en met historische gegevens uit jaren met grote hoogwaters op de Rijn (bijv. Buisman, 1996; 2000; Glaser & Stangl, 2003; compleet vanaf de 14e eeuw);
- (v) zijn de stappen die al cross-validerend van resultaten per onderzoekslocatie naar de compilatie voor het Rijn-apex gebied werken herhaalbaar, en kunnen bij het beschikbaar komen van nieuwe kernen en dateringsinformatie de onzekerheid op timing en herhalingstijd van specifieke extreme events verkleind kan worden (H3; Bijlagen A en B).

In Hoofdstuk 3 zijn de diverse stappen van de methodiek uitgewerkt en onderbouwd. Bij de huidige stand van onderzoek, kan met de resultaten uit het Proefschrift Toonen (2013) / Hoofdstuk 3 tot 8000 jaar terug van de allergrootste overstromingen (zeldzamer dan eens per 500 jaar, tabel 1) de timing worden vastgesteld. Voor de jongere tijdvakken is de reeks van sedimentair herkende relatief grotere overstromingen een nieuwe gegevensbron, naast de al bekende overstromingsgeschiedenis die zich op schriftelijke bronnen, peilmerken op gebouwen en metingen baseerde. Voor de oudere tijdvakken is de gecompileerde reeks een volledig nieuwe continue gegevensbron (figuur 10).

Bij de huidige stand van onderzoek is nu beter dan voorheen bekend wanneer in het verleden de echt allergrootste afvoeren optraden. Voortbordurend op de inhoud van het proefschrift, werkt het rapport de huidige stand van dateringsnauwkeurigheid voor de grootste overstromingen uit (Tabel 1; §3.3.2). Hoofdstuk 2 en 3 positioneren de nieuwe fysisch-geografische inzichten in de overstromingsgeschiedenis inclusief hun onzekerheden. Het rapport stipt bij herhaling aan dat met kritisch gebruik van de gegevens in de archeologie, een wisselwerking kan ontstaan wat betreft het verder verkleinen van onzekerheden in de datering van de grootste overstromingen, en dat zulk gebruik een goede zaak is als verificatie van de juistheid van de reeks (of falsificatie in het geval er onvermoed toch nog onjuistheden in methodische onderbouwing en huidig verwerkte resultaten blijken te bestaan). In het rapport komt dit tot uitdrukking in Hoofdstuk 2 en Hoofdstuk 5, in §6.1.2 als onderdeel van de conclusies, en in §6.2 als ondertoon in de aanbevelingen.

In Hoofdstuk 4 worden de archeologische toepassingsmogelijkheden geïdentificeerd. Concrete gebruiksvoorbeelden bestrijken Middeleeuwse stadsarcheologie, provinciaals Romeinse archeologie, landschapsarcheologie in het rivierengebied in het algemeen, maar vooral ook fysisch-geografische landschapsreconstructievragen met directe archeologische relevantie, zoals het dateren van bochtafsnijdingen en rivierverleggingen. De hoofdgedachte is dat toegepast gebruik van de overstromingsinzichten in de archeologie leidt tot toetsing van de resultaten uit de nieuwe fysisch-geografische methodiek, en tot terugvloeiën van bijkomende gegevens.

6.1.1 De tijdreeks in huidige vorm

De met het Proefschrift Toonen (2013) beschikbaar gekomen tijdreeks aan overstromingen voor de Rijn, heeft de volgende eigenschappen:

- De tijdreeks is tot 8000 jaar geleden (6000 v. Chr.), gezien de onderliggende bemonsteringsstrategie en compilatie-methodiek, stellig als compleet te beschouwen voor alle '1/250' overschrijdende overstromingen (fig. 10). Hierbij staat '1/250' voor de jaarlijkse kans op optreden van een afvoer van gegeven grootte. Dat de allergrootste overstromingen wel individueel herkenbaar zijn in de onderzoekskernen die aan het oudere deel van de tijdreeks bijdragen, terwijl matig grote overstromingen ('1/100') dat niet zijn, is terug te voeren op de ligging van de onderzoekslocaties aan de rand van de overstromingsvlakte (distaal, op grote afstand van de actieve rivier; H3), met lage accumulatie-snelheden en differentiërend onderscheid (hoge drempelwaarde in fig. 10).
- De huidige tijdreeks is tot 1500 jaar geleden (500 na Chr.) als min-of-meer compleet te beschouwen voor alle '1/25' overschrijdende overstromingen (of in ieder geval de 1/50 overschrijdende).
- De datering van de grootste prehistorische events baseert zich op ¹⁴C-datering en ouderdoms-dieptemodellering en heeft typische onzekerheden van ±50 tot ±150 jaar (2σ; tabel 1). Door in te zetten op het combineren van de nieuwe dateringen, met zowel gegevens uit archeologische contexten en die uit de traditionele dateringsaanpak voor rivierlopen in de delta (fig. 13), is de dateringonzekerheid in voorkomende gevallen mogelijk verder is terug te dringen.
- De methodiek waarmee de sedimentaire archieven van verschillende onderzoekslocaties langs de Rijn in het apex-gebied (bijlage A) tot één gezamenlijk signaal voor het gebied van benedenrijn en delta wordt gecombineerd (fig. 10), is met nieuwe onderzoekslocaties uitbreidbaar.
- De resolutie van '1/25' a '1/50' is met de ontwikkelde methoden in principe voor eerdere perioden ook te bereiken – maar dit vereist het aanvullend kernmateriaal verzamelen en op korrelgrootte analyseren van meanderlocaties met niet al te distale geulvullingsfacies, zoals de resultaten voor locatie Rheinberg voor de periode 2700 tot 1900 v. Chr. al illustreren (fig. 10).

6.1.2 Bruikbaarheid in deelregio's van het Rivierengebied

De tijdreeks is opgesteld voor het bovenstroomse deel van delta. Haar geldigheid en relevantie voor verdere delen van het Rivierengebied varieert per deelgebied en in de tijd (figuur 18 en tabel 3, p. 71). Dit geldt ook voor de in het rapport vermelde archeologisch toepassingen en aanbevelingen op basis van de tijdreeks.

- De tijdreeks is primair van toepassing op het Rijn-gedomineerde stroomopwaartse deel van de delta in Nederland (fig. 4, fig. 18). De tijdreeks is ook voor de Beneden Rijn (Niederrhein) in aangrenzend Duitsland geldig, in ieder geval vanaf de confluente met zijrivier de Lippe, en met enige armslag vanaf de samenvloeiing met Ruhr.
- In de jongste 2000 jaar, moet bij gebruik in gebieden stroomafwaarts van de lijn Oss-Tiel-Utrecht (het centrale deel van de delta) rekening gehouden met uitdamping en verdeling van de overstromingslast en vanaf benedenstrooms werkende invloeden op waterstanden bij overstromingen, die als gevolg van zeeinbraken en getijdeontwikkeling veranderlijk waren.
- In de Bronstijd en IJzertijd, toen er in het Groene Hart een scheidend veengebied functioneerde, zijn de inzichten naar verwachting ook stroomafwaarts van die lijn Oss-Tiel-Utrecht nog wel toepasbaar: tot ongeveer de lijn Woerden-Vianen-Zaltbommel.
- In het IJsseldal, stroomafwaarts van de Doesburg/Zutphen, is de Rijn-overstromingsreeks pas vanaf de Vroege Middeleeuwen relevant. In de Liemers en het Gelderse Poort gebied is de reeks de hele 8000 jaar relevant.
- In delen van de delta die in de loop der tijd 'tevens' van tijd tot tijd door de rivier de Maas overstroomd zijn, is een op de het sedimentaire archief van de Rijn gebaseerde reeks vanzelfsprekend niet absoluut geldig. De rivier de Maas zal in deze gebieden voor extra overstromingsevents hebben gezorgd, en de reeks is er dus onvolledig.
- Maas en Rijn overstromingen bereiken lang niet altijd tegelijk een even extreme hoogwaterstand (per winterjaar bekeken). De twee rivieren hebben bovendien door de verschillen in grootte van achterland en condities die de allerhoogste afvoeren genereren, in het extreme domein niet noodzakelijkerwijs dezelfde herhalingsstatistiek. Voor de Maas zou eerst apart een overstromingsgeschiedenis moeten worden opgesteld, voordat aan gecombineerd reeksgebruik in het zuidelijke 'Maas'-gedeelte van het Rivierengebied gedacht kan worden.³⁴

³⁴ Inmiddels zijn op de VU Amsterdam (Dr. M. Prins, Dr. C. Kasse, Prof. Dr. R.T. van Balen) initiatieven ontplooid voor op overstromingen gericht korrelgrootteonderzoek op restgeulvullingen uit het Midden en Noord-Limburgse Maasdal. Een eerste boorkern te Well-Aijen is in Januari 2016 i.s.m. Universiteit Utrecht (Dr. K.M. Cohen) verworven en naar verwachting begint in 2016 een promovendus.

6.1.3 Archeologische toepassing

De tijdreeks opent twee grote nieuwe toepassingsmogelijkheden voor fysisch-geografisch en archeologisch onderzoek naar landschapsontwikkeling en -gebruik. In het rapport is dit op onderdelen wat uitgewerkt, om archeologische toepassingspotentie van de inzichten in overstromingsvariatie te verduidelijken, en om gekoppeld geologisch-archeologisch toegepast onderzoek te entameren. De volgende gebruikstoepassingen zijn verkend:

- Overstromingslagen in archeologische opgravingen specifiek te kunnen aanwijzen en dateren, zowel in de prehistorie als in historisch-gedekte archeologische tijdvakken. Dit kan worden toegepast bij het onderling correleren van niveaus in deelopgravingen in specifieke nederzettingsgebied langs een rivier. Op lokaal niveau kan de tijdreeks 'event-stratigrafisch' benut worden. Dit is als voorbeelden (§4.3) beknopt uitgewerkt voor Romeinse castella contexten, en voor 14^e eeuwse Doesburg in een Middeleeuwse stadsarcheologische context.
- Onderzoeken naar de rol van gekende extreme overstromingen hebben in het zich voltrekken van rivierverleggingen, zowel lokaal (bochtafsnijding) als regionaal (avulsie). Voor het optreden van rivierverleggingen kan daarbij worden afgewogen of het verleggingspatroon vooral de toegenomen sedimentlast weerspiegelt (Erkens, 2009; Stouthamer *et al.*, 2011) of dat er ook toegenomen overstromingsintensiteit verondersteld moet worden een rol te hebben gehad. Voor wat betreft de timing van de rivierverlegging, zijn aangemerkte extreme overstromingen als doorslaggevende momenten in het ontstaan van de nieuwe rivieren te beschouwen.
- Er is geen claim dat iedere piekafvoer van zekere grootte, wel ergens in de delta tenminste een avulsie zou moeten veroorzaken. Of een avulsie optreedt, is ook van andere omstandigheden afhankelijk, zoals de toestand van oeversedimentatie langs de rivier (korter en langer na vorige avulsies) en de doorstroombaarheid van komgebied benedenstrooms langs de paden van crevassegeulen (H3). Die maken dat in bepaalde perioden piekafvoeren met geringe herhalingsstijden³⁵ avulsies hebben helpen voltrekken (in Bronstijd en IJzertijd), en dat in latere perioden (bijvoorbeeld Vroege Middeleeuwen) een serie van vijf grotere tussen overstromingen (270-900 AD) niet 1:1 aan de avulsies van vijf Rijn-takken zijn te knopen, maar dat ze allemaal op de fasering van alle vijf de takken invloed hebben gehad (H4; zie onder).
- Er zijn op *case-by-case* basis mogelijkheden tot beter begrip en nauwkeuriger vaststelling van de timing van het verloop van grote rivierverleggingen en daaraan gerelateerde grote veranderingen in het rivierengebied. Voor de avulsies in de jongste 2500 jaar is dit in enig detail uitgewerkt (tabel 2, p. 50). Het betreft dan het ontstaan van de huidige grote rivieren en het verlaten raken van de Utrechtse Rijn. In de periode 250 tot 900 na Chr. (Laat Romeins en Vroege M.E.), was het mogelijk de TPQ-dateringen op avulsielocaties te correleren aan handvol extreme overstromingen die in deze periode optrad. In de periode 500 v. Chr. tot 250 na Chr. was dit niet mogelijk. Hieruit concluderen we dat het vooral de toegenomen sedimentlast is geweest, die de genoemde golf van rivierverleggingen heeft doen beginnen, en dat de toegenomen overstromingsintensiteit in het eerste millennium na Chr. vooral het zich voltrekken van omslagen heeft bespoedigd. Het laatste is gunstig (katalyserend) voor het kunnen vaststellen van de exacte timing van het slagen van deze avulsies, maar niet zondermeer de oorzaak voor het optreden van de verleggingsgolf.

³⁵ Dit geldt in ieder geval voor herhalingsstatistiek die wordt berekend over de volledige 8000-jarige tijdreeks. Worden herhalingsstijden voor deelperioden herberekend, dan zou het verband tussen relatieve piekafvoergrootte en avulsieslagen wat sterker kunnen worden. Variantie door het gefaseerd verlopen van het proces zal dan over blijven.

6.2 Aanbevelingen

De in dit rapport gepresenteerde overstromingsgeschiedenis is een vers resultaat. De aanpak was die van het compileren van één masterrecord uit deelreeksen met gedeeltelijke temporele overlap. De methodes daartoe dragen met zich mee, dat als er nieuwe gegevens kunnen worden ingenomen en betrokken, de kwaliteit van de tot dan bestaande compilatie getoetst wordt, en de resultaten verder zullen verfijnen. Het willen verbeteren van de tijdreeks kan met het 'willen levend houden' en 'verder willen opkweken' van de gegevens-set in bijlage A gelijk gesteld worden. De aanbevelingen hieronder beperken zich tot de tijdreeks van de Rijn. Nieuwe tijdreeksen voor bijvoorbeeld de zee-inbraken en de Maas zijn natuurlijk wenselijk, maar vallen buiten de scope van dit rapport.

6.2.1 Toetsen en verbeteren van de nieuwe inzichten

Het overstromingsarchief voor de Rijn, en dan vooral de betrouwbaarheid van de grootte van de extreme events en de nauwkeurigheid van de datering per event, kunnen op een aantal manieren verder verfijnd worden:

- Door overstromingsafzettingen zoals herkend op archeologische sites te betrekken in de inperking van datering van de zeldzaam-grote events.
- Door meer boorkernen uit restgeulvullingen op korrelgrootte te analyseren, de resultaten op te werken volgens de methoden van Toonen (2013) / H3 en Bijlagen A-D, en zo de datareeks te verdichten.
- Door de dateringen van overstromingen met de dateringen van rivierverleggingen (avulsies) in combinatie te analyseren. De avulsiegeschiedenis van de delta, en daarmee de bewoningsgeschiedenis, kan dan in hoger detail worden begrepen dan nu het geval is (Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen *et al.*, 2012). Op deze wijze kan over hinderlijke limieten van het individueel moeten beschouwen van iedere ¹⁴C-datering langs iedere tak (zoals tot nu toe de benadering was) heen gestapt worden. Tabel 2 geeft hiertoe een aanzet.
- Door de tijdreeks aan overstromingen met dendrochronologische gegevensreeksen te combineren en te onderzoeken waar paleohydrologische signalen overeenkomen en als dezelfde beschouwd zouden moeten worden.
- Door de tijdreeks van overstromingen met archeologische dateringen te combineren en te onderzoeken waar archeologische veranderingssignalen met paleohydrologische signalen overeenkomen.

6.2.2 Verder vergroten resolutie overstromingsgeschiedenis

Doelen die in onderzoek ter verbetering van de tijdreeks gesteld kunnen worden zijn

- Het elimineren van periodes met hiaten in registratie (6900-7300 jaar geleden).
- Het elimineren van periodes met enkelvoudige registratie (voor 6500 jaar)
- Verlaging van de waarnemingsdrempel volgens figuur 10. Dit zou met name voor perioden die voor culturele en klimatologische dynamiek interessant zijn moeten gebeuren, te beginnen met de IJzertijd en Romeinse tijd (idealiter: 1000 v. Chr tot 400 na Chr.; §4.1). Potentiële locaties hiervoor zijn te vinden langs de Nederrijn (Roswaard; Loo), in de Ooijpolder (Persingen/Ubbergen), in aangrenzend Duitsland (Kleverham; Flurener Schlinge).
- Verbetering van de datering van de grootste overstromingen op meerdere locaties, door (i) calibratie van de ouderdommen 'in serie' met Bayesiaanse technieken en (ii) daarbij betrekken van dateringen uit zowel archeologische als geologisch-geomorfologische contexten (§4.3).

- Verbetering van de ouderdom-dieptemodellen per locatie, waaruit de dateringen van de kleinere overstromingen volgen (§4.3). Dit kan door (i) bovengenoemde bayesiaanse calibraties van de grootste events mee te nemen en (ii) door op basis van sedimentaire informatie niet-lineair te interpoleren en het stepped-linear model te vervangen (naar voorbeeld Minderhoud *et al.*, 2016 / Bijlage D).
- Inbrengen van overstromingslagen uit archeologische context als markers en waterstanden definiërende informatie in numerieke modellering van (pre)historische overstromingen.
- Toe te werken naar verspreidingskaarten die voor prehistorische overstromingen weergeven tot waar gebied onderwater stond, idealiter niet alleen voor de allergrootste events, maar per tijdsperiode ook voor overstromingen met 1/25 en 1/100 jaarlijkse kans van optreden. Dit lijkt een goede manier om de kennis over overstromingen verder voor archeologisch gebruik te concretiseren, bijvoorbeeld voor stadsarcheologie langs de rivieren.
- Te onderzoeken vanaf welke locatie in benedenstroomse richting stormvloed met rivieroverstromingen gaan interfereren.

6.2.3 Toevoegen geulvullingslocaties uit IJzertijd en Romeinse tijd

De inzichten in overstromingsdynamiek zijn op dit moment aanmerkelijk beter ontwikkeld voor de Laat Romeinse tijd, Middeleeuwen en Nieuwe Tijd, dan voor de IJzertijd en Vroeg en Midden Romeinse tijd. De huidige reconstructie (figuur 10) toont geen extreme overstromingen in dit tijdvak. Dit is mogelijk deels aan de samenstelling van de tijdreeks te wijten: de IJzertijd en het begin van de Romeinse tijd worden in de tot nu toe onderzochte serie restgeulvullingen alleen door locaties op relatief grote afstand van de actieve rivier gedekt. De drempelwaarde voor registratie is op die locaties hoog. Er is daarmee sterke indicatie dat er geen extreme overstromingen waren, maar die is gebaseerd op 'afwezigheid van positieve indicaties voor het tegendeel'. Verder geven de onderzochte locaties geen goed inzicht in welke fluctuaties in de intensiteit van normale overstromingen er in de IJzertijd en het eerste deel van de Romeinse tijd dan wel waren. De conclusies over het relatief milde overstromingsregiem in de aanloop naar de Romeinse tijd, kunnen sterker gemaakt worden door de reeks in deze periode te verrijken met de gegevens van een geulvulling op kortere afstand tot de rivier (lagere drempelwaarde).

Daarmee zou niet alleen de datering van nu reeds bekende overstromingsevents in deze periode verbeteren, maar zou de reeks ook informatie kunnen geven over matig grote overstromingen. Idealiter zou de restgeulvulling de periode van 1000 v. Chr. tot 250 na Chr. moeten omspannen. In de sedimentaire informatie van die geulvulling kan dan vermoedelijk ook het toenemen van de sedimentlast worden onderzocht (de timing en geleidelijkheid daarvan) en de invloed daarvan in de registratie van overstromingen (als onderdeel van de analysestappen in §3.2.3 en §3.2.4). Dan zouden ook de relatieve magnitudes van overstromingen uit deze periode ten opzichte van de huidige versie nog wat kunnen worden bijgesteld. Het is niet uitgesloten dat het vergroten van de dekking in deze periode simpelweg bevestigt dat er vooral matig grote overstromingen optraden, en dat de extremen uit de IJzertijd minder extreem waren dan die in de Vroege Middeleeuwen.

6.2.4 Combinerend verder inperken dateringonzekerheid van extreme events

Bij de specificatie van de onzekerheid rondom de herhalingstijden, is in H3 en de presentatie van figuur 10 en tabel 1 een conservatieve aanpak gevolgd en de nadruk op grote spreiding in uitkomsten voor herhalingstijden bij gebruik van Methode 1 en Methode 2 op site-by-site basis (figuur 8; §3.2.4). Voor delen van de tijdserie met meervoudige registratie (en dus onderlinge reproductie) zou ook bij het specificeren van de onzekerheid rondom de herhalingstijd overgegaan kunnen worden tot gecombineerde ouderdomsmodellering, zodat de spreiding afneemt bij gelijkstellen van de ouderdommen van de allergrootste events en bayesiaanse calibratie op de geïntegreerde dateringen van meerdere locaties. De gepresenteerde dateringen zouden langs verschillende wegen verder aangescherpt kunnen worden.

De eerste weg om dit te bereiken zou zijn door meer ¹⁴C-dateringen op beschikbaar kernmateriaal uit te voeren, gericht rondom de geïdentificeerde grootste events. Dit is de meest conservatieve en onafhankelijke weg om de dateringen te verbeteren. Dit is alleen een heilzame weg als zulk dateringsmateriaal ook daadwerkelijk voorhanden is, en dat is lang niet altijd het geval in de proximale settings (zie ook Minderhoud *et al.*, 2016 / Bijlage D).

Als een tweede weg (parallel aan de eerste) zouden de dateringen ook nog verder aangescherpt kunnen worden door ook dateringen te betrekken van overeenkomende overstromingsevents op archeologische sites en *terminus post quem* dateringen voor het ontstaan van nieuwe riviertakken die aan de overstromingen worden toegeschreven – volgens de redeneringslijnen zoals uitgewerkt in §5.2.3. Dit is een meer opportunistische weg, die op het willen toepassen van kennis over de timing van overstromingen op landschap- en bewoningsvraagstukken aansluit (§4.2). Die opportunistische aanpak levert in dit stadium vooral ook concreet aangescherpte hypothesen over de timing van overstromingen. Deze hypothesen kunnen getest worden met de conservatieve aanpak van simpelweg meer dateringen rondom specifieke laagjes ‘uit de oorspronkelijke kernen’ of van nieuwe, *grosso modo* even-oude geulvullingslocaties.

6.3 Dankwoord

Aan het rapport is gewerkt tussen November 2013 en Februari 2016, geheel in stijl met het onderwerp met piekperioden in Jan/Feb 2014, zomer 2014, Jan/Feb 2015 en Jan/Feb 2016.

De auteurs danken de volgende personen voor hun betrokkenheid bij het project, reacties op conceptstukken en bespreking van veldobservaties: Stijn Arnoldussen, Hanneke Bos, Renée de Bruijn, Frans Bunnik, Marieke van Dinter, Timme Donders, Gilles Erkens, Marjolein Gouw-Bouwman, Eckhart Heunks, Esther Jansma, Rowin van Lanen, Bas van der Meulen, Hans Middelkoop, Jan Peeters, Harm-Jan Pierik, Maarten Prins, Rien Polak, Cees van Rooijen, Tim Schuring, Ad van der Spek, Esther Stouthamer, Leo Tebbens, Jan Verhagen, Ellen Vreenegoor, Nico Willemse.

Het rapport maakt deel uit van het programma “Visie Erfgoed en Ruimte”, deelprogramma “Eigenheid en Veiligheid” van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap.

K.M. Cohen	k.m.cohen@uu.nl; kim.cohen@deltares.nl
W.H.J. Toonen	wh1@aber.ac.uk
H.J.T. Weerts	h.weerts@cultureelerfgoed.nl

7 Referentielijst

- Amkreutz, L.W.S.W., 2013. Persistent traditions: a long-term perspective on communities in the process of Neolithisation in the Lower Rhine Area (5500-2500 cal BC). Sidestone Press, Leiden, 545 pp.
- Arnoldussen, S., 2008. A living landscape: Bronze Age settlement sites in the Dutch river area (c. 2000-800 BC). Sidestone Press, Leiden, 535 pp.
- Asselman, N. E., Middelkoop, H., Van Dijk, P. M. (2003). The impact of changes in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine. *Hydrological Processes* 17, 3225-3244.
- Baker, V.R., 1994. Geomorphological understanding of floods. *Geomorphology* 10, p 139-156.
- Bazelmans, J., Bakels, C., Kocken, M., 2004. De Romeinse wachtpost op de Goudsberg. Een verslag van de opgraving Valkenburg aan de Geul 2002. *Historische en Heemkundige Studies in en rond het geuldal (Jaarboek 2004)*, p. 61-86.
- Berendsen, H.J.A., 1982. De genese van het landschap in het zuiden van de provincie Utrecht: een fysisch-geografische studie. *Utrechtse Geografische Studies* 25.
- Berendsen, H.J.A., Hoek, W.Z., Schorn, E., 1995. Late Weichselian and Holocene River channel changes of the River Rhine and Meuse in the Netherlands (Land van Maas en Waal). In: B. Frenzel (Ed.), *European River Activity and Climate Change During the Lateglacial and Early Holocene*, ESF Project European Paläoklimaforschung/Paleoclimate Research 14, pp. 151–171.
- Berendsen, H.J.A., Stouthamer, E., 2000. Late Weichselian and Holocene palaeogeography of the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology* 161, p 311-355.
- Berendsen, H.J.A., Stouthamer, E., 2001. *Palaeogeographic development of the Rhine-Meuse delta, The Netherlands*. Van Gorcum, Assen, 270 pp.
- Blom, E., Vos, W.K., 2008. De opgravingen 2002- 2004 in het Romeinse Castellum Laurium, de vicus en van het schip de 'Woerden 7', ADC Rapport 910/ADC Monografie 2, Amersfoort.
- Bogaers, J.E., 1971. *Germania Inferior, Gallia Belgica en de civitates van de Frisiavones en de Tungri*. *Helinium: revue consacrée à l'archéologie des Pays-Bas, de la Belgique et du Grand-Duché de Luxembourg*, vol. 11, (1971), pp. 228-237.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, R., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I., Bonani, G., 1997. A pervasive millennial-scale cycle in the North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science* 294, p 2130-2136.
- Brázdil, R., Kundzewicz, Z.W., Benito, G., Demarée, G., Macdonald, N., Roald, L.A., 2012. Historical floods in Europe in the past millennium. In: Z.W. Kundzewicz (Ed.), *Changes in Flood Risk in Europe*, IAHS Special Publication 10, pp. 121–166
- Bronk Ramsey, C., 2009. Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon* 51, p 337-360.
- Brouwer, M.E., 2011. *Modeling Mesolithic hunter-gatherer land use and post-glacial landscape dynamics in the central Netherlands*. Dissertation Michigan State University, 536 pp.
- Brulet, R., 1990. La Gaule septentrionale au Bas-Empire (Nordgallien in der Spät-antike. Occupation du sol e défense du territoire dans l'arrière-pays du Limes aux IVe et Ve siècles. *Trierer Zeitschrift, Beiheft* 11, 431 p..
- Brulet, R., Léva, C., Mertens, J., Plumier, J., Thollard, P., 1995. Forts romains de la route Bavay-Tongres le dispositif militaire du Bas-Empire. Guide publié a l'occasion du 16th International Vongress of Roman Frontier Studies, Rolduc, The Netherlands, August 1995. *Collection d'archéologie Joseph Mertens* 11, Louvain-La-Neuve, 67 p.
- Buisman, J., 1996. Duizend jaar weer, wind en water in de Lage Landen, Deel 2 1300-1450 AD. Van Wijnen, Franeker, 690 pp.

- Buisman, J., 2000. Duizend jaar weer, wind en water in de Lage Landen, Deel 4 1575-1675 AD. Van Wijnen, Franeker, 767 pp.
- Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J.O., Herzig, F., Heussner, K.U., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J., 2011. 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science* 331, p 578-582.
- Büntgen, U., Tegel, W., 2011. European tree-ring data and the Medieval Climate Anomaly. *Pages news* 19, p 14-15.
- Büntgen, U., Myglan, V.S., Ljungqvist, F.C., McCormick, M., Di Cosmo, N., Sigl, M., Jungclaus, J., Wagner, S., Krusic, P.J., Esper, J., Kaplan, J.O., 2016. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience*. doi:10.1038/ngeo2652
- Chhab, E.H. 1996. How extreme were the 1995 flood waves on the Rivers Rhine and Meuse? *Phys. Chem. Earth* 20, p. 455–458.
- 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, 216 pp.
- Cohen, K.M., Lodder, Q.J., 2007. 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 overstromings-magnitudes en -frequenties. Lelystad: RIZA. RIZA rapport 2007.016.
- Cohen, K.M., Stouthamer, E., Hoek, W.Z., Berendsen, H.J.A., Kempen, H.F.J., 2009. Zand in Banen - Zanddiepte kaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel. Arnhem: Provincie Gelderland.
- Cohen, K.M., Stouthamer, E., Pierik, H.J., Geurts, A.H., 2012. Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas delta. Universiteit Utrecht. <http://dx.doi.org/10.17026/dans-x7g-sjtw>
- Cohen, K.M., Stouthamer, E., 2012. Vernieuwd digitaal basisbestand paleogeografie van de Rijn-Maas Delta. Beknopte toelichting bij het Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta. Universiteit Utrecht, Dept. Fysische Geografie.
- Cohen, K.M., Arnoldussen, S., Erkens, G., van Popta, Y.T., Taal, L.J., 2014a. Archeologische verwachtingskaart uiterwaarden rivierengebied. Utrecht: Deltares, i.s.m. Universiteit Utrecht en Rijksuniversiteit Groningen. Deltares Rapport 1207078. <http://easy.dans.knaw.nl>; <http://dx.doi.org/10.17026/dans-zbt-xcck>.
- Cohen, K.M., Toonen, W.H.J., Weerts, H.J.T., 2014b. Rivierarcheologie en zeldzaam-grote overstromingen. *Lezing Reuwendagen 2014*, Den Haag.
- Crombé, P., Sergant, J., Robinson, E., De Reu, J., 2011. Hunter-gatherer responses to environmental change during the Pleistocene-Holocene transition in the southern North Sea basin : Final Palaeolithic-Final Mesolithic land use in northwest Belgium. *Journal of Anthropological Archaeology*, doi:10.1016/j.jaa.2011.01.001.
- Davis, B.A.S., Brewer, S., Stevenson, A.C., Guiot, J., Data Contributors, 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews* 22, p 1701-1716.
- De Kort, J.W., Raczynski-Henk, Y. 2014. The Fossa Corbulonis between the Rhine and Meuse estuaries in the Western Netherlands. *Water History* 6, 51-71.
- Departement van Waterstaat, 1926. Verslag van het voorgevallen tijdens het hoge oppervlaktewater op de Nederlandsche rivieren in den winter van 1925 op 1926. 's-Gravenhage, 1926. 46 pp. + kaartbijlagen.
- Disse, M., Engel, H., 2001. Flood events in the Rhine basin: genesis, influences and mitigation. *Natural Hazards* 23, p 271-290.
- Dikau, R., Herget, J., Hennrich, K., 2005. Land Use and Climate Impacts on Fluvial Systems during the Period of Agriculture in the River Rhine Catchment (Rhinelucifs) – An introduction. *Erdkunde* 59, p. 177-183.
- Driessen, A.M.A.J., 1994. Watersnood tussen Maas en Waal. Walburg Pers, Zutphen, 333 pp.

- Erkens, G., 2009. Sediment dynamics in the Rhine catchment: quantification of fluvial response to climate change and human impact. *Netherlands Geographical Studies* 388, 278 pp.
- Erkens, G., Dambeck, R., Volleberg, K.P., Bouman, M.T., Bos, J.A., Cohen, K.M., Wallinga, J. and Hoek, W.Z., 2009. Fluvial terrace formation in the northern Upper Rhine Graben during the last 20000 years as a result of allogenic controls and autogenic evolution. *Geomorphology* 103, p.476-495.
- Erkens, G., Hoffmann, T., Gerlach, R., Klostermann, J., 2011. Complex fluvial response to Lateglacial and Holocene allogenic forcing in the Lower Rhine Valley (Germany). *Quaternary Science Reviews* 30, p 611-627.
- Fermin, B., Groothedde, M., 2008. Doesburg Diachroon bewoningsgeschiedenis in de Korte Koepoortstraat te Doesburg van prehistorie tot heden. *Doesburgse Archeologische Publicaties* 3. Gemeente Doesburg, Gemeente Zutphen.
- Fermin, B., Van Straten, K., 2009 *De Agrarii Milites van Beinum*. Doesburgse Archeologische Publicaties 6. Gem. Doesburg. 157 pp.
- Gaspar, R.J.G.A.A., 2011. *De Stadsrekeningen van Doesburg, eerste reeks*. Streekarchivariaat De Liemers en Doesburg.
http://www.liemersverleden.nl/sald/doesburg_stadsrekeningen.htm [26 september 2013]
- Glaser, R., Stangl, H., 2003. Historical floods in the Dutch Rhine delta. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, p 605-613.
- Glaser, R., Riemann, D., Schönbein, J., Barriendos, M., Brázdil, R., Bertolin, C., Camuffo, D., Deutsch, M., Dobrovolný, P., van Engeln, A., Enzi, S., Halicková, M., Koenig, S.J., Kotyza, O., Limanówka, D., Macková, J., Sghedoni, M., Martin, B., Himmelsbach, I. 2010. The variability of European floods since AD 1500. *Climatic Change* 101, p 235–256.
- Gouw, M.J.P., Erkens, G., 2007. Architecture of the Holocene Rhine-Meuse delta (the Netherlands)—A result of changing external controls. *Netherlands Journal of Geosciences-Geologie en Mijnbouw* 86.
- Gouw, M.J., 2008. Alluvial architecture of the Holocene Rhine–Meuse delta (the Netherlands). *Sedimentology* 55, p. 1487-1516.
- Gottschalk, M.K.E., 1971. *Stormvloed en rivieroverstromingen in Nederland. Deel I: De periode voor 1400*. Van Gorcum: Assen.
- Groenhuijzen, M.R., Verhagen, P., 2015. Exploring the dynamics of transport in the Dutch limes. In: Bebermeier, W., Knitter, D., Nakoinz, O., Eds. (2015) *Bridging the Gap – Integrated Approaches in Landscape Archaeology*. eTopoi Spec. Vol. 4, p 25–47.
- Groothedde, M., 2010. De ‘nieuwe’ IJssel. Wat vertellen de geschreven bronnen en archeologische vondsten? *Bijdragen en Mededelingen Vereniging Gelre. Historisch Jaarboek voor Gelderland. Deel CI*, 7-26
- Groothedde, M., 2013. Een vorstelijke palts te Zutphen?: macht en prestige op en rond het plein's-Gravenhof van de Karolingische tijd tot aan de stadsrechtverlening. *Medieval Archaeology*, Faculty of Archaeology, Leiden University.
- Guiran, A.J. 1997 Geologische waarnemingen in het tracé van de Willemsspoortunnel en de bewoningsgeschiedenis van Rotterdam. In: A. Carmiggelt, A.J. Guiran en M.C. van Trierum (red.), *BOORbalans 3: Archeologisch onderzoek in het tracé van de Willemsspoortunnel te Rotterdam*.
- Haans, F., 2008. Historische ontwikkeling van Doesburg. In: Haans, F. (red.) *Monumentengids Doesburg. Monumenten in Gelderland 7. Gelders Genootschap / Matrijs*. p. 22-85
- Harenberg, E., 2008. Archeologie in Doesburg. In: Haans, F. (red.) *Monumentengids Doesburg. Monumenten in Gelderland 7. Gelders Genootschap / Matrijs*. p. 86-95.
- Henderikx, P.A., 1988 Waterbeheersing en afwatering in de Alblasserwaard tot de invoering van de bemaling in de vijftiende eeuw. *BMGN-Low Countries Historical Review* 103, p. 554-570.
- Herget, J., Meurs, H., 2010. Reconstructing peak discharge for historic flood levels in the city of Cologne, Germany. *Global and Planetary Change* 70, p 108-116.

- Herget, J., Kapala, A., Krell, M., Rustemeier, E., Simmer, C., Wyss, A., 2015. The millennium flood of July 1342 revisited. *Catena* 130, p. 82-94.
- Hessing, W.A.M., 1994: Wijk bij Duurstede-De Horden, in: van Es, W.A., Hessing, W.A.M. (eds.), Romeinen, Friezen en Franken in het hart van Nederland: van Traiectum tot Dorestad (50 v.Chr.-900 n.Chr.), Utrecht, 226-30.
- Hesselink, A.W., 2002. History makes a river; morphological changes and human interference in the river Rhine, The Netherlands. *Netherlands Geographical Studies* 292, 177 pp.
- Hijma, M.P., 2009. From River Valley to Estuary: The Early-Mid Holocene Transgression of the Rhine–Meuse valley, The Netherlands. The Royal Dutch Geographical Society/Faculty of Geographical Sciences, *Nederlandse Geografische Studies* 389, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 192 pp.
- Hijma, M.P., Cohen, K.M., Hoffmann, G., Van der Spek, A.J.F., Stouthamer, E., 2009. From river valley to estuary: the evolution of the Rhine mouth in the early to middle Holocene (western Netherlands, Rhine–Meuse delta). *Netherlands Journal of Geosciences-Geologie en Mijnbouw* 88, 13–53.
- Hijma, M.P., Cohen, K.M., 2011. Holocene transgression of the Rhine river mouth area, The Netherlands/Southern North Sea: palaeogeography and sequence stratigraphy. *Sedimentology* 58, p. 1453-1485.
- Hobo, N., 2015. The sedimentary dynamics in natural and human-influenced delta channel belts. *Utrecht Studies in Earth Sciences* 97, 196 pp.
- Hoffmann, T., Erkens, G., Cohen, K.M., Houben, P., Seidel, J., Dikau, R., 2007. Holocene floodplain sediment storage and hillslope erosion within the Rhine catchment. *The Holocene* 17, 105-118.
- Hoffmann, T., Erkens, G., Gerlach, R., Klostermann, J., Lang, A., 2009. Trends and controls of Holocene floodplain sedimentation in the Rhine catchment. *Catena* 77, p 96-106.
- Hulst, R.S., 2001, The Castellum at Arnhem-Meinerswijk: the Remains of Period 5. *Berichten van de Rijksdienst voor het Oudheidkundig Bodemonderzoek* 44, 397-438.
- Isarin, R., Rensink, E., Ellenkamp R., Heunks, E., 2015: Archeologische Verwachtingskaart Maasdal tussen Mook en Eijsden. Rijksdienst Cultureel Erfgoed. <http://easy.dans.knaw.nl>; <http://dx.doi.org/10.17026/dans-xbe-977w>
- Jacobeit, J., Glaser, R., Luterbacher, J., Wanner, H., 2003. Links between flood events in central Europe since AD 1500 and large-scale atmospheric circulation modes. *Geophysical Research Letters* 30, 1172.
- Jansma, E., van Lanen, R.J., Sturgeon, K., Mohlke, S., Brewer, P.W., 2012. TRiDaBASE: A stand-alone database for storage, analysis and exchange of dendrochronological metadata. *Dendrochronologia* 30, 209-211.
- Janssens, M.M., Kasse, C., Bohncke, S.J.P., Greaves, H., Cohen, K.M., Wallinga, J., Hoek, W.Z., 2012. Climate-driven fluvial development and valley abandonment at the last glacial-interglacial transition (Oude IJssel-Rhine, Germany). *Neth. Journal of Geosciences* 91, 37-62.
- Jelgersma, S., 1961. Holocene sea-level changes in The Netherlands. *Mededelingen Geologische Stichting* 7, 101 pp.
- Jochim, M.A., 2002. The Mesolithic. In: *European Prehistory: a survey* (eds. Milisauskas, S.). Springer, New York, p 115-142.
- Kale, V.S., 2007. Geomorphic effectiveness of extraordinary floods on three large rivers of the Indian Peninsula. *Geomorphology* 85, p 306-316.
- Kalis, A.J., Merkt, J., Wunderlich, J., 2003. Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe – human impact and natural causes. *Quaternary Science Reviews* 22, p 33-79.
- Kleinhaus, M.G., Jagers, H.R.A., Mosselman, E., Sloff, C.J., 2008. Bifurcation dynamics and avulsion duration in meandering rivers by one-dimensional and three-dimensional models. *Water resources research* 44, W08454

- Kleinhans, M.G., Cohen, K.M., Hoekstra, J., Ijmker, J.M., 2012. Evolution of a bifurcation in a meandering river with adjustable channel widths, Rhine delta apex, The Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 36, 2011-2027.
- Kleinhans, M.G., Klijn, F., Cohen, K.M., Middelkoop, H., 2013a. Wat wil de rivier zelf eigenlijk? Universiteit Utrecht & Deltares. Deltares rapport 1207829, 50 pp.
- Kleinhans, M.G., Ferguson, R.I., Lane, S.N., Hardy, R.J., 2013b. Splitting rivers at their seams: bifurcations and avulsion. *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 47–61.
- Konert, M., Vandenberghe, J., 1997. Comparison of laser grain analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the under-estimation of the clay fraction. *Sedimentology* 44, p 523-535.
- Kosian, M., Weerts, H.J.T., Van Lanen, R., Abrahamse, J.E., 2013. The City and the River. The early medieval Emporium (trade centre) of Dorestad; integrating physical geography with archaeological data in changing environments. Proceedings of the 17th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2012 (online publication <http://www.chnt.at/proceedings-chnt-17>)
- Kulikowski, M., 2000. Barbarians in Gaul, usurpers in Britain. *Britannia* 31, p 325-345.
- Lanen, R.J., Kosian, M.C., Groenewoudt, B.J., Jansma, E., 2015a. Best travel options: Modelling Roman and early-medieval routes in the Netherlands using a multi-proxy approach. *Journal of Archeological Science: Reports* 3, 144-159.
- Lanen, R.J., Kosian, M.C., Groenewoudt, B.J., Jansma, E., 2015b. Finding a Way: Modeling Landscape Prerequisites for Roman and Early-Medieval Routes in the Netherlands. *Geoarchaeology* 30, 200-222.
- Luksen-IJtsma, A., 2010. De limesweg in West-Nederland. Inventarisatie, analyse en synthese van archeologisch onderzoek naar de Romeinse weg tussen Vechten en Katwijk. Basisrapportage Archeologie 40. Gemeente Utrecht.
- Louwe Kooijmans, L.P., 1974. The Rhine/Meuse delta: four studies on its prehistoric occupation and Holocene geology.
- Louwe Kooijmans, L.P., Van den Broeke, P.W., Fokkens, H., Van Gijn, A., 2005. Nederland in de prehistorie. Bert Bakker Amsterdam, 840 pp.
- Makaske, B., 1998. Anastomosing rivers: Forms, processes and sediments. *Netherlands Geographical Studies* 249, 287 pp.
- Makaske, B., Maas, G.J., van Smeerdijk, D.G., 2008. The age and origin of the Gelderse IJssel. *Netherlands Journal of Geosciences* 87, 323-337.
- McDermott, F., Matthey, D.P., Hawkesworth, C., 2001. Centennial-scale Holocene climate variability revealed by a high-resolution speleothem $\delta^{18}O$ record from SW Ireland. *Science* 294, 1328-1331.
- Middelkoop, H. 1997, Embankend floodplains in the Netherlands: Geomorphological evolution over various time scales. *Netherlands Geographical Studies* 224, 342 pp.
- Minderhoud, P.S.J., Cohen, K.M., Toonen, W.H.J., Erkens, G., Hoek, W.Z., 2013. Oxbow channel fill sedimentology as a tool for age-depth modelling and reconstruction of palaeogeography and fluvial dynamics (Lower Rhine, Rheinberg, Germany). In: Toonen, W.H.J., 2013, *Utrecht Studies in Earth Sciences* 41, 69-97.
- Minderhoud, P.S.J., Cohen, K.M., Toonen, W.H.J., Erkens, G., Hoek, W.Z., 2016. Improving age-depth models of fluvio-lacustrine deposits using sedimentary proxies for accumulation rates. *Quaternary Geochronology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quageo.2016.01.001>
- Mulder-Noordermeer, E.-S., 2008. Lessen uit het verleden: Reconstructie van de hydraulische karakteristieken van het hoogwater in 1926. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Waterdienst. Rapport Doctoraalopdracht Universiteit Twente, Studie Civiele Techniek, Afdeling Waterbeheer. 112 pp.
- Nanson, G.C., 1986. Episodes of vertical accretion and catastrophic stripping: a model of disequilibrium flood-plain development. *Geological Society of America Bulletin* 97, 1467-1475.
- Nokkert, M., Aarts, A.C., Wynia, A.L. (Eds.) 2009. Vroegmiddeleeuwse bewoning langs de A2. Basisrapportage Archeologie 26. Gemeente Utrecht. 169 pp.

- Peeters, J.H.M., Brinkhuizen, D.C., Cohen, K.M., Kooistra, L.I., Lubiak-Martens, L., Moree, J.M., Niekus, M.J.L.Th., Schiltmans, D.E.A., Verbaas, A., Verbruggen, F., Vos, P.C., Zeiler, J.T., 2014. Synthese. In: Moree, J.M., Sier M.M. (Eds.), *Twintig meter diep! Mesolithicum in de Yangtzehaven-Maasvlakte te Rotterdam. Landschapsonwikkeling en bewoning in het Vroeg Holoceen*(pp. 289-322). Rotterdam: BOOR Gemeente Rotterdam.
- Polak, M., R.P.J. Kloosterma, R.A.J Niemeijer, 2004. *Alphen aan den Rijn - Albaniana 2001-2002: opgravingen tussen de Castellumstraat, het Omloopkanaal en de Oude Rijn. Libelli Noviomagenses 7*. Radboud Universiteit Nijmegen, Provinciaal-Romeinse Archeologie, Nijmegen.
- Oost, A.P., 1995. *Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian inlet: a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins*. Faculteit Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht.
- Ozinga, L.R.P., (Ed.). 1989. *Het Romeinse castellum te Utrecht: de opgravingen in 1936, 1938, 1943-44 en 1949*. *Studies in Prae- en Protohistorie 3*, Broese Kemink, Utrecht. 191 pp.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hafliadason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M., van der Plicht, J., 2013. *IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP*. *Radiocarbon 55*, p. 1869–1887.
- RWS Waterbase, 2012. Ministry of Infrastructure and the Environment – Rijkswaterstaat. <http://live.waterbase.nl> Accessed in January 2013, March 2015.
- Sass-Klaassen, U., Hanraets, E., 2006. *Woodlands of the past-The excavation of wetland woods at Zwolle-Stadshagen (the Netherlands): Growth pattern and population dynamics of oak and ash*. *Netherlands Journal of Geosciences-Geologie en Mijnbouw 85*, 61-xx.
- Schillereff, D.N., Chiverrell, R.C., Macdonald, N., Hooke, J.M., 2014. *Flood stratigraphies in lake sediments: A review*. *Earth-Science Reviews 135*, p. 17-37.
- Schirmer, W., 1995. *Valley bottoms in the late Quaternary*. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Suppl.*, 100, p. 27–51.
- Schorn, E. 2013 *Inventariserend Veldonderzoek verkennende fase Hofstad III en westelijk deel Loerik V te Houten*. Archeodienst Rapport 224. 42 pp.
- Schurmans, M., 2006. *Bewoningssporen uit de Bronstijd en de Romeinse tijd langs de Houtense stroomgordel*. *Zuidnederlandse Archeologische Notities 53*. ACVU-HBS.
- Shala, B., 2001. *Jungquartäre Talgeschichte des Rheins zwischen Krefeld und Dinslaken*. Unpublished Ph.D. thesis, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf, 231 pp.
- Silva, W., Klijn, F., Dijkman, J., 2001. *Room for the Rhine branches in the Netherlands; what research has taught us*. Technical Report 2001.031, WL Delft Hydraulics, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Delft, Lelystad, the Netherlands, 162 pp.
- Smith, N.D., Cross, T.A., Dufficy, J.P., Clough, S.R., 1989. *Anatomy of an avulsion*. *Sedimentology 36*, 1-23.
- Spek, T., Zeiler, F.D., Raap, E., 1996. *Van de Hunnepe tot de zee. De geschiedenis van het Waterschap Salland*. IJsselacademie Kampen. 264 pp.
- Stouthamer, E., 2001. *Holocene avulsions in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands*. *Netherlands Geographical Studies 283*, 224 pp.
- Stouthamer, E., Berendsen, H.J.A., 2000. *Factors controlling the Holocene avulsion history of the Rhine-Meuse delta (The Netherlands)*. *Journal of Sedimentary Research 70*, p 1051-1064.
- Stouthamer, E., Berendsen, H.J.A., 2001. *Avulsion frequency, avulsion duration, and interavulsion period of Holocene channel belts in the Rhine-Meuse Delta, The Netherlands*. *Journal of Sedimentary Research 71*, p 589-598.

- Stouthamer, E., Cohen, K.M., Gouw, M.J.P., 2011. From River to Rock Record: The preservation of fluvial sediments and their subsequent interpretation. Avulsion and its Implications for Fluvial-Deltaic Architecture, insight from the Rhine-Meuse Delta, p. 215-231.
- Stouthamer, E., Cohen, K.M. & Hoek, W.Z., 2015. De vorming van het land - Geologie en geomorfologie. Utrecht: Perspectief Uitgevers. 434 pp.
- Taylor, W.A., 2000. Change-point analysis: a powerful new tool for detecting changes. <http://www.variation.com/cpa/tech/changepoint.html>
- Ten Brinke, W., 2005, The Dutch Rhine: a restrained river. Veen Magazines, Diemen, 228 pp.
- 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, 163 pp.
- Törnqvist, T. E., 1993. Fluvial sedimentary geology and chronology of the Holocene Rhine-Meuse delta, The Netherlands Netherlands Geographical Studies 166.
- Törnqvist, T.E., de Jong, A.F.M., Oosterbaan, W.A., van der Borg, K., 1992. Accurate dating of organic deposits by AMS 14C measurement of macrofossils. Radiocarbon 34, p 566-577.
- Toonen, W.H.J., 2013. A Holocene flood record of the Lower Rhine. PhD-thesis, Utrecht University. Utrecht Studies in Earth Sciences 41, 204 pp.
- Toonen, W.H.J., 2015. Flood frequency analysis and discussion of non-stationarity of the Lower Rhine flooding regime (AD 1350–2011): Using discharge data, water level measurements, and historical records. Journal of Hydrology 528, p 490-502.
- Toonen, W.H.J., Kleinhans, M.G., Cohen, K.M., 2012. Sedimentary architecture of abandoned channel fills. Earth Surface Processes and Landforms 37, p 459-472.
- Toonen, W.H.J., de Molenaar, M.M., Bunnik, F.P.M., Middelkoop, H., 2013. Middle Holocene palaeoflood extremes of the Lower Rhine. Hydrology Research 44, p 248-263.
- Toonen, W.H.J., Winkels, T.G., Cohen, K.M., Prins, M.A., Middelkoop, H., 2015. Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450 years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using End-Member Modelling. Catena 130, p. 69-81.
- Toonen, W.H.J., Middelkoop, H., Konijnendijk, T.Y.M., Macklin, M.G., Cohen, K.M., 2016. The influence of hydroclimatic variability on flood frequency in the Lower Rhine. Earth Surface Processes and Landforms. DOI: 10.1002/esp.3953
- Van de Plassche, O., 1982. Sea-Level Change and Water-Level Movements in the Netherlands during the Holocene. Proefschrift Vrije Universiteit, Amsterdam, 93 pp.
- Van de Ven, A.J., Meihuizen, L.S., 1943. De oudste stadsrekening van Doesburg (1373/74). Bijdragen en mededeelingen Gelre XLVI. 103-134
- Van de Ven, G.P., 1976. Aan de wieg van Rijkswaterstaat – wordingsgeschiedenis van het Pannerdens Kanaal. De Walburg Pers, Zutphen, 438 pp.
- Van de Ven, G.P., Eymers, H., 2007. Verdeel en beheers! 300 jaar Pannerdensch Kanaal. Veen Magazines.
- Van den Bos, V., Brinkkemper, O., Bull, I.D., Engels, S., Hakbijl, T., Schepers, M., van Dinter, M., van Reenen, G. and van Geel, B., 2014. Roman impact on the landscape near castellum Fectio, The Netherlands. Vegetation history and archaeobotany 23, p. 277-298.
- Van den Broeke, P., Van Enckevort, H., Thijssen, J., 2009. 'De oeverbewoners noemen hem Vahalis' De Waal bij Nijmegen in de Romeinse tijd. Jaarboek Numaga, Jaargang LVI, 14-32
- Van der Kamp, J., (ed.) 2009. Werk aan de weg: LR31 Zandweg: Archeologisch onderzoek aan de verspoelde sectie van de limesweg. Basisrapportage archeologie Gemeente Utrecht 21.
- Van der Kooij, D., Sprey, S., Dijkstra, M., Postma, H., 2005. Romeinen in Bodegraven. AWN-opgravingen in de periode van 1995 tot 2002, Westerheem 54-6, 275-306.
- Van der Woude, J.D., 1983. Holocene paleoenvironmental evolution of a perimarine fluvial area – geology and paleobotany of the area surrounding the archeological excavation at

- the Hazendonk river dune (western Netherlands). *Analecta Praehistorica Leidensia*, XVI, 1–124.
- Van Dijk, W.M., Van de Lageweg, W.I., Kleinhans, M.G., 2012. Experimental meandering river with chute cut offs. *Journal of Geophysical Research* 117, F03023.
- Van Dinter, M., 2013. The Roman Limes in the Netherlands: how a delta landscape determined the location of the military structures. *Netherlands Journal of Geosciences* 92, 11-32.
- Van Dinter, M., Van Zijverden, W.K., 2010. Settlement and land use on crevasse splay deposits; geoarchaeological research in the Rhine-Meuse Delta, the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences* 89, 21-34.
- Van Dinter, M., Cohen, K.M., Hoek, W.Z., Stouthamer, E., Middelkoop, H., (subm. 2016) Late Holocene lowland fluvial archives and geoarchaeology: Utrecht's case study of Rhine river abandonment under Roman and Medieval occupation, and its international relevance. Article manuscript / thesis chapter draft. Utrecht University, Dept. Physical Geography.
- Van Enckevort, H., Vos, W.K. 2006 De Limes: een natte grens dwars door Nederland. *Nationale Onderzoeksagenda Archeologie* 1.0, hoofdstuk 19. 45 pp. www.archeologieinnederland.nl
- Van Hall, A. 1997. Dijkzorg, een continuüm en opmaat tot geïntegreerd waterbeheer. *Beschouwingen naar aanleiding van de geschiedenis van een waterschap. Tijdschrift voor Waterstaatsgeschiedenis* 6: 8-18.
- Van Londen, H. 2006, Midden-Delfland: the roman native landscape past and present. ;
- Van Rooijen, C.. 2010. Utrecht in de periode 700-1200. *Jaarboek Oud-Utrecht*, 2010, p. 6-46.
- Vos, P.C., Bazelmans, J., Weerts, H.J.T., Van der Meulen, M.J., (eds) 2011. *Atlas van Nederland in het Holoceen. Landschap en bewoning vanaf de Laatste IJstijd tot nu.*
- Vos, P.C., 2015. Origin of the Dutch coastal landscape. Long-term landscape evolution of the Netherlands during the Holocene, described and visualized in national, regional and local palaeogeographical map series. *Proefschrift Universiteit Utrecht. Barkhuis, Groningen* 359 pp.
- Weerts, H.J.T., Berendsen, H.J.A., 1995. Late Weichselian and Holocene fluvial palaeogeography of the southern Rhine-Meuse delta, The Netherlands. *Geologie en Mijnbouw* 74, p. 199-212.
- Weikinn, C., 1958. *Quellentexte zur Witterungsgeschichte Europas von der Zeitenwende bis zum Jahre 1850. Band 1 – Zeitenwende bis 1500*, Akademie, Berlin.
- Weltje, G.J., Prins, M.A., 2007. Genetically meaningful decomposition of grain-size distributions. *Sedimentary Geology* 202, 409-424.
- Wetter, O., Pfister, C., Weingarter, R., Luterbacher, J., Reist, T., Trösch, J., 2011. The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. *Hydrological Sciences Journal* 56, p 733-758.
- Willems, W.J.H., 1980. Arnhem – Meinerswijk: een nieuw castellum aan de Rijn. *Westerheem* 29, 334-348
- Willems, W.J.H., 1986. Romans and Batavians. A regional study in the Dutch eastern river area. *Dissertation University of Amsterdam*, 491 pp.
- Willems, W.J.H., van Enckevort, H. 2009. *VLPIA NOVIOMAGVS Roman Nijmegen The Batavian Capital at the Imperial Frontier. Journal of Roman Archeology Suppl. Series 73*
- Zandstra, M.J.M., Polak, M., 2012. *De Romeinse versterkingen in Vechten-Fectio. Het archeologisch onderzoek in 1946-1947. Nijmegen: Auxilia.*
- Zhou, D., 2000. *Jungquartäre Talgeschichte des mittleren Niederrheins. Unpublished Ph.D. thesis, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Düsseldorf*, 249 pp.
- Zondervan, W., 1961. De datering van de oudste stadsrekening van Doesburg. *Bijdragen en mededeelingen Gelre* LX, p. 117-126.

8 Bijlagen

Dit rapport heeft vier bijlagen.

Bijlage A bevat de basisgegevens waarop de op pagina 41-42 in figuur 10 en tabel 1 gepresenteerde tijdreeks aan extreme overstromingen zich baseert. Ze presenteert per onderzoekslocatie steeds dezelfde serie kaarten, grafieken en tabellen. De bijlage is een herziene versie van Appendix B uit het proefschrift Toonen (2013). De herzieningen betreffen een verbeterde presentatie en fijnregelingen in de ouderdom-diepte relaties voor enkele onderzoekslocaties.

Parallel aan het schrijven van het rapport zijn de bronteksten van hoofdstukken uit het Proefschrift Toonen (2013) verder geredigeerd tot manuscripten voor Engelstalige peer-reviewed wetenschappelijke tijdschriften (Bijlagen B, C en D). Bij voltooiën van dit rapport zijn daarvan de artikelen Toonen *et al.* (2015; =Bijlage C) en Minderhoud *et al.* (2016; =Bijlage D) gepubliceerd. Het manuscript van Bijlage B (Toonen *et al.*, in prep.) is nog niet ter review ingediend. Om die reden is Bijlage B voorlopig nog niet vrij beschikbaar (een versie onder embargo is de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed als opdrachtgever verstrekt).

- 8.1 **Bijlage A. Supplementary Materials / Gegevensuitwerking per locatie**
- 8.2 **Bijlage B. Manuscript Toonen et al. (to be submitted; under embargo)**
- 8.3 **Bijlage C. Published Article Toonen et al. (2015: Catena)**
- 8.4 **Bijlage D. Article In Press Minderhoud et al. (2016: Quat. Geochron.)**

Bijlagen bij het rapport

Overstromingen van de Rijn gedurende het Holoceen

Relevantie van de grootste overstromingen voor archeologie
van het Nederlandse riviereengebied

Kim M. Cohen^[1,2], Willem H.J. Toonen^[2,1], Henk J.T. Weerts^[3]

[1] Universiteit Utrecht, Dept. Fysische Geografie

[2] Deltares, Afdeling Toegepaste Geologie en Geofysica

[3] Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Afd. Landschap



Universiteit Utrecht



Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed
*Ministerie van Onderwijs, Cultuur en
Wetenschap*

Deltares Rapport 1209091

Toelichting

Dit rapport heeft vier bijlagen.

Bijlage A bevat de basisgegevens waarop de op pagina 41-42 in figuur 10 en tabel 1 gepresenteerde tijdreeks aan extreme overstromingen zich baseert. Ze presenteert per onderzoekslocatie steeds dezelfde serie kaarten, grafieken en tabellen. De bijlage is een herziene versie van Appendix B uit het proefschrift Toonen (2013). De herzieningen betreffen een verbeterde presentatie en fijnregelingen in de ouderdom-diepte relaties voor enkele onderzoekslocaties.

Parallel aan het schrijven van het rapport zijn de bronteksten van hoofdstukken uit het Proefschrift Toonen (2013) verder geredigeerd tot manuscripten voor Engelstalige peer-reviewed wetenschappelijke tijdschriften (Bijlagen B, C en D). Bij voltooiën van dit rapport zijn daarvan de artikelen Toonen *et al.* (2015; =Bijlage C) en Minderhoud *et al.* (2016; =Bijlage D) gepubliceerd. Het manuscript van Bijlage B (Toonen *et al.*, in prep.) is nog niet ter review ingediend. Om die reden is Bijlage B voorlopig nog niet vrij beschikbaar (een versie onder embargo is de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed als opdrachtgever verstrekt).

Bijlagen

- Bijlage A Supplementary Materials / Gegevensuitwerking per locatie p. 2-36**
Titel: Supplementary Material to 'Sedimentary palaeoflood event registration in lowland river plain lake fills: a Holocene flood chronology of the Lower Rhine'
- Bijlage B Manuscript Toonen et al. (to be submitted; under embargo) (24 pp.)**
Werktitel: Sedimentary palaeoflood event registration in lowland river plain lake fills: a Holocene flood chronology of the Lower Rhine.
- Bijlage C Published Article Toonen et al. (2015: Catena) (13 pp.)**
Titel: Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450 years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using End MemberModelling
DOI/URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.004>
- Bijlage D Published Article Minderhoud et al. (2016: Quat. Geochronology) (11 pp.)**
Titel: Improving age-depth models of fluvio-lacustrine deposits using sedimentary proxies for accumulation rates
DOI/URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.quageo.2016.01.001>

Supplementary Material to 'Sedimentary palaeoflood event registration in lowland river plain lake fills: a Holocene flood chronology of the Lower Rhine'

Site: **Bienener Altrhein**
 Abbreviation: BAR
 Type: Infilled palaeochannel
 Town: Bienen
 Country: Germany
 Coordinates: 51.8132 N; 6.3310 E.
 Elevation: 10.0 m +O.D.
 Begin flood registration: ~AD 1550
 End flood registration: AD 1920

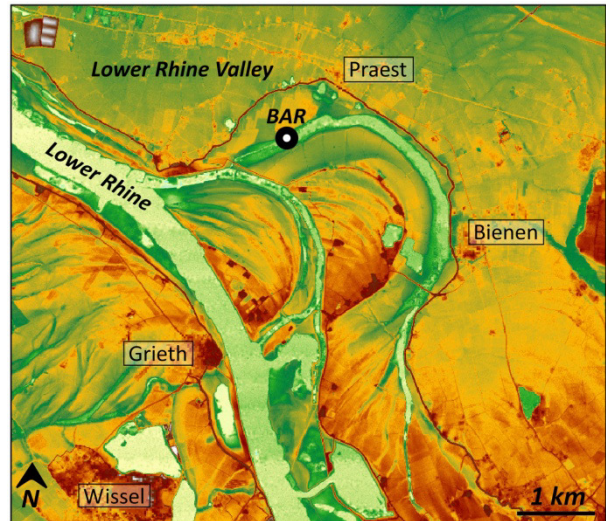


Figure BAR_1: Close-up DEM of the palaeochannel research location. Green colours indicate relative low elevations, red indicate high elevations (Landvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, as used in Cohen et al., 2009).

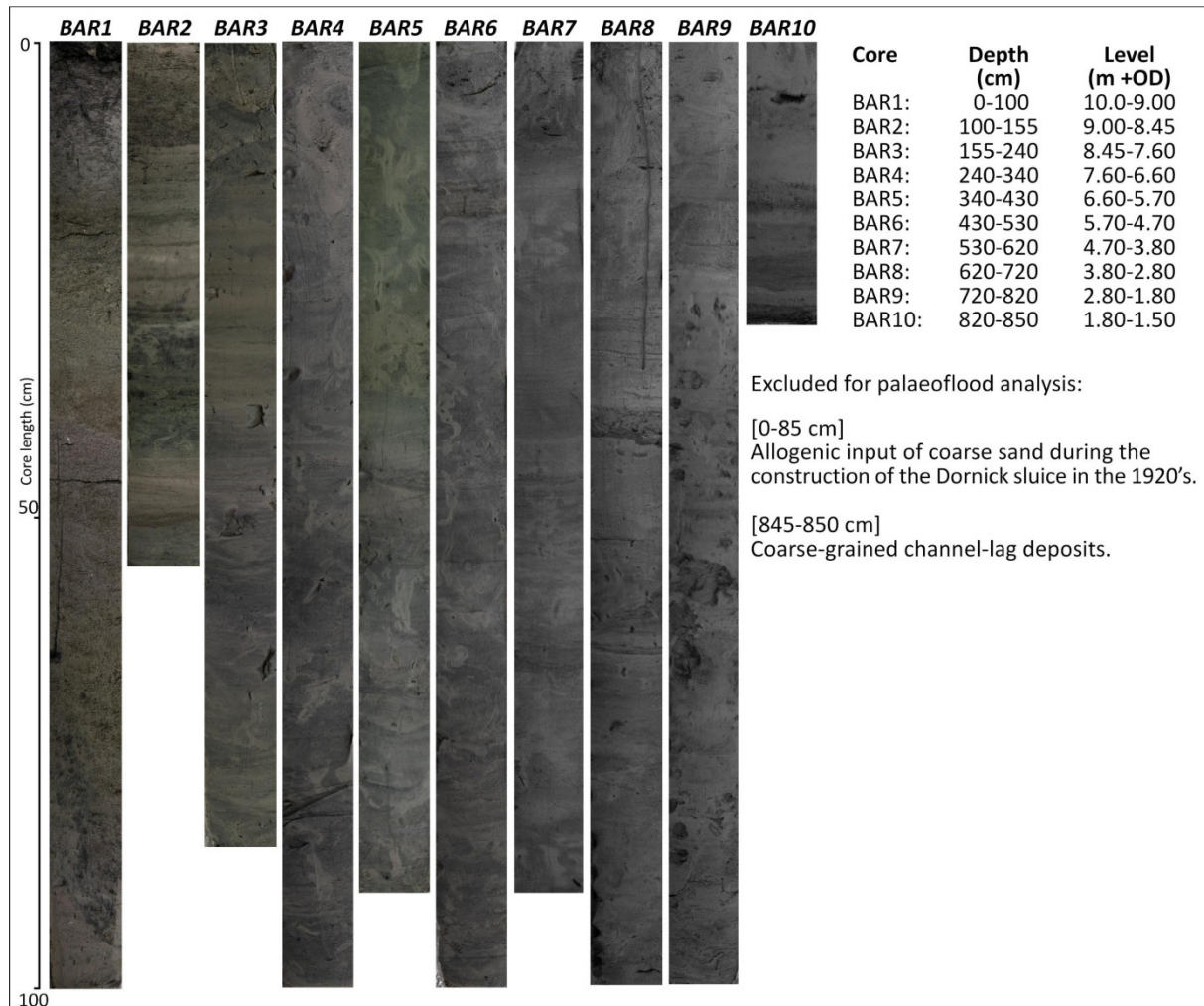


Figure BAR_2: Photos of core segments with depth information and intervals used for palaeoflood analysis.

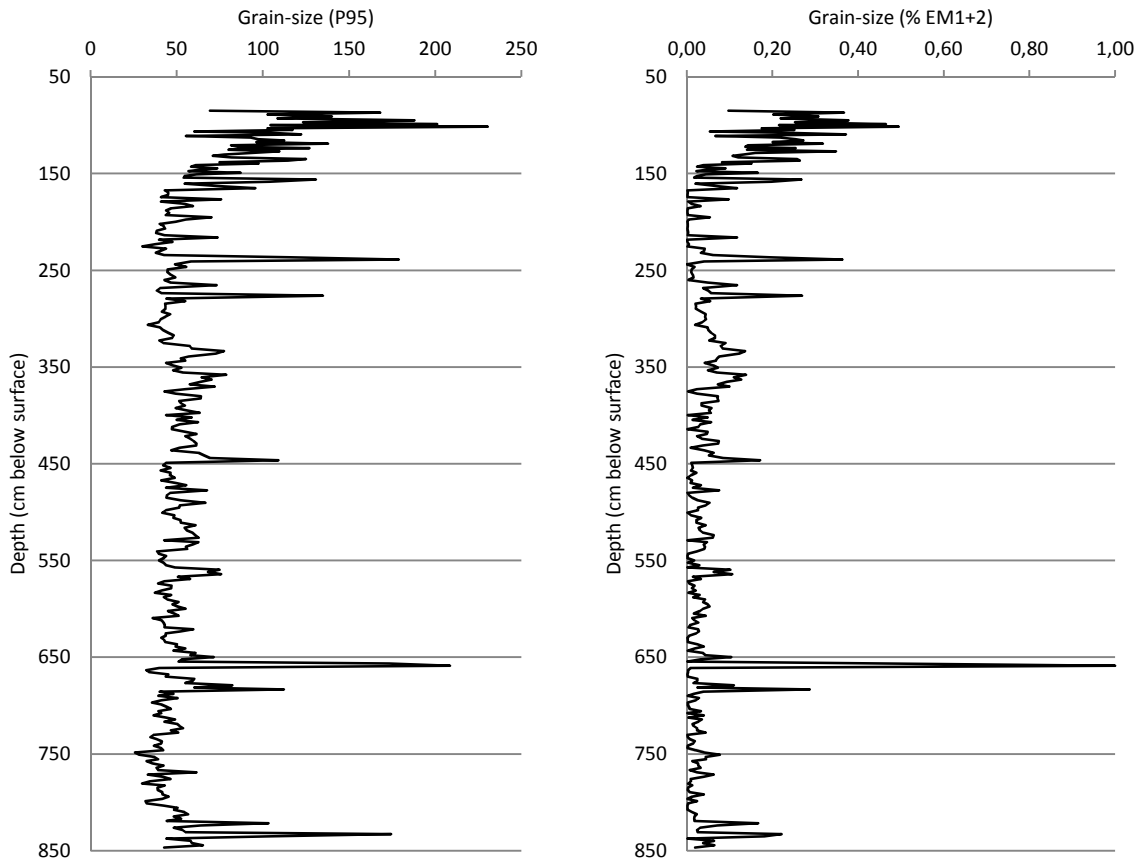


Figure BAR_3: Plots of unprocessed grain-size information.

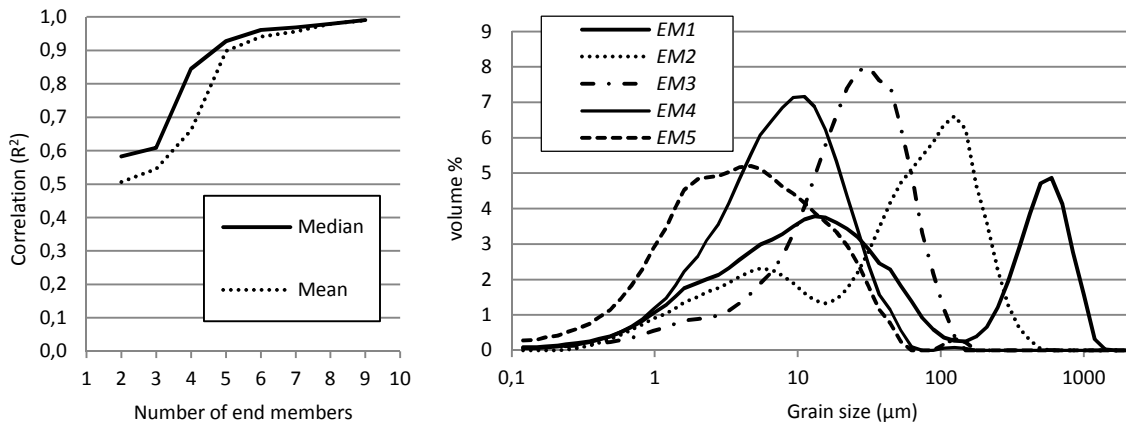


Figure BAR_4: Coefficients of determination for End Member Models using a different number of end members (left) and the characteristic grain-size distribution of end members in the adopted 5-end member model.

Table BAR_1: Change points (change point analysis; Taylor, 2000) used to normalise phasing in sedimentary data.

BAR P95	Confidence level	>95%		BAR EMM	Confidence level	>95%
	Data grouping	n = 4			Data grouping	n = 4
	Identified change points	168 cm			Identified change points	141 cm

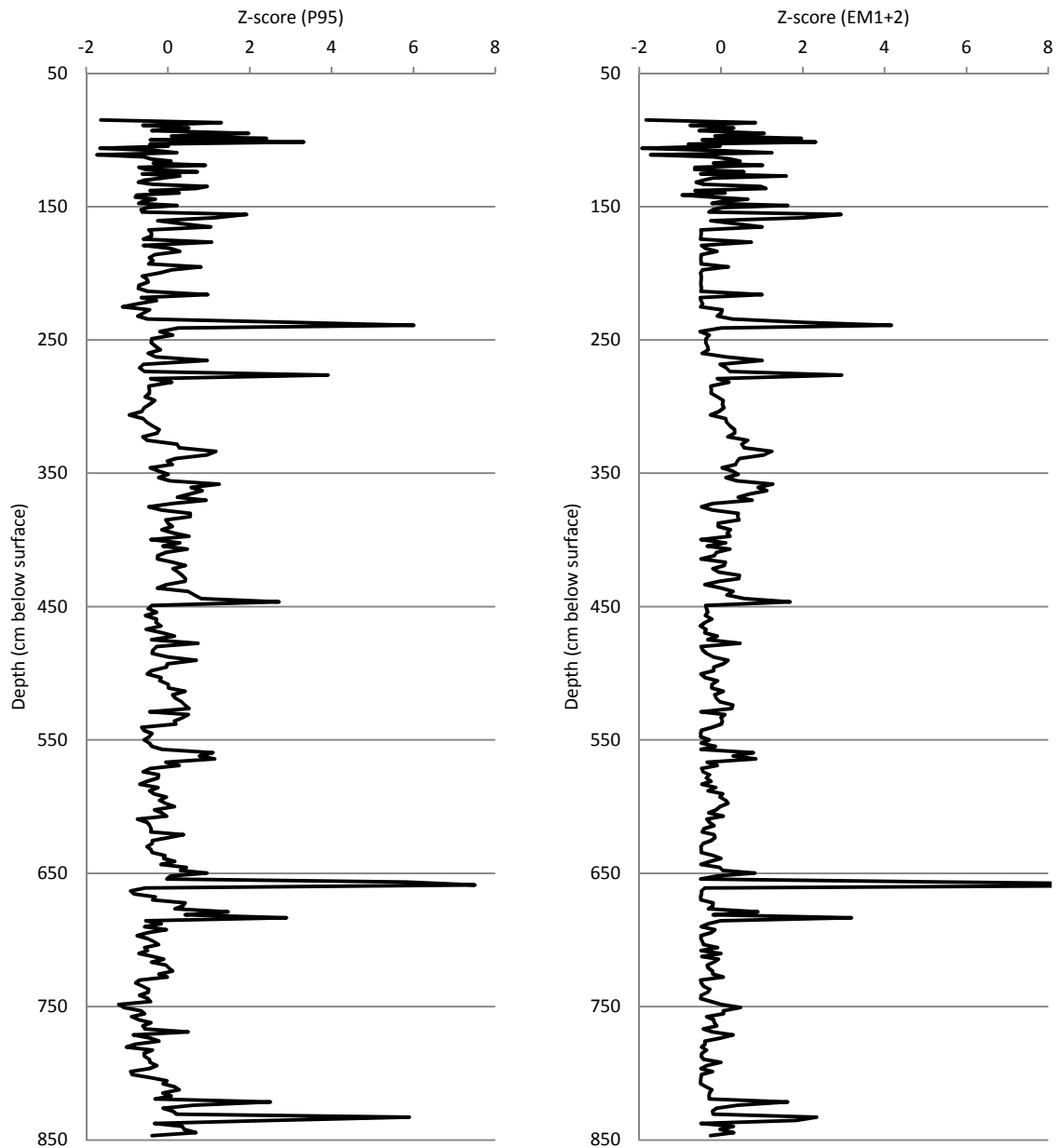


Figure BAR_5: Normalised Z-scored grain-size data.

Table BAR_2: Age information for the Bienener Altrhein.

Depth (cm)	Type	Description	Age (range)	Source/Lab-code
0	Personal observation	Current waterfront	AD 2011	n.a.
30	Palynology	No Hemp and maize; Rye and pine (+++)	AD 1900-1975	Quick-scan by F.P.M. Bunnik (unpublished)
85	Anthropogenic disturbance	Construction Dornicker sluice	AD 1920-1930	Pers. comm. Thomas Bäumen (via www.baeumen.de)
119	Anthropogenic disturbance	Onset heavy metal pollution	AD 1860-1870	XRF-data (unpublished); in agreement with Middelkoop, 1997
177	Palynology	Hemp and buck-wheat (+++)	< AD 1880	Quick-scan by F.P.M. Bunnik (unpublished)
849	Historical records	Abandonment of river channel	AD 1550-1575	Braun & Thiermann, 1981 'sGrooten, 1573 (map)

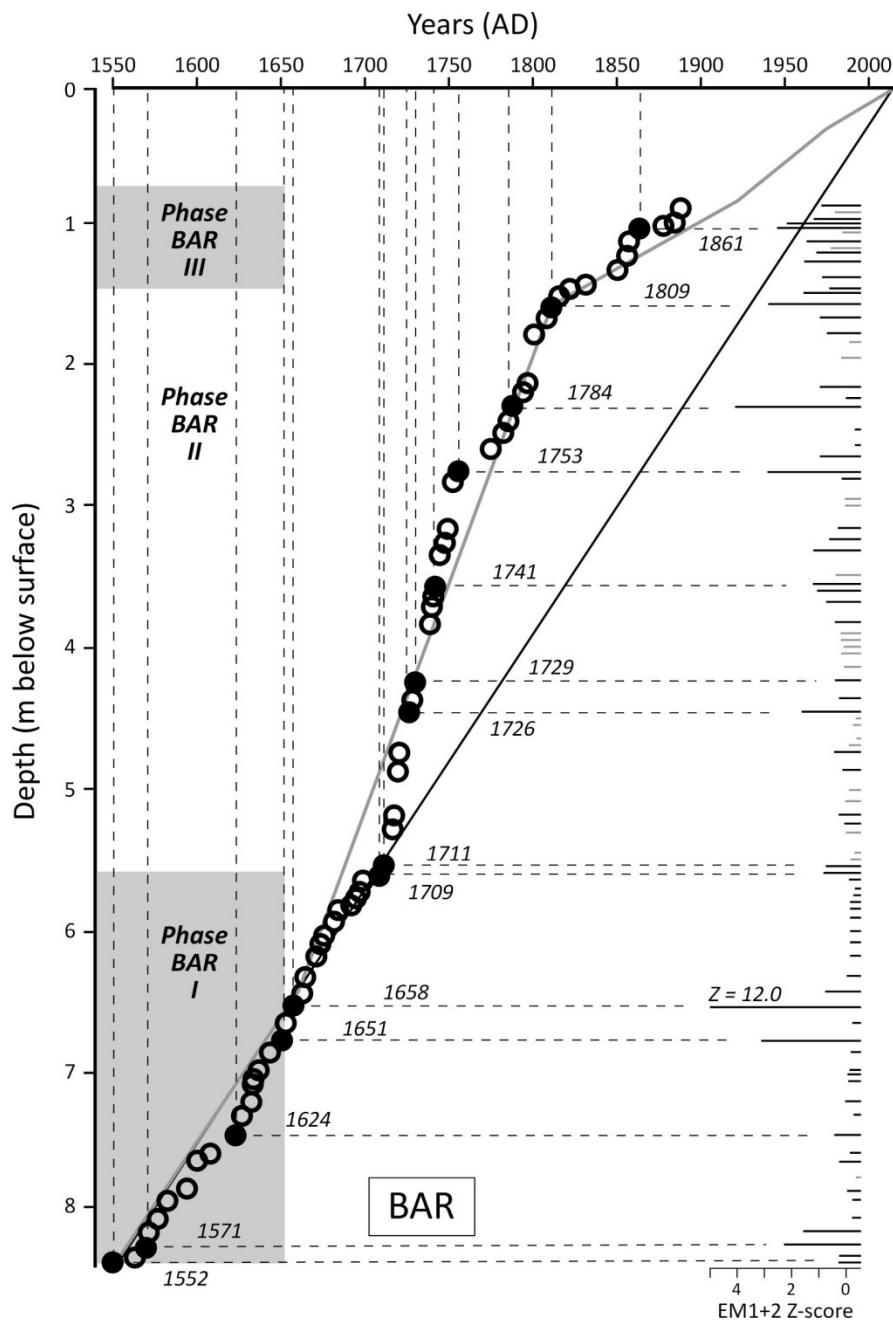


Figure BAR_6: Age-depth model of the Bienener Altrhein. The primary age information (Tab. BAR_2) is supplemented with floods event chronology, based on historical and sedimentary information (Toonen et al., 2014).

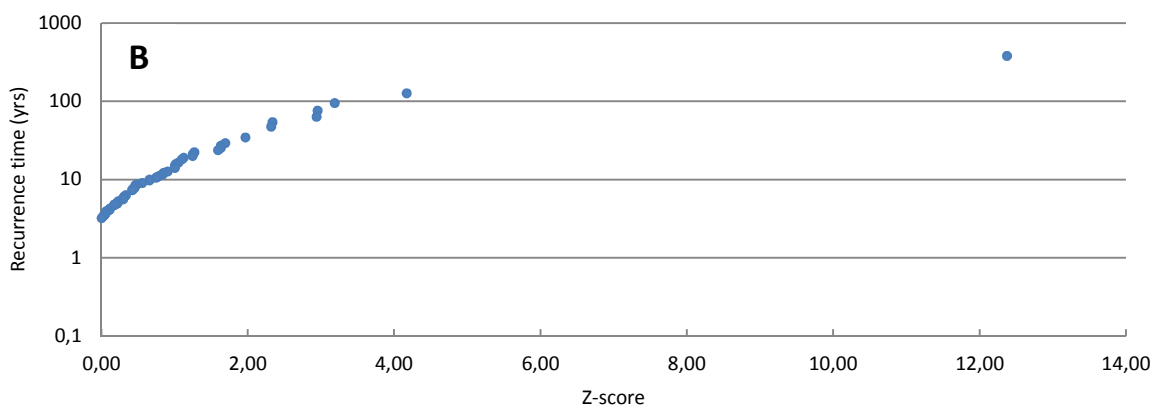
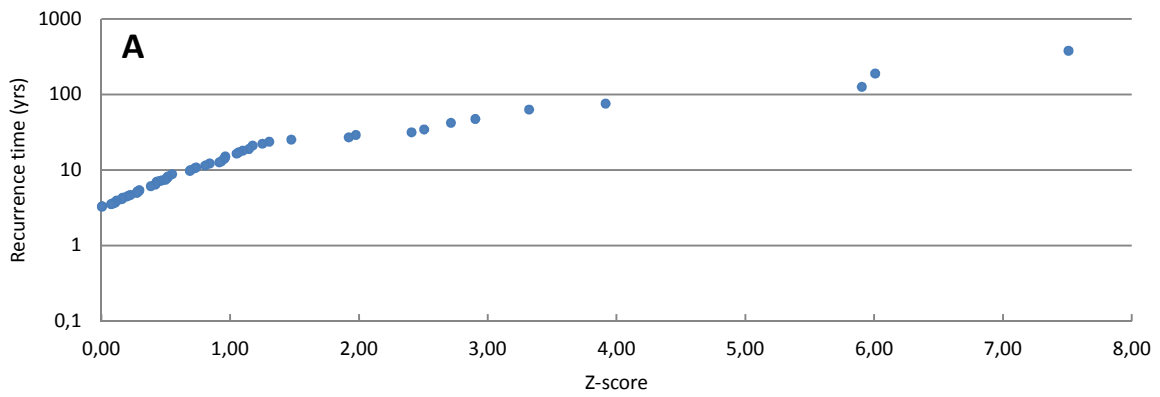


Figure BAR_7: Recurrence time versus Z-score plots. The upper graph (A) shows the distribution for P95, the lower graph (B) for EM1+2.

Table BAR_3: Regression formula and determination coefficients for calculated recurrence time versus Z-scores. The regression formula have been used to assess the recurrence times of largest events.

Data	Regression formula	R ²
P95 Z>1	$t = 11.815e^{0.4528x}$	0.98
EM1+2 Z>1	$t = 32.51x - 20.92$	0.99

Site: **Meinerswijk**
 Abbreviation: Mw
 Type: Infilled palaeochannel
 Town: Arnhem
 Country: Netherlands
 Coordinates: 51.9689 N; 5.8727 E.
 Elevation: 8.6 m +O.D.
 Begin flood registration: ~AD 1050
 End flood registration: AD 1560

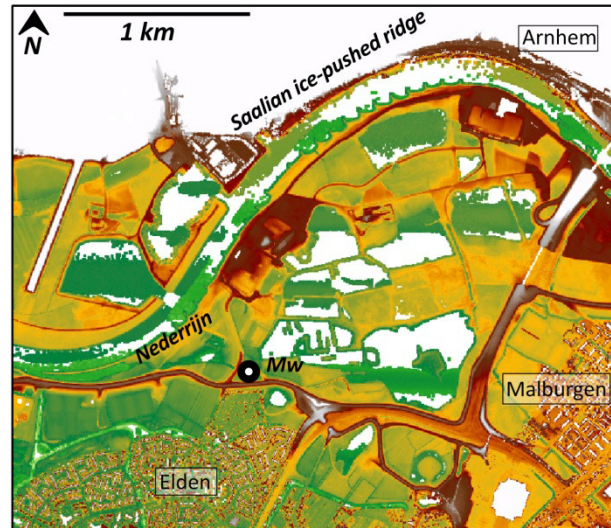


Figure Mw_1: Close-up DEM of the palaeochannel research location. Green colours indicate relative low elevations, white indicate high elevations (Rijkwaterstaat-AGI, 2005).

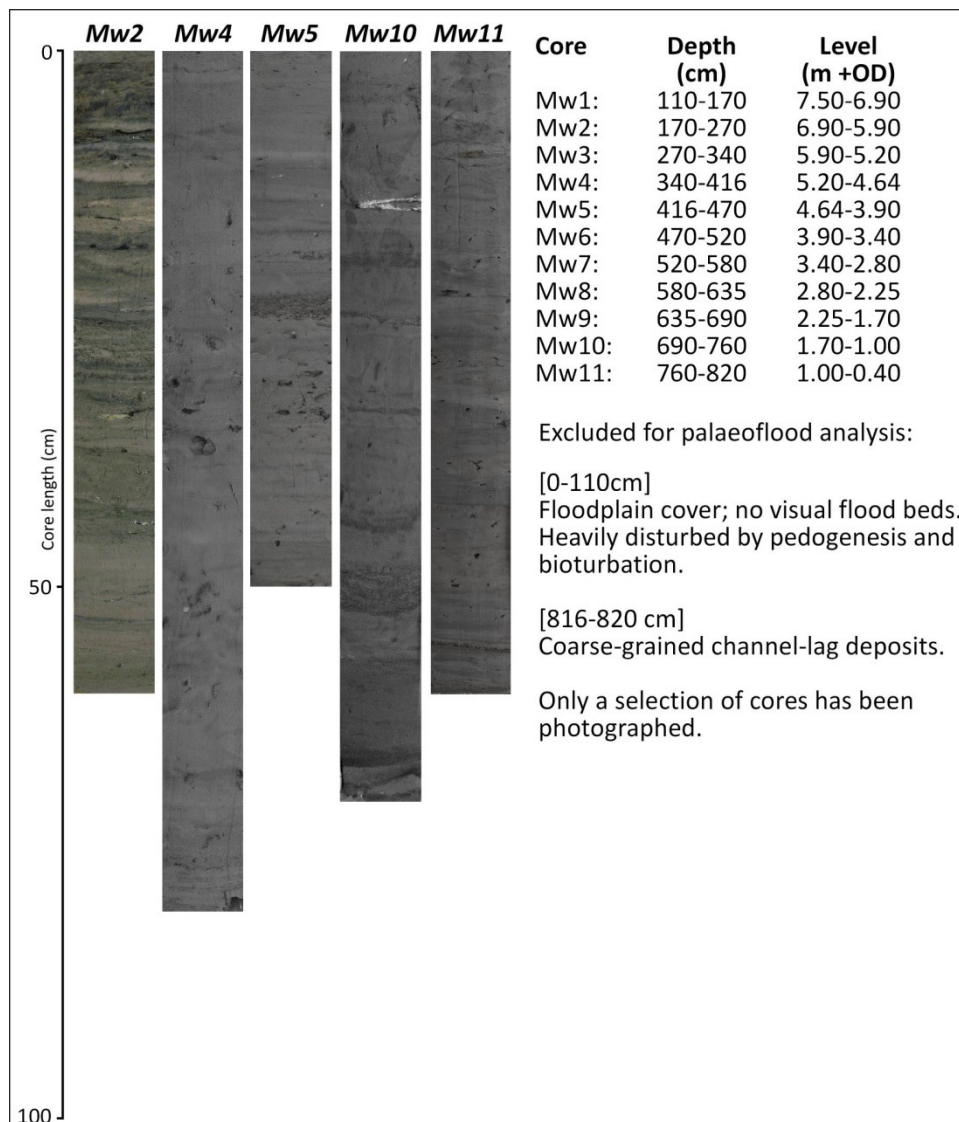


Figure Mw_2: Photos of core segments with depth information and intervals used for palaeoflood analysis.

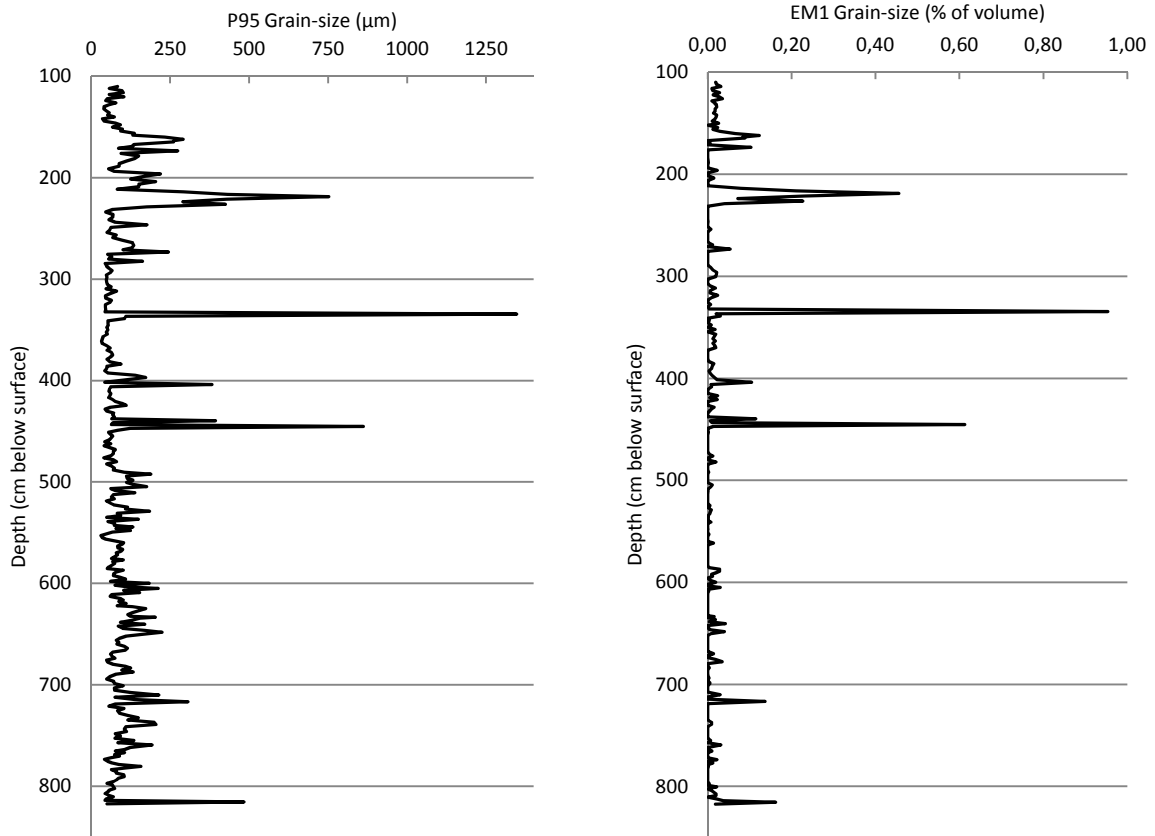


Figure Mw_3: Plots of unprocessed grain-size information.

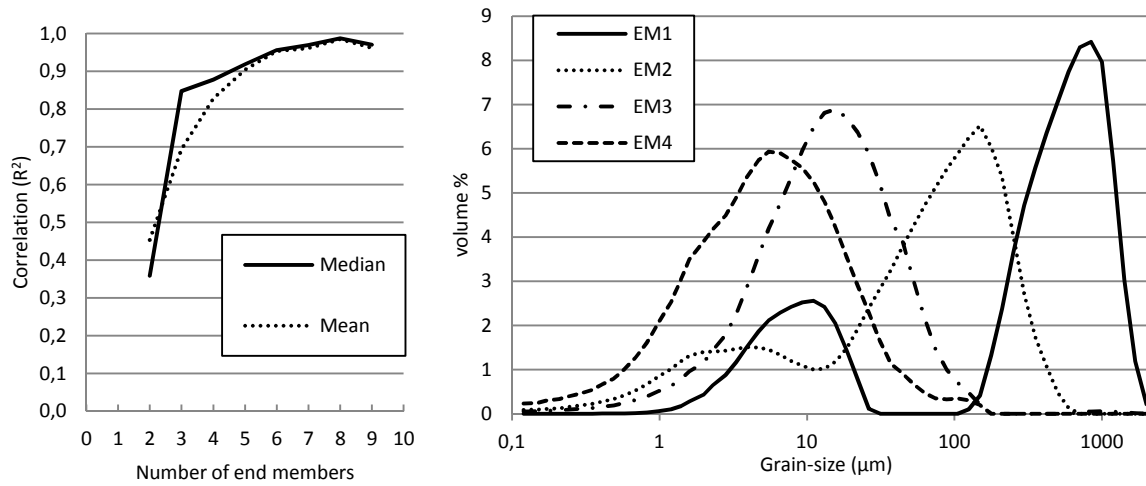


Figure Mw_4: Coefficients of determination for End Member Models using a different number of end members (left) and the characteristic grain-size distribution of end members in the adopted 4-end member model.

Table Mw_1: Change points (change point analysis; Taylor, 2000) used to normalise phasing in sedimentary data.

Mw P95	Confidence level	>95%		Mw EMM	Confidence level	>95%
	Data grouping	n = 1			Data grouping	n = 1
	Identified change points	none			Identified change points	none

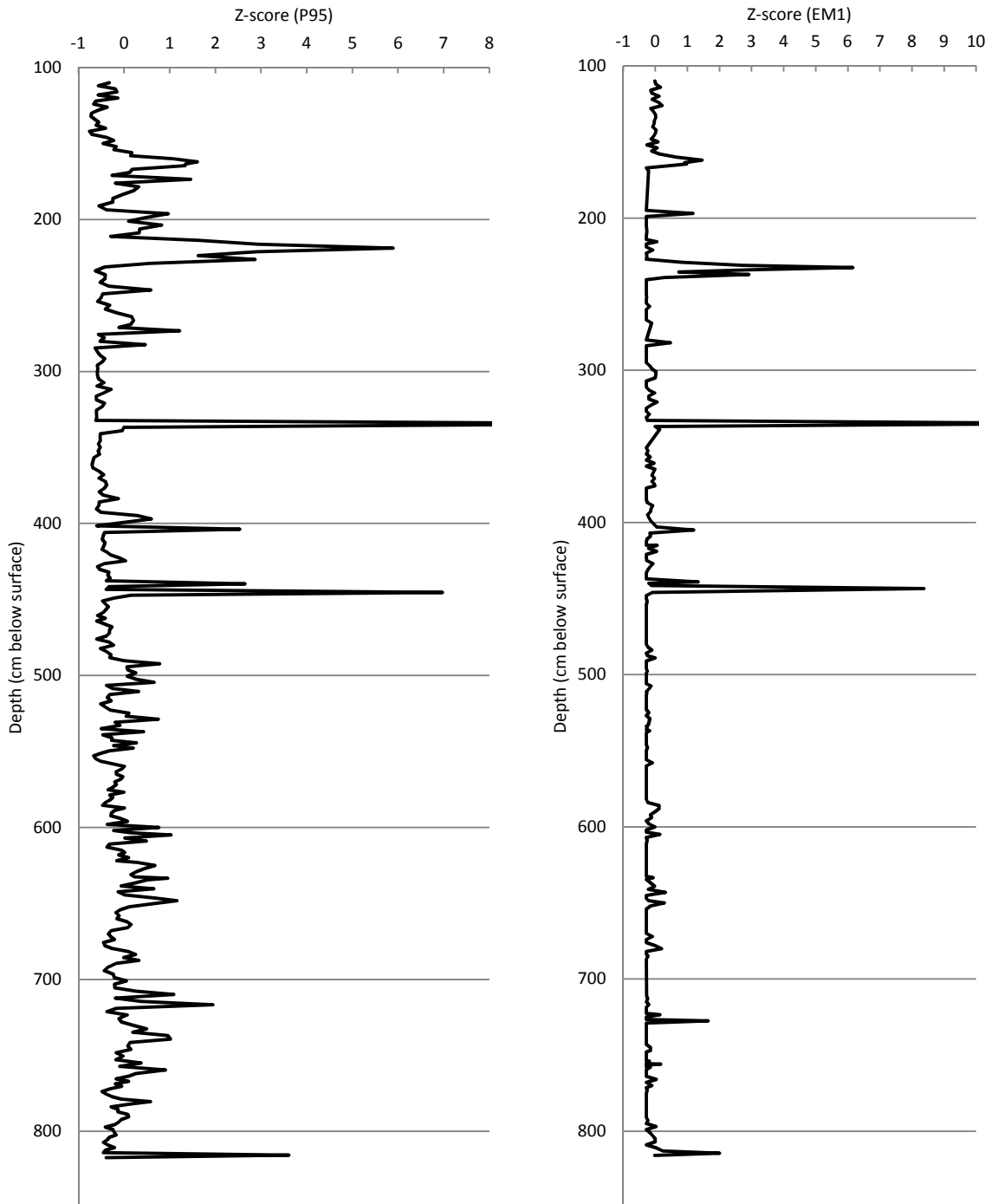


Figure Mw_5: Normalised Z-scored grain-size data.

Table Mw_2: Age information for Meinerswijk.

Depth (cm)	Type	Description	Age (range)	Source/Lab-code
0	Personal observation	Current floodplain surface	AD 2011	n.a.
186	AMS ¹⁴ C dating	Seeds: <i>Schoenoplectus lacustris</i> , <i>Prunella vulgaris</i> , <i>Polygonum aviculare</i> , <i>Alisma plantago-aquatica</i>	AD 1475 ± 31	SUERC 37136
357	AMS ¹⁴ C dating	<i>Salix</i> (bark), Seeds: <i>Scirpus sylvaticus</i> , <i>Juncus sp.</i> , <i>Veronica sp.</i> , <i>Alisma plantago-aquatica</i> , <i>Poa annua</i> , <i>Cerastrium sp.</i>	AD 1216 ± 41	GrA-54917
451	AMS ¹⁴ C dating	Seeds: <i>Juncus sp.</i> , <i>Urtica doica</i> , <i>Veronica sp.</i> , <i>Scirpus sylvatica</i> , <i>Cyperaceae sp.</i>	AD 1207 ± 39	GrA-54920
801	AMS ¹⁴ C dating	Seeds: <i>Bidens cf. Tripartita</i> , <i>Rumex maritimus</i> , <i>Carex cf. Vesicaria</i> , <i>Ranunculus acris/repens</i> , <i>Alisma plantago-aquatica</i> , <i>Mentha aquatic/arvensis</i> , <i>Rorippa palustris</i> , leaf fragments (indet.)	AD 1130 ± 63	GrA-54338
820	Archaeology	Post-Roman erosion of eastern part of the Roman fortress (<i>Castra Herculis</i>) by river channel.	After AD 400	Teunissen et al., 1987. Willems, 1980. Van der Gaauw, 1989.

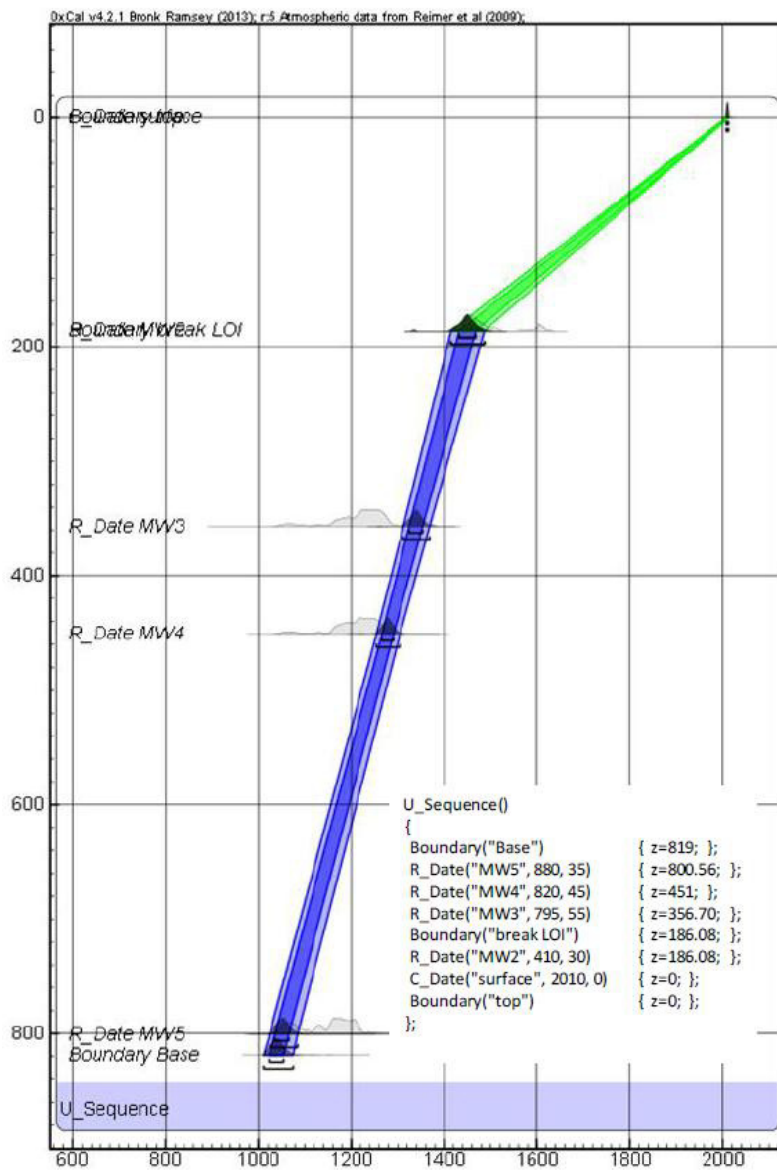


Figure Mw_6: Oxcal age-depth model of Meinerswijk (Bronk Ramsey, 2009; Reimer et al., 2009).

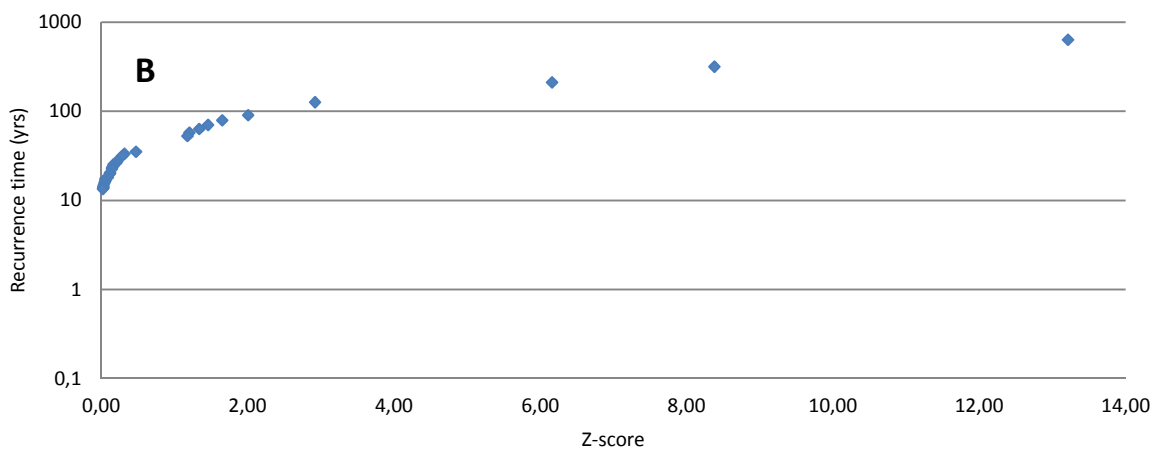
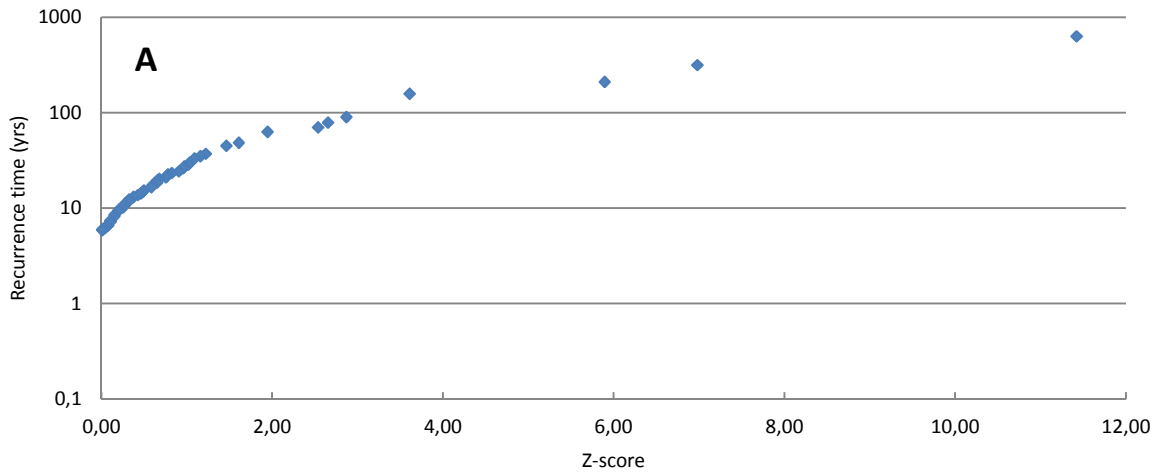


Figure Mw_7: Recurrence time versus Z-score plots. The upper graph (A) shows the distribution for P95, the lower graph (B) for EM1.

Table Mw_3: Regression formula and determination coefficients for calculated recurrence time versus Z-scores. The regression formula have been used to assess the recurrence times of largest events.

Data	Regression formula	R ²
P95 Z>1	$t = 54.86x - 44.44$	0.97
EM1 Z>1	$t = 44.45x - 5.15$	0.97

Site: **Amerongen**
 Abbreviation: Am
 Type: Infilled palaeochannel
 Town: Amerongen
 Country: Netherlands
 Coordinates: 51.9957 N; 5.4738 E.
 Elevation: 5.4 m +O.D.
 Begin flood registration: ~AD 575
 End flood registration: AD 800

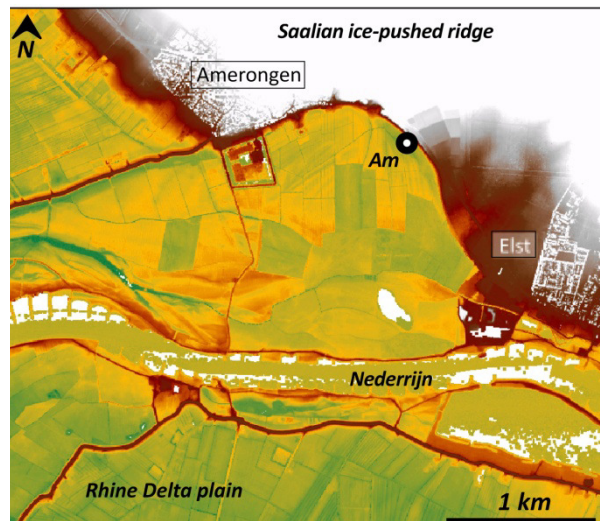


Figure Am_1: Close-up DEM of the palaeochannel research location. Green colours indicate relative low elevations, white indicate high elevations (Rijkwaterstaat-AGI, 2005).

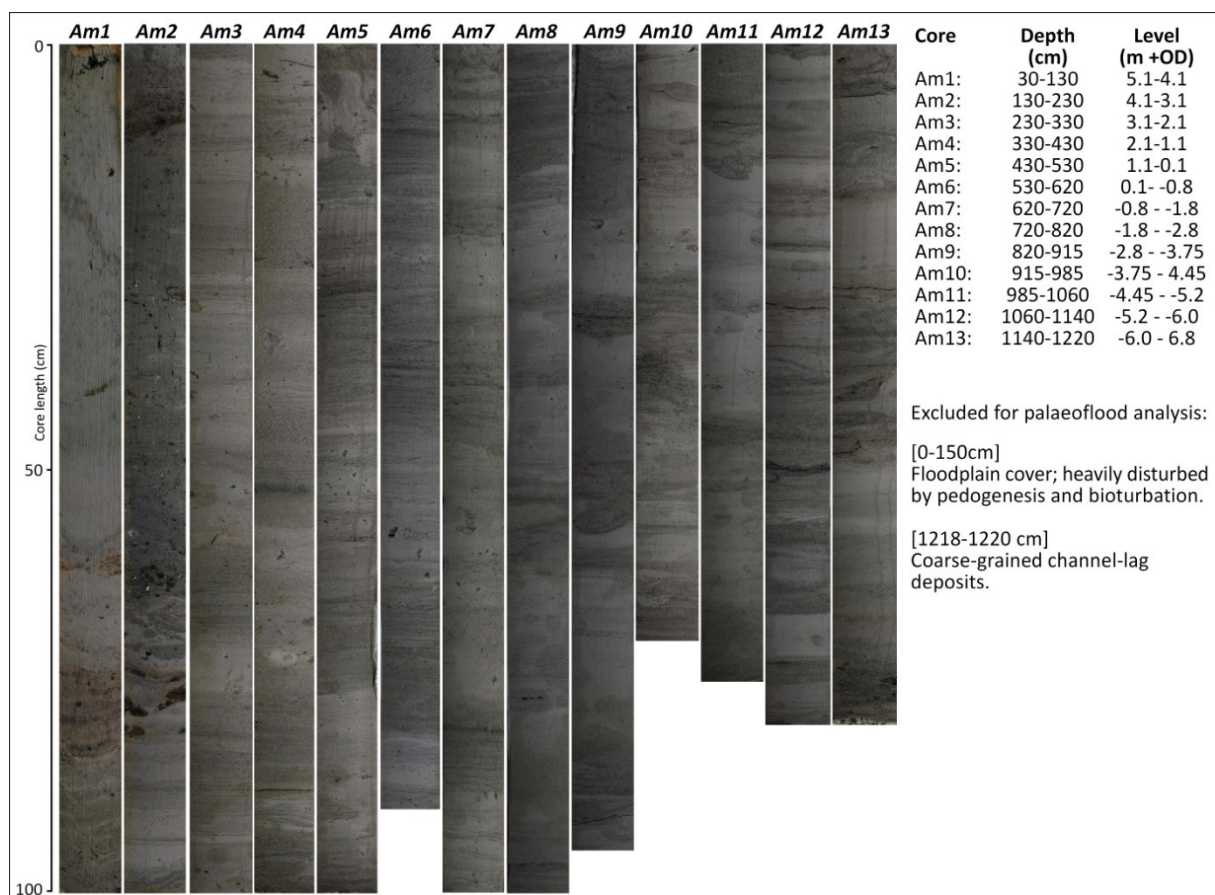


Figure Am_2: Photos of core segments with depth information and intervals used for palaeoflood analysis.

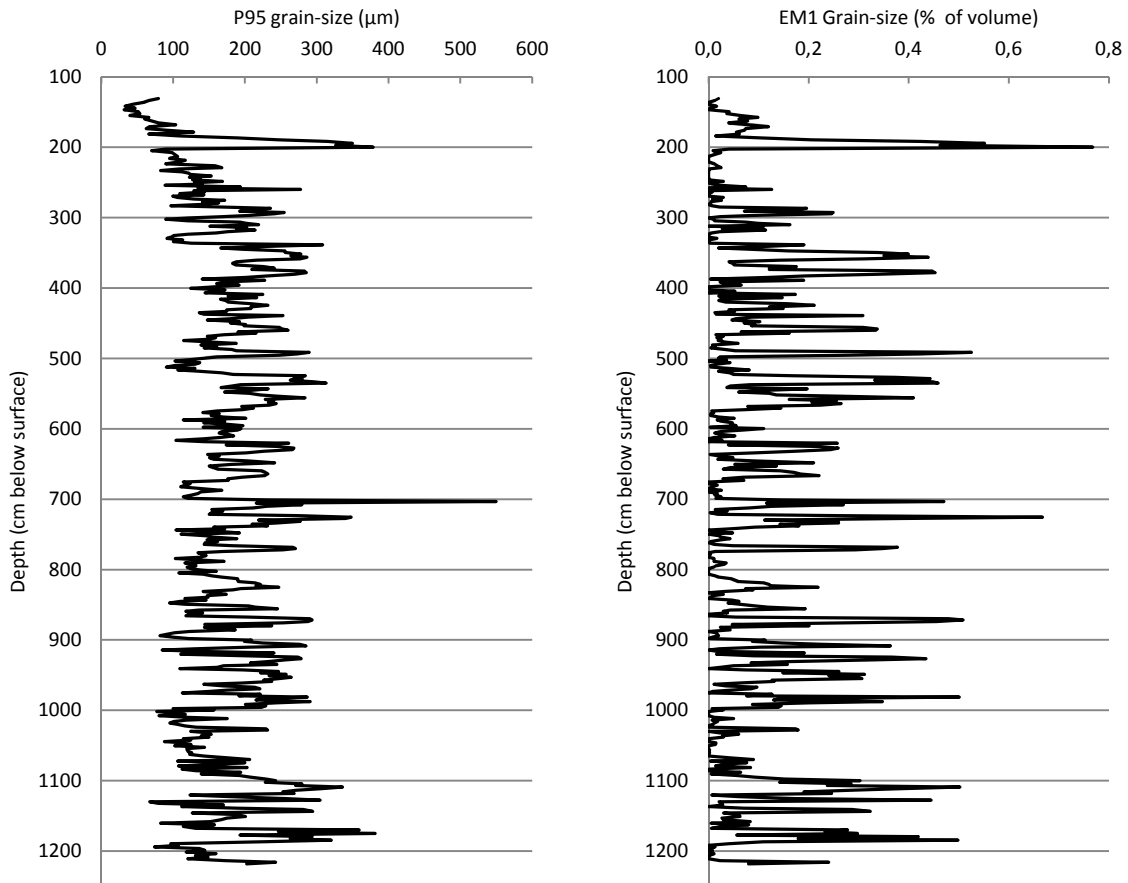


Figure Am_3: Plots of unprocessed grain-size information.

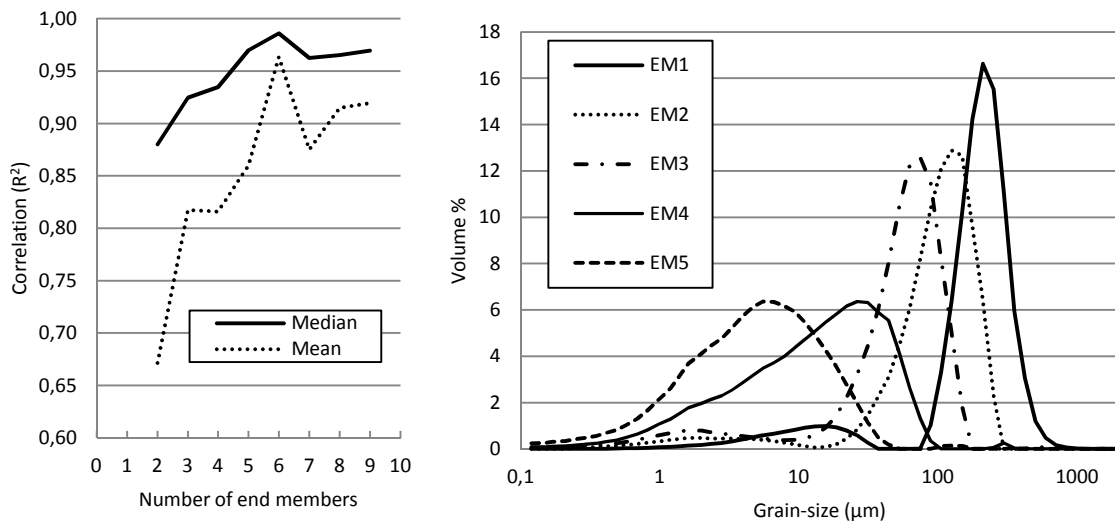


Figure Am_4: Coefficients of determination for End Member Models using a different number of end members (left) and the characteristic grain-size distribution of end members in the adopted 5-end member model.

Table Am_1: Change points (change point analysis; Taylor, 2000) used to normalise phasing in sedimentary data.

Am P95	Confidence level	>95%		Am EMM	Confidence level	>95%
	Data grouping	n = 2			Data grouping	n = 1
	Identified change points	348 cm			Identified change points	none

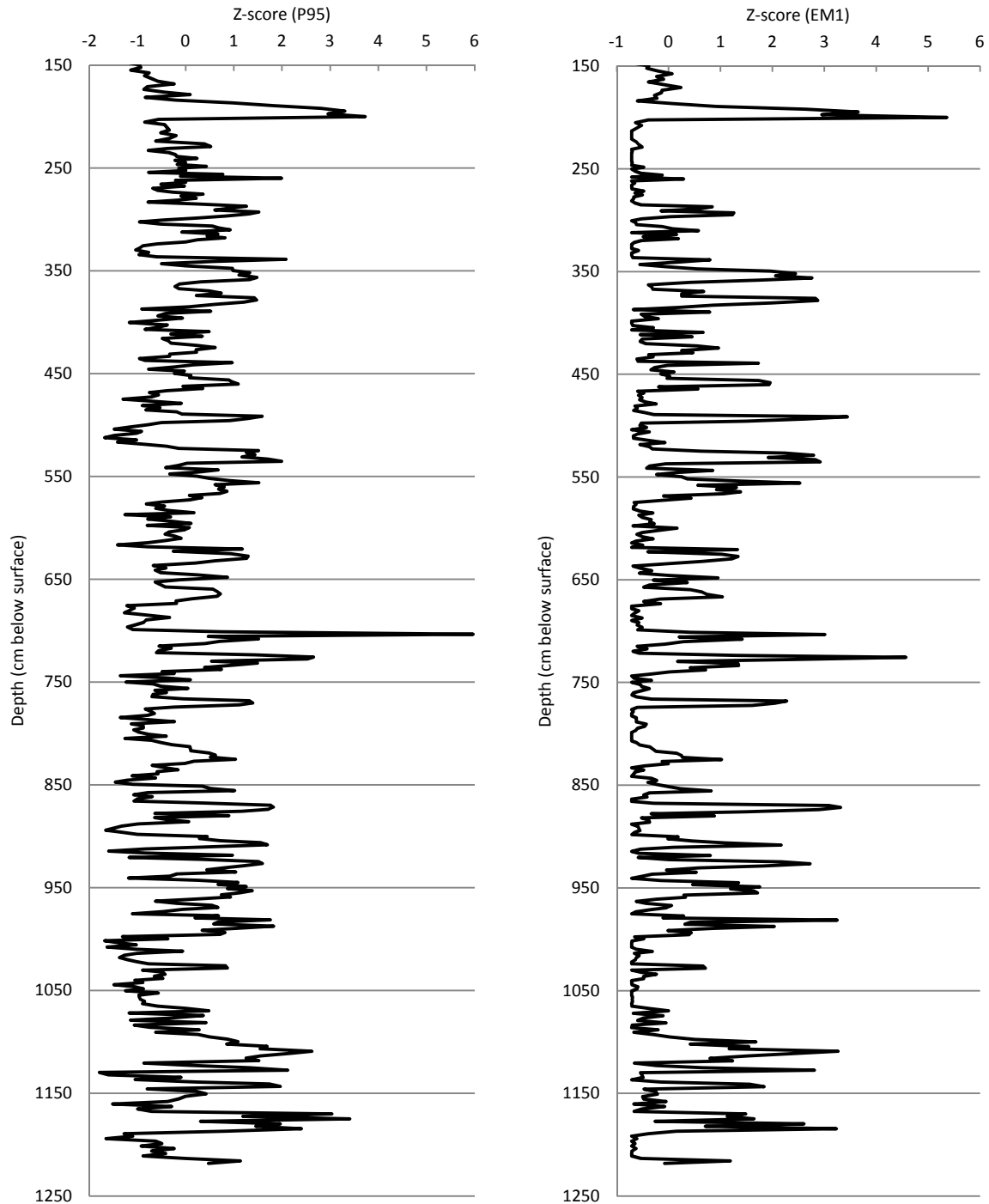


Figure Am_5: Normalised Z-scored grain-size data.

Table Am_2: Age information for Amerongen.

Depth (cm)	Type	Description	Age (range)	Source/Lab-code
0	Personal observation	Current floodplain surface	AD 2012	n.a.
53	Palaeomagnetism	Inclination/declination of clay deposits	AD 1670 ± 30	Huisman & Bas, 2013. de Groot et al., 2014.
0-100	Archaeology	Foundation of Castle Amerongen in infilled channel depression (only possible due to shallowing lake)	AD 1286	Van Kempen, 2004.
0-150	Palynology	Gradual reduction in tree cover due to deforestation since the 14 th century and completed in the 17 th century.	AD 1350-1650	Feijen, 2011. Huisman & Bas, 2013.
100	Palaeomagnetism	Inclination/declination of clay deposits	AD 1325 ± 35	Huisman & Bas, 2013. de Groot et al., 2014.
117	AMS ¹⁴ C dating	<i>Salix</i> (twigs and bud scales), leaf fragments	AD 1115 ± 57	GrA-54356
150	Palaeogeography	Southward relocation of the Amerongen channel	~AD 1100	Feijen, 2011.
187	AMS ¹⁴ C dating	<i>Salix</i> (twigs and bud scales), leaf fragments	AD 829 ± 46	GrA-54357
196	Palaeomagnetism	Inclination/declination of clay deposits	AD 730 ± 50	Huisman & Bas, 2013. de Groot et al., 2014.
397	AMS ¹⁴ C dating	Leaf fragments	AD 876 ± 71	GrA-54915
649	AMS ¹⁴ C dating	<i>Alnus</i> (bud scales), <i>Carex</i> (membrane), leaf fragments	AD 627 ± 19	SUERC-40329
1111	AMS ¹⁴ C dating	<i>Fagus</i> (leaves)	AD 624 ± 19	SUERC-40330
1220	Palaeogeography	Local river avulsion ~5 km upstream.	~AD 750	Berendsen & Stouthamer, 2001

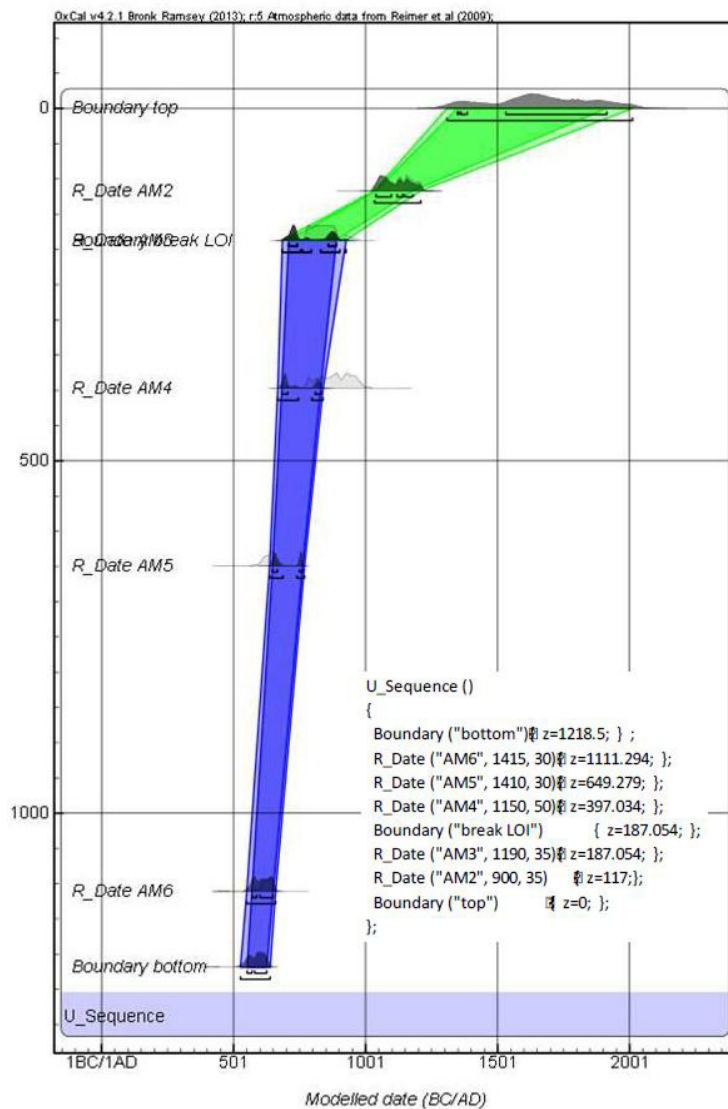


Figure Am_6: Oxcal age-depth model of Amerongen (Bronk Ramsey, 2009; Reimer et al., 2009).

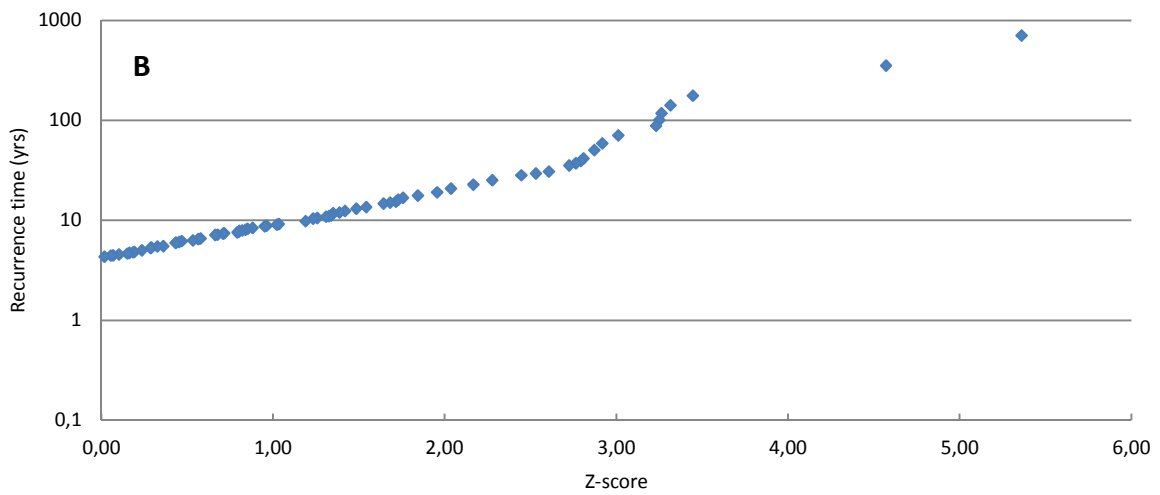
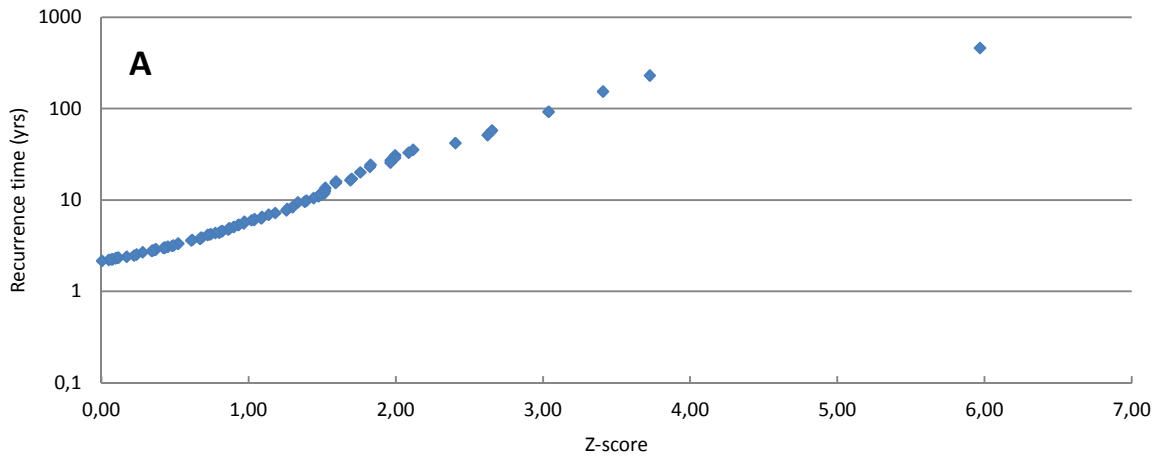


Figure Am_7: Recurrence time versus Z-score plots. The upper graph (A) shows the distribution for P95, the lower graph (B) for EM1.

Table Am_3: Regression formula and determination coefficients for calculated recurrence time versus Z-scores. The regression formula have been used to assess the recurrence times of largest events.

Data	Regression formula	R ²
P95 Z>1	$t = 2.565e^{1.074x}$	0.91
EM1 Z>1	$t = 2.565e^{1.066x}$	0.97

Site: **Visveld**
 Abbreviation: Vv
 Type: Infilled palaeochannel
 Town: Lent (Nijmegen)
 Country: Netherlands
 Coordinates: 51.8733 N; 5.8616 E.
 Elevation: 9.0 m +O.D.
 Begin flood registration: ~1350 BC
 End flood registration: ~AD 900

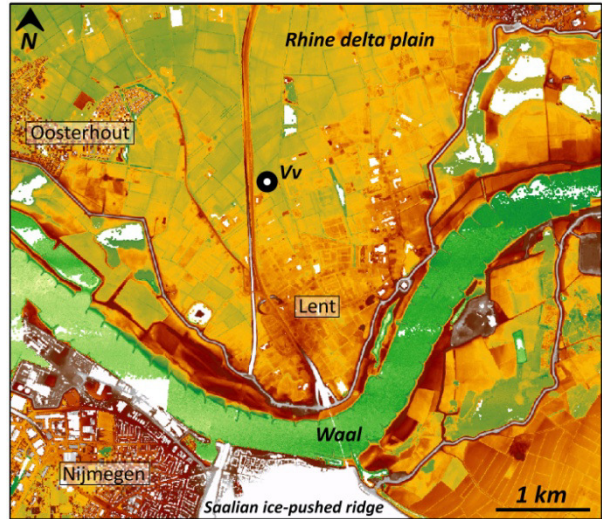


Figure Vv_1: Close-up DEM of the palaeochannel research location. Green colours indicate relative low elevations, white indicate high elevations (Rijkwaterstaat-AGI, 2005).

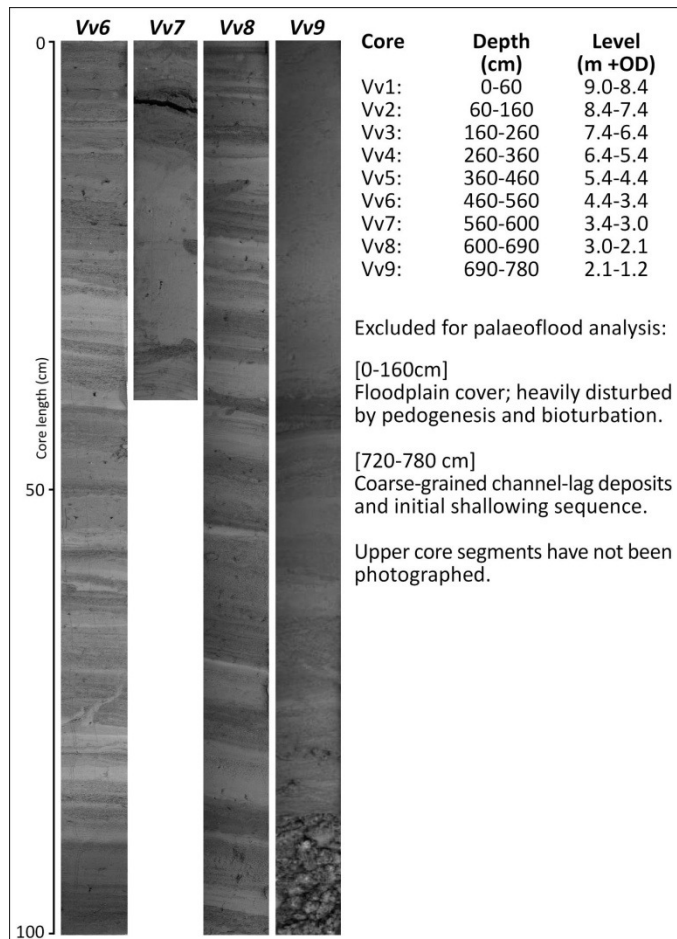


Figure Vv_2: Photos of core segments with depth information and intervals used for palaeoflood analysis.

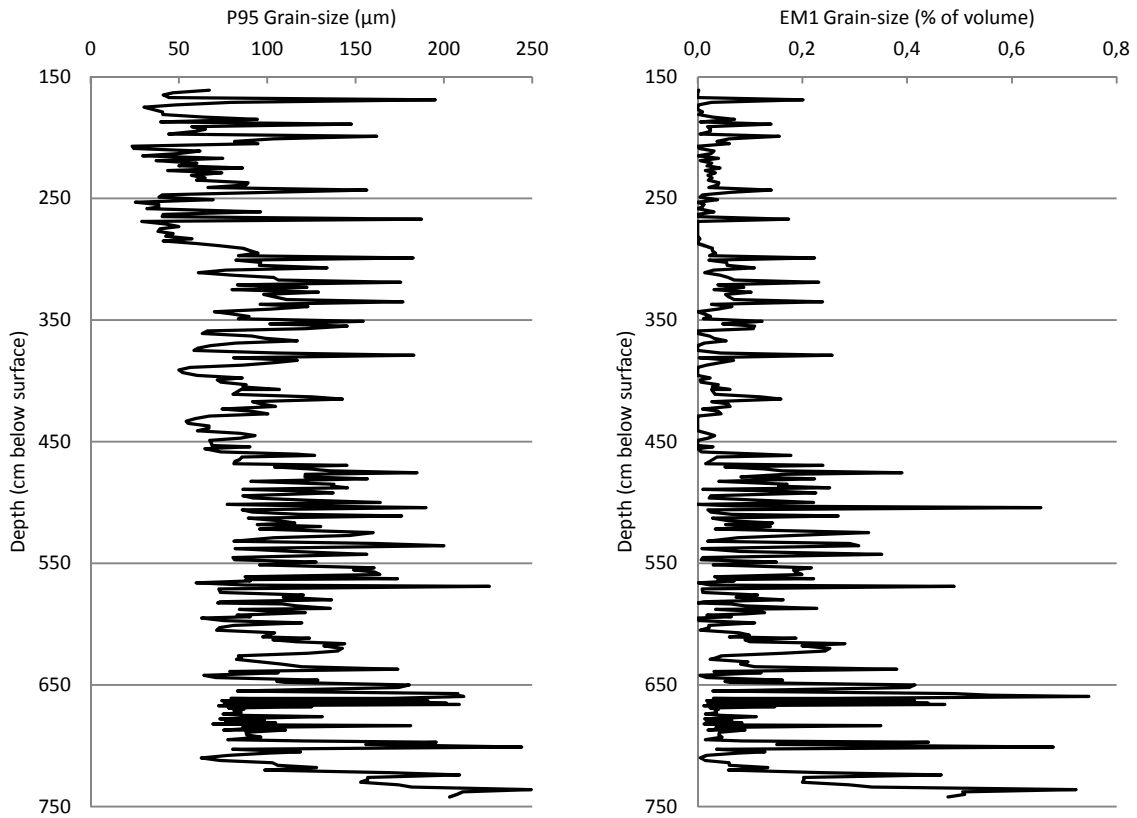


Figure Vv_3: Plots of unprocessed grain-size information.

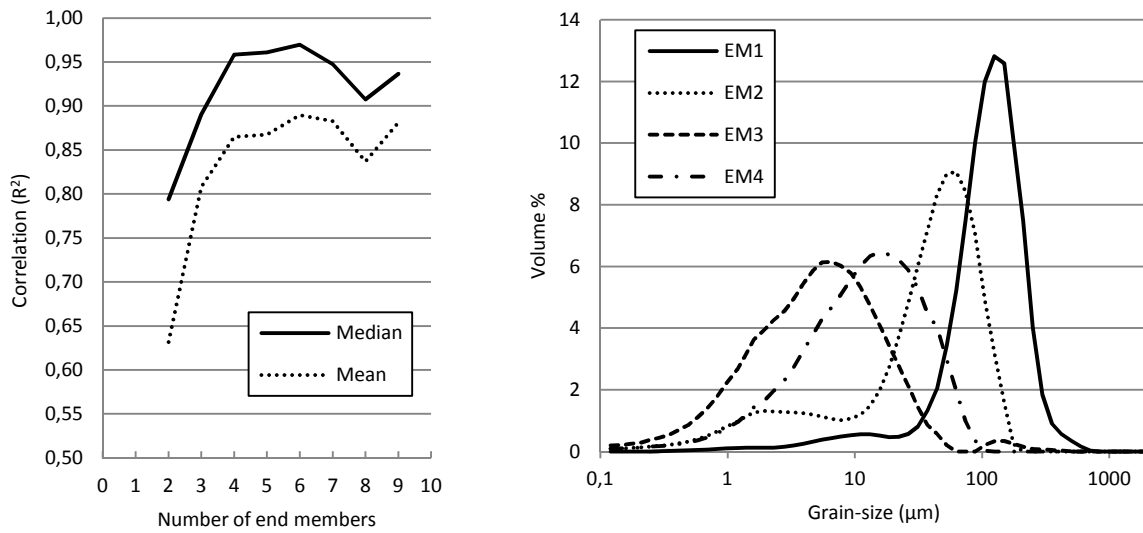


Figure Vv_4: Coefficients of determination for End Member Models using a different number of end members (left) and the characteristic grain-size distribution of end members in the adopted 4-end member model.

Table Vv_1: Change points (change point analysis; Taylor, 2000) used to normalise phasing in sedimentary data.

Vv P95	Confidence level	>95%		Vv EMM	Confidence level	>95%
	Data grouping	n = 1			Data grouping	n = 2
	Identified change points	291 468 720 cm			Identified change points	291 468 720 cm

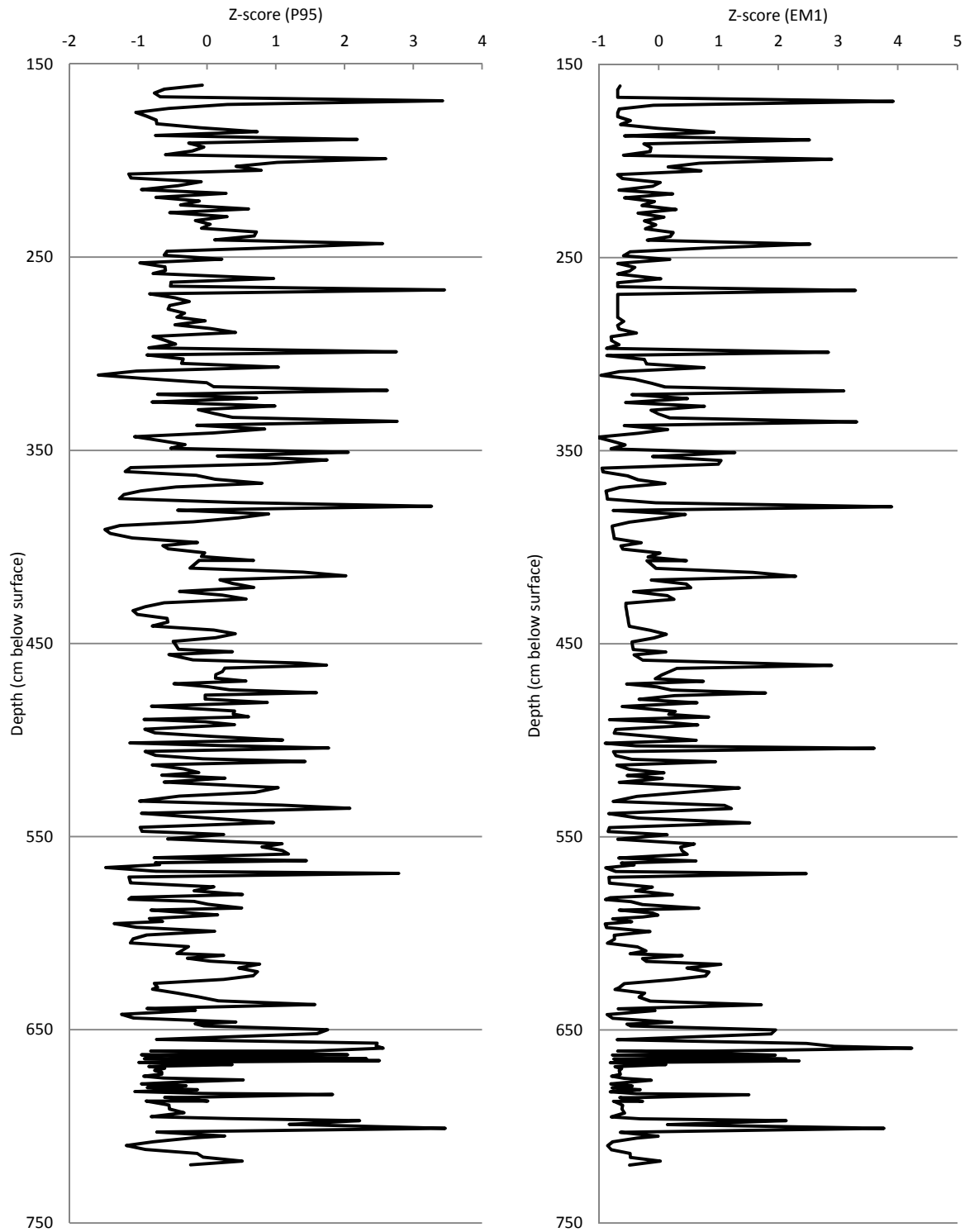


Figure Vv_5: Normalised Z-scored grain-size data.

Table Vv_2: Age information for Visveld.

Depth (cm)	Type	Description	Age (range)	Source/Lab-code
0	Present surface	Floodplain deposition halted by closure of dyke-rings	~AD 1300	Hesselink, 2002.
160	Archaeology	Palaeosol/surface associated with Late Roman period; stratigraphic correlation with levee occupation/archaeology.	AD 100-500	Pers. comm. E. Heunks
375	AMS ¹⁴ C dating	Seeds: <i>Rorippa palustris</i> , <i>Poaceae indet.</i> , <i>Alisma plantago aquatic</i> , <i>Ranunculus acris/repens</i> .	AD 422 ± 117	GrA-50884
450	AMS ¹⁴ C dating	Seeds: <i>Eleocharis palustris</i> , <i>Rorippa palustris</i> , <i>Rumex sp.</i> , leaf fragments, charcoal.	1047 ± 75 BC	GrA-54918
551	AMS ¹⁴ C dating	<i>Alnus</i> (male catskin), Seeds: <i>Rorippa palustris</i> , <i>Juncus sp.</i> , <i>Lysimacha sp.</i> , <i>Polygonum sp.</i> , <i>Poaceae sp.</i> , leaf fragments.	1116 ± 76 BC	GrA-54921
756	AMS ¹⁴ C dating	Leaf fragments	1245 ± 414 BC	GrA-50885
780	Palaeogeography	Channel belt activity in the same region	~2500-1000 BC	Van den Broeke et al., 2010.

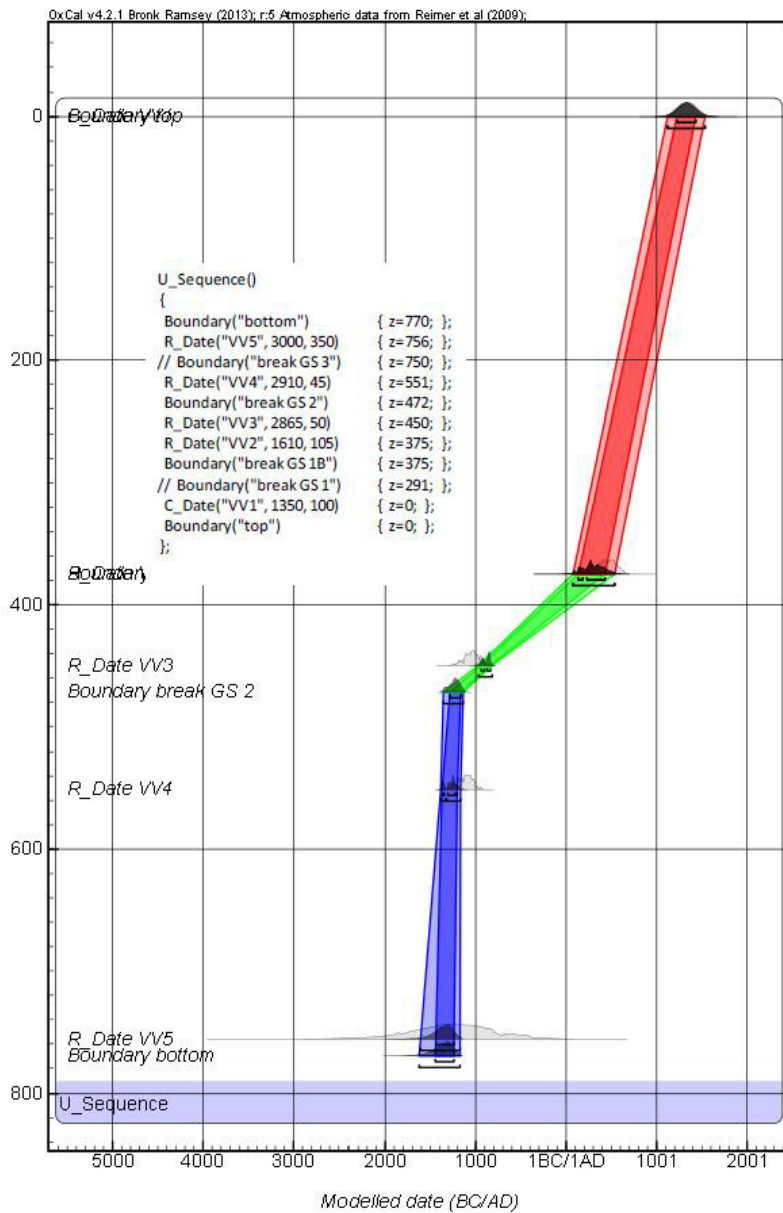


Figure Vv_6: Oxcal age-depth model of Visveld (Bronk Ramsey, 2009; Reimer et al., 2009).

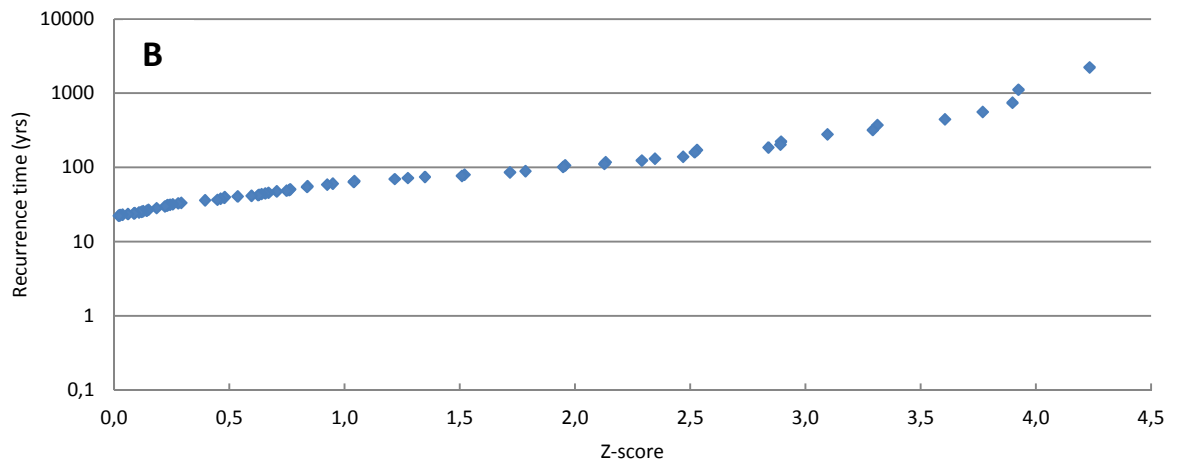
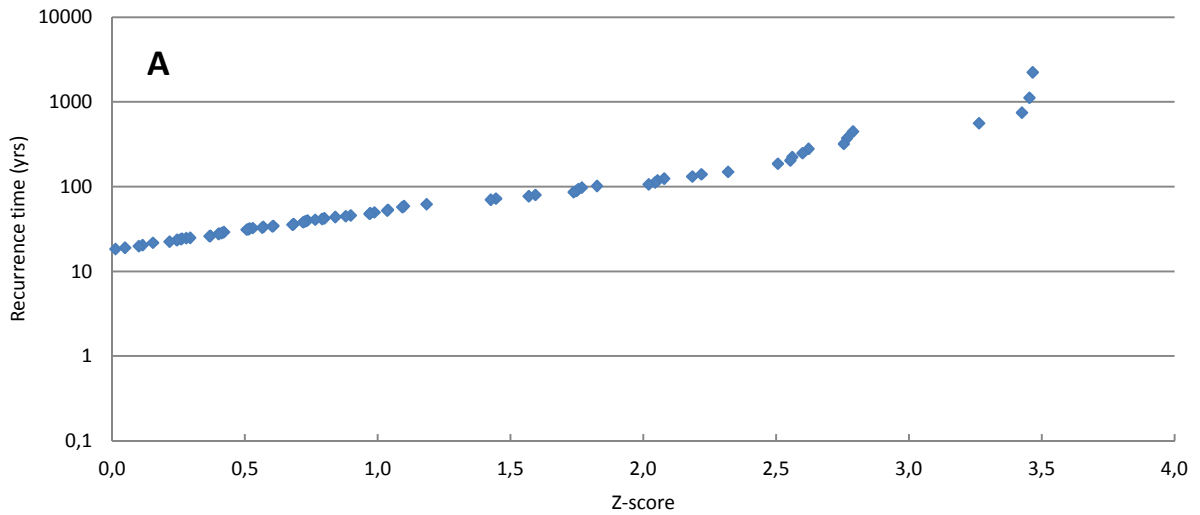


Figure Vv_7: Recurrence time versus Z-score plots. The upper graph (A) shows the distribution for P95, the lower graph (B) for EM1.

Table Vv_3: Regression formula and determination coefficients for calculated recurrence time versus Z-scores. The regression formula have been used to assess the recurrence times of largest events.

Data	Regression formula	R ²
P95 Z>1	$t = 11.334e^{1.237x}$	0.92
EM1 Z>1	$t = 18.003e^{0.935x}$	0.92

Site: **Rheinberg**
 Abbreviation: Rb
 Type: Infilled palaeochannel
 Town: Rheinberg
 Country: Germany
 Coordinates: 51.5407 N; 6.6155 E.
 Elevation: 20.8 m +O.D.
 Begin flood registration: ~2725 BC
 End flood registration: ~1810 BC

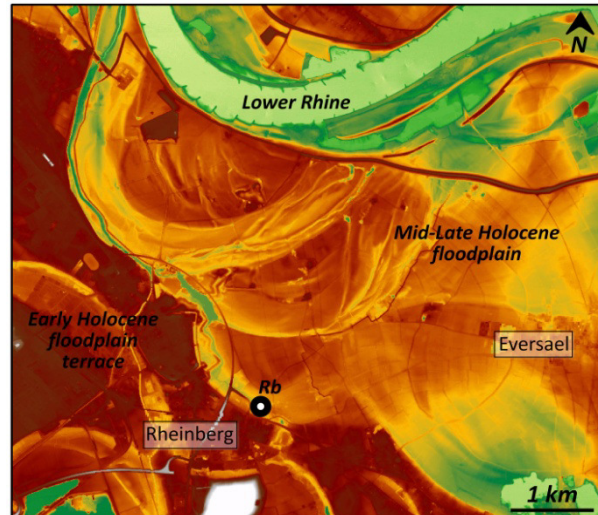


Figure Rb_1: Close-up DEM of the palaeochannel research location. Green colours indicate relative low elevations, white indicate high elevations (Landvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, as used in Erkens et al., 2011).

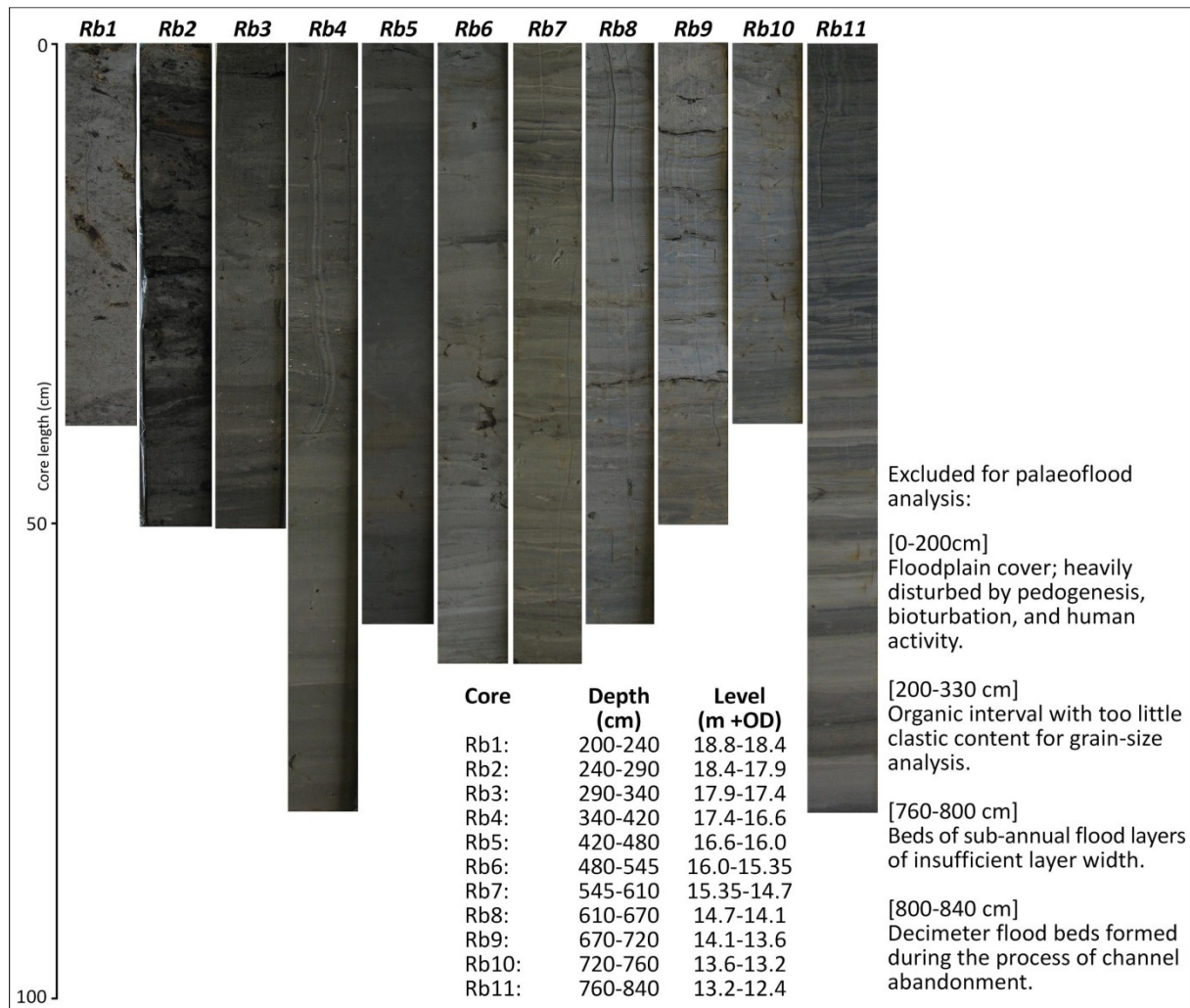


Figure Rb_2: Photos of core segments with depth information and intervals used for palaeoflood analysis.

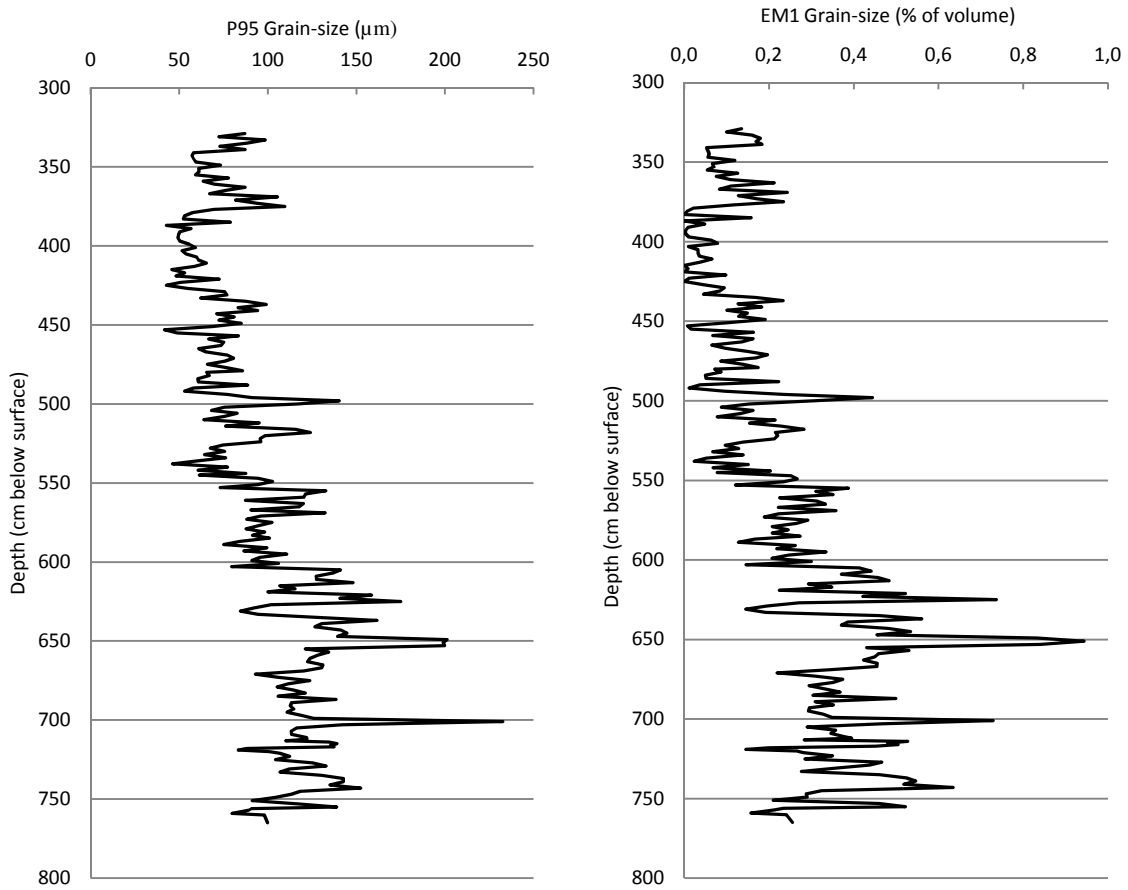


Figure Rb_3: Plots of unprocessed grain-size information.

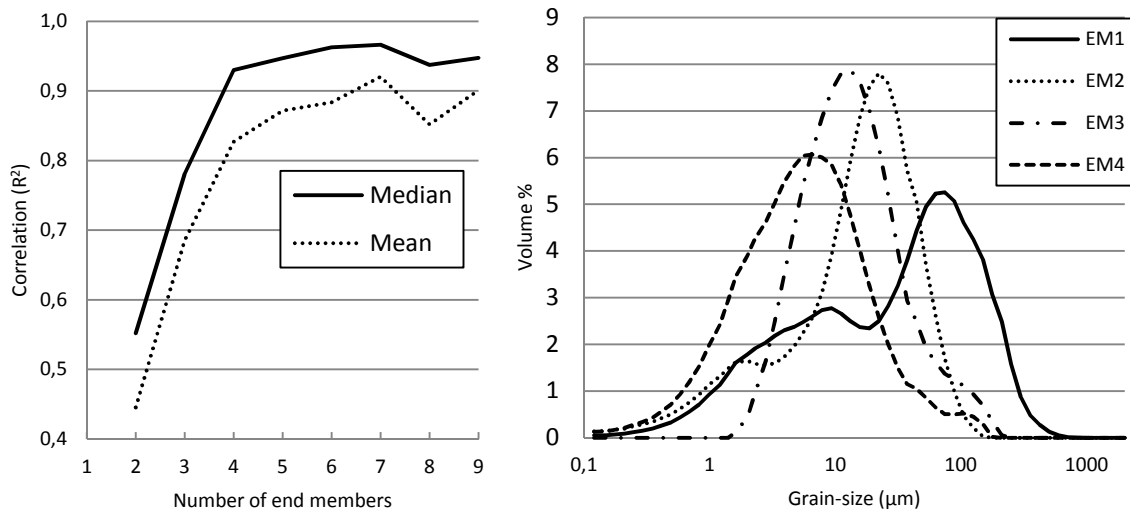


Figure Rb_4: Coefficients of determination for End Member Models using a different number of end members (left) and the characteristic grain-size distribution of end members in the adopted 4-end member model.

Table Rb_1: Change points (change point analysis; Taylor, 2000) used to normalise phasing in sedimentary data.

Rb P95	Confidence level	>95%		Rb EMM	Confidence level	>95%
	Data grouping	n = 2			Data grouping	n = 2
	Identified change points	377 526 663 cm			Identified change points	377 526 663 cm

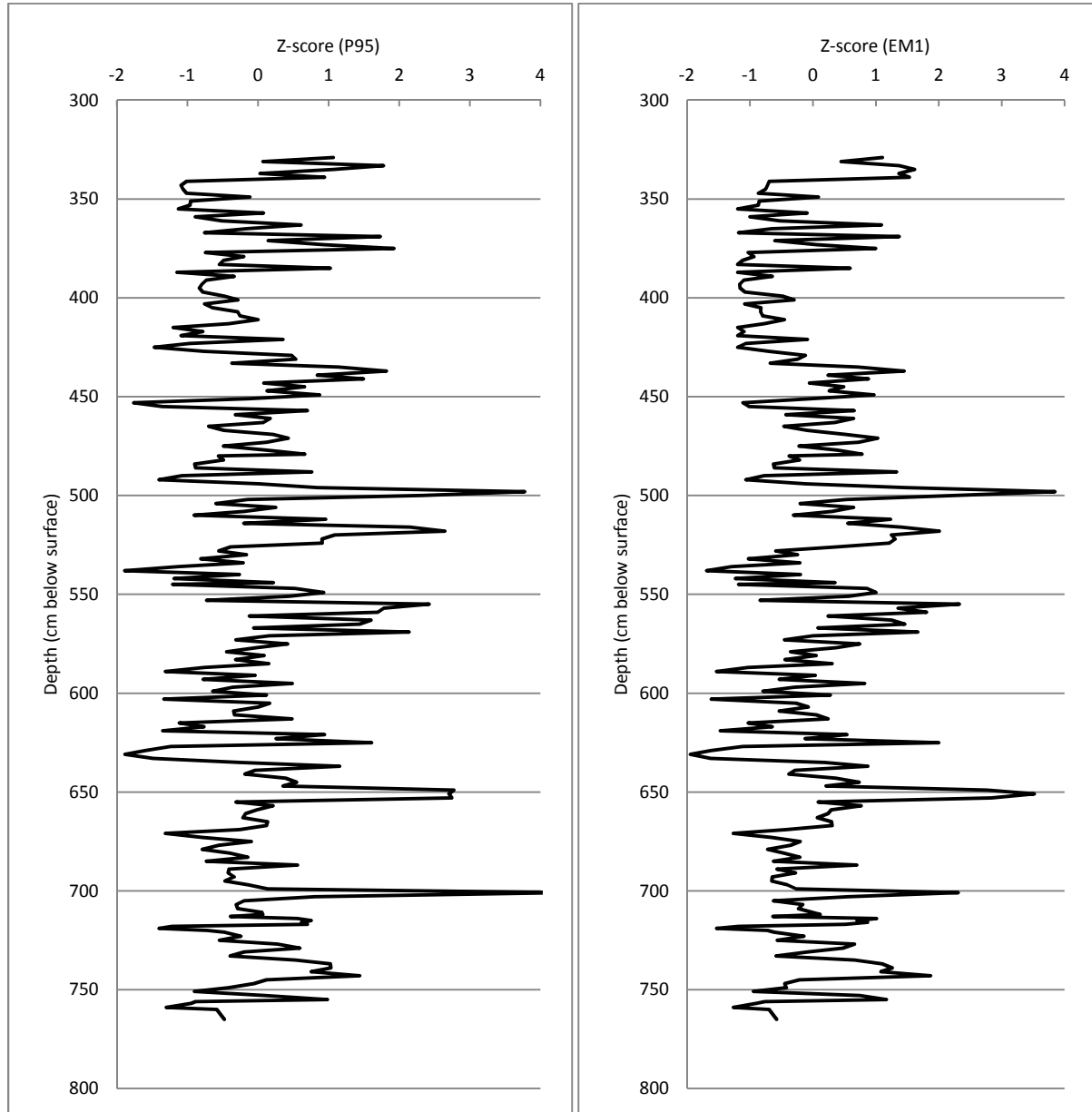


Figure Rb_5: Normalised Z-scored grain-size data.

Table Rb_2: Age information for Rheinberg.

Depth (cm)	Type	Description	Age (range)	Source/Lab-code
245	AMS ¹⁴ C dating	<i>Alnus</i> (fruits and bud scales)	1080 ± 53 BC	GrA-44329
275	AMS ¹⁴ C dating	<i>Alnus</i> (fruits and bud scales), <i>Mentha aquatica/arvensis</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Lycopus europaeus</i> , <i>Oenanthe</i> .	1229 ± 83 BC	GrA-44756
338	AMS ¹⁴ C dating	<i>Polygonum</i> , <i>Rumex</i> , <i>Sagittaria sagittifolia</i> , <i>Betula</i> (seed).	1826 ± 72 BC	GrA-44788
850	AMS ¹⁴ C dating	<i>Lythrum salicaria</i> (seed), leaf fragments.	2902 ± 110 BC	UtC-15064

Additional dating control comes from geomorphologic cross-correlations with other abandoned channels in the same area (Toonen, 2013).

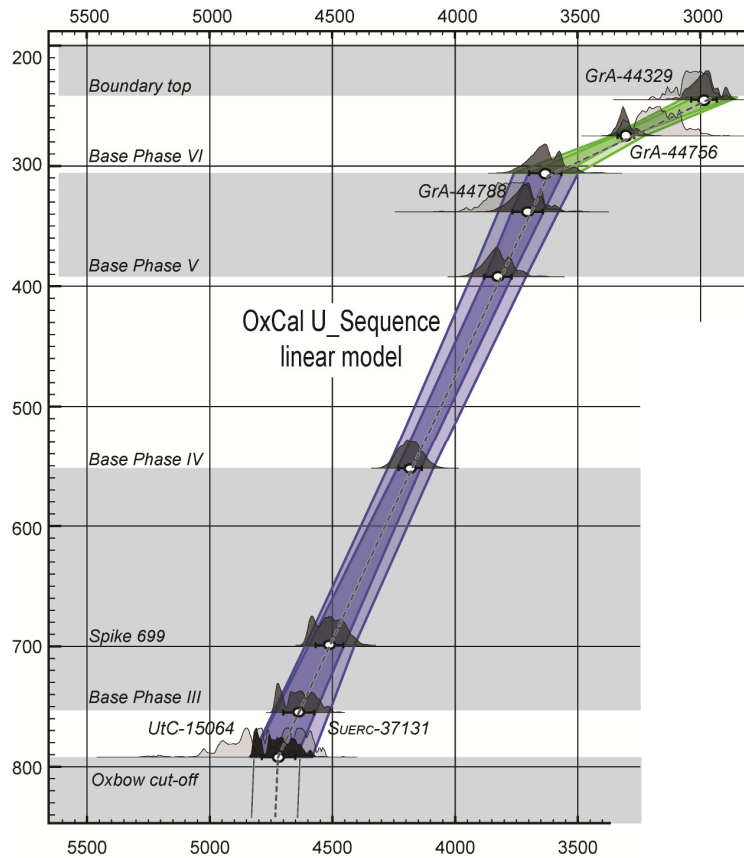


Figure Rb_6: Oxcal age-depth model of Rheinberg (Bronk Ramsey, 2009; Reimer et al., 2009; figure after Minderhoud et al., 2013).

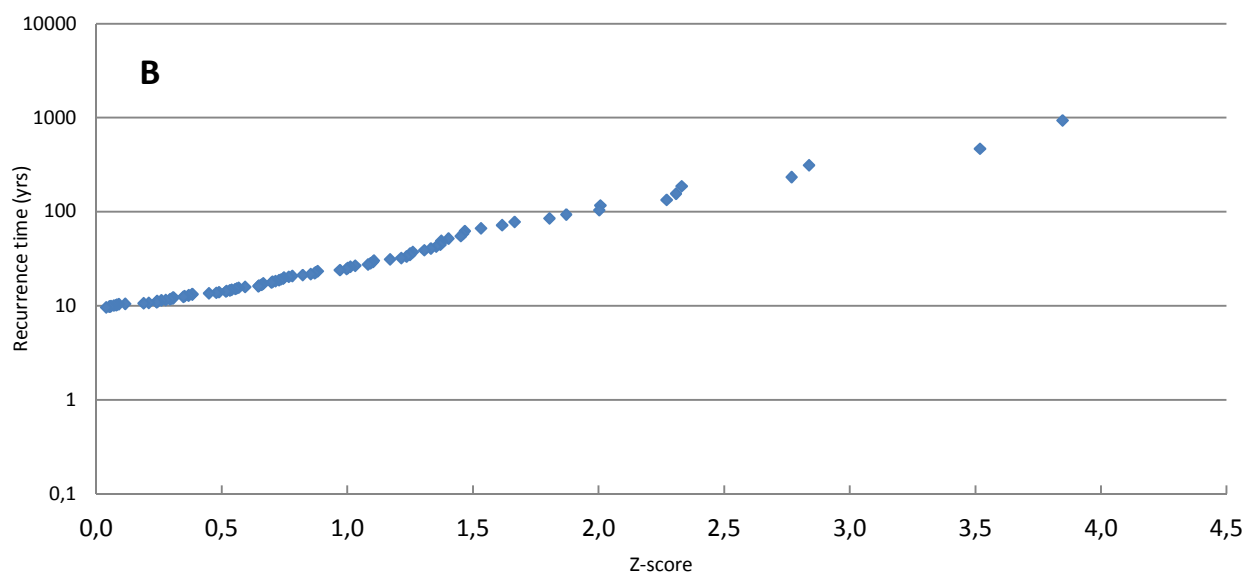
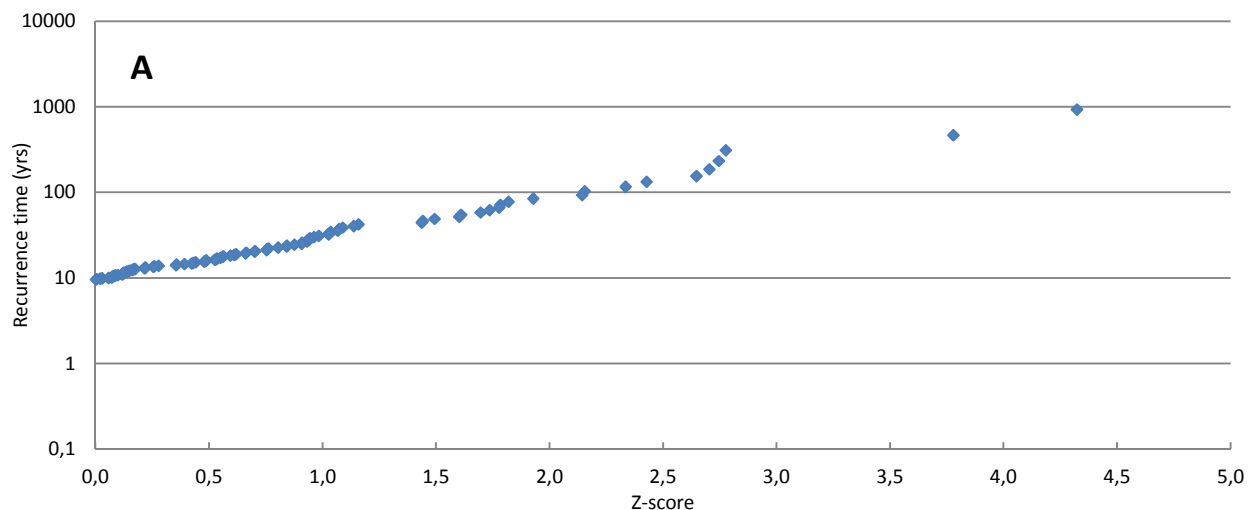


Figure Rb_7: Recurrence time versus Z-score plots. The upper graph (A) shows the distribution for P95, the lower graph (B) for EM1.

Table Rb_3: Regression formula and determination coefficients for calculated recurrence time versus Z-scores. The regression formula have been used to assess the recurrence times of largest events.

Data	Regression formula	R ²
P95 Z>1	$t = 11.630e^{1.018x}$	0.98
EM1 Z>1	$t = 7.948e^{1.260x}$	0.98

Site: **Schloss Bellinghoven**
 Abbreviation: SB
 Type: Infilled palaeochannel
 Town: Mehr
 Country: Germany
 Coordinates: 51.7438 N; 6.4888 E.
 Elevation: 10.0 m +O.D.
 Begin flood registration: ~5000 BC
 End flood registration: ~AD 1000

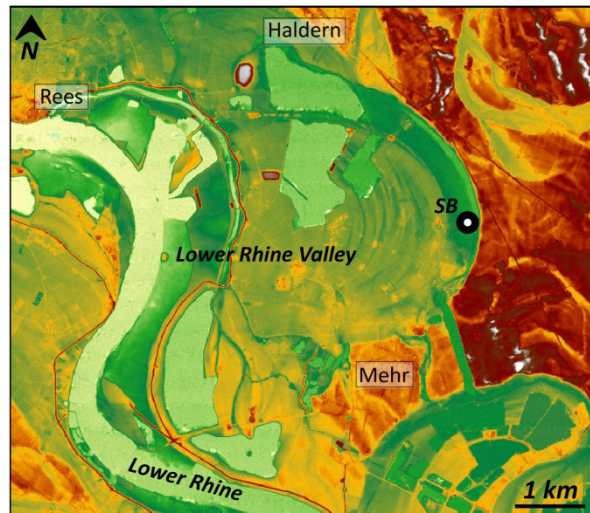


Figure SB_1: Close-up DEM of the palaeochannel research location. Green colours indicate relative low elevations, white indicate high elevations (Landvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, as used in Cohen et al., 2009).

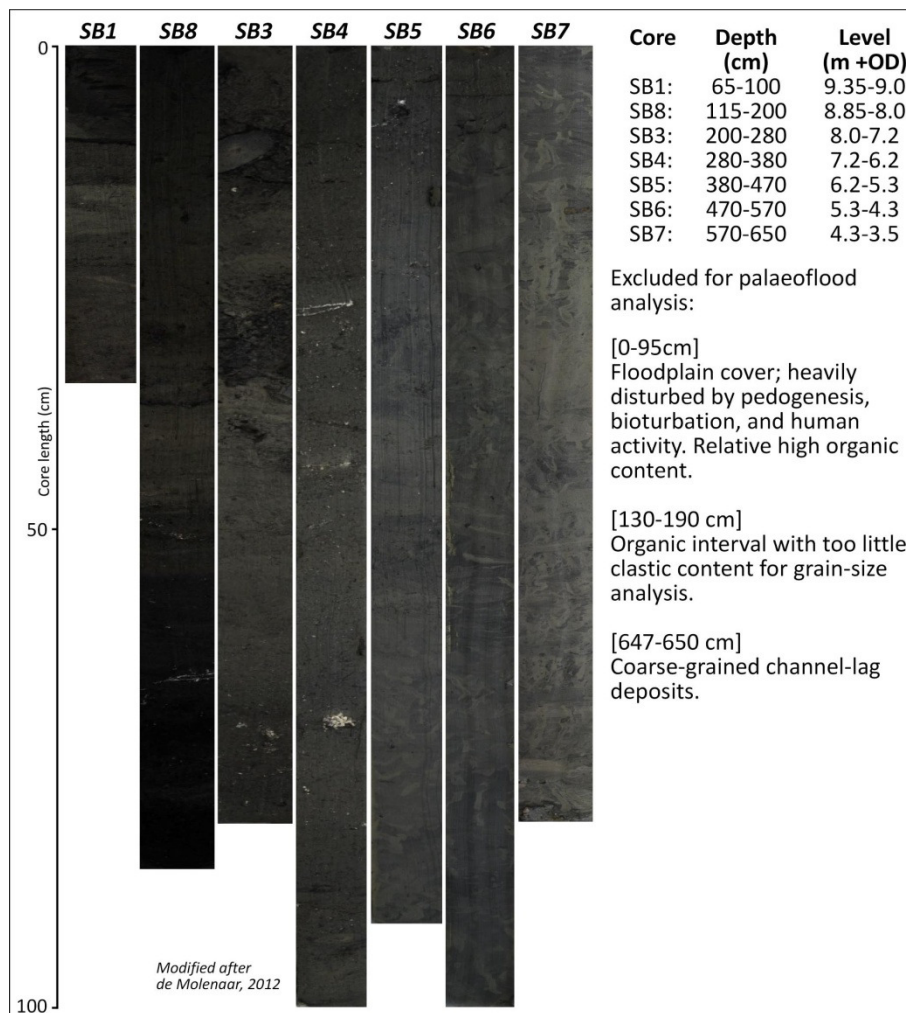


Figure SB_2: Photos of core segments with depth information and intervals used for palaeoflood analysis.

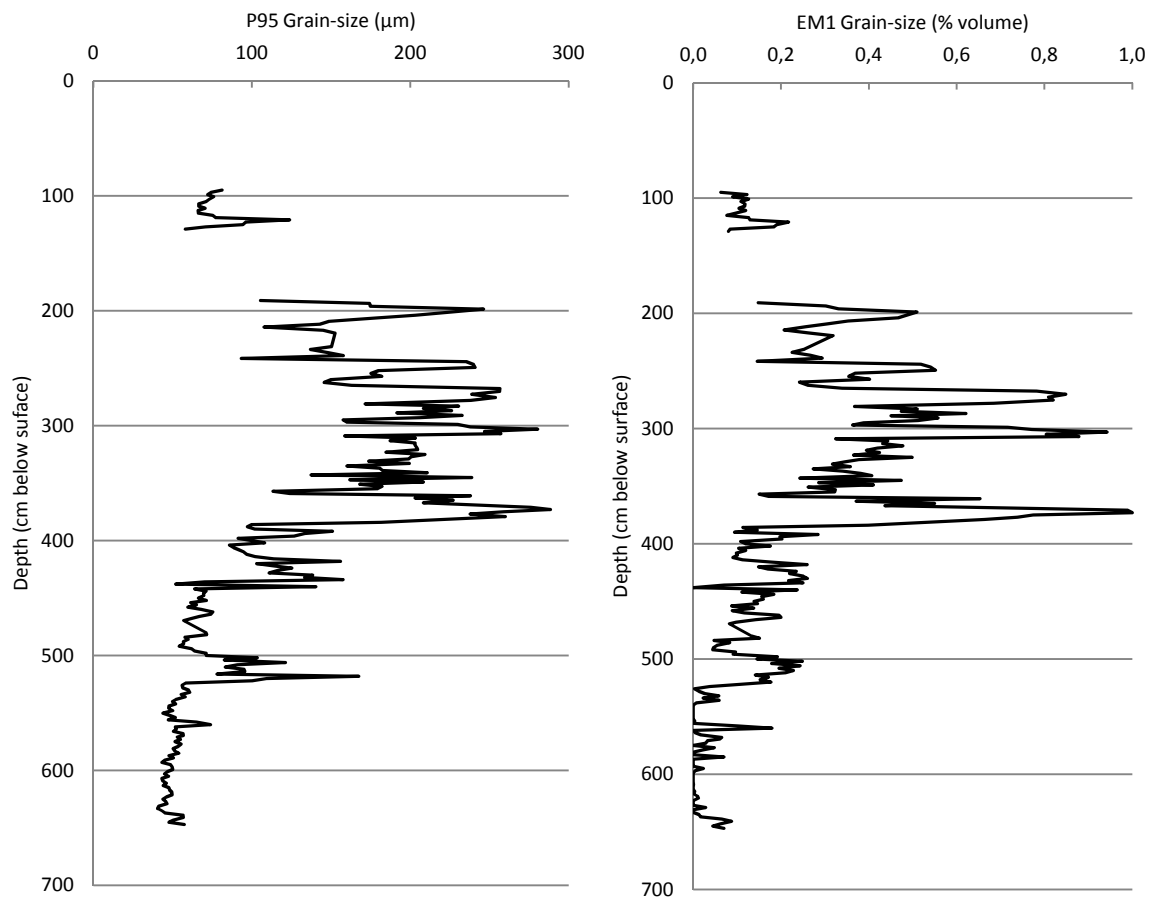


Figure SB_3: Plots of unprocessed grain-size information.

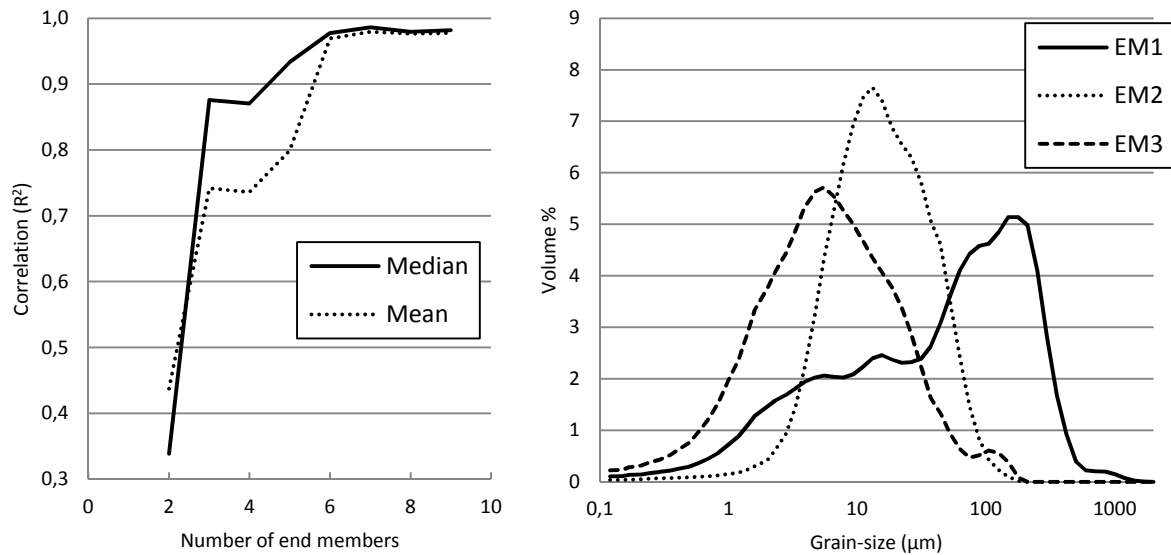


Figure SB_4: Coefficients of determination for End Member Models using a different number of end members (left) and the characteristic grain-size distribution of end members in the adopted 3-end member model.

Table SB_1: Change points (change point analysis; Taylor, 2000) used to normalise phasing in sedimentary data.

SB P95	Confidence level	>95%		SB EMM	Confidence level	>95%
	Data grouping	n = 3			Data grouping	n = 1
	Identified change points	191 386 436 498 524 587 cm			Identified change points	287 386 490 520 cm

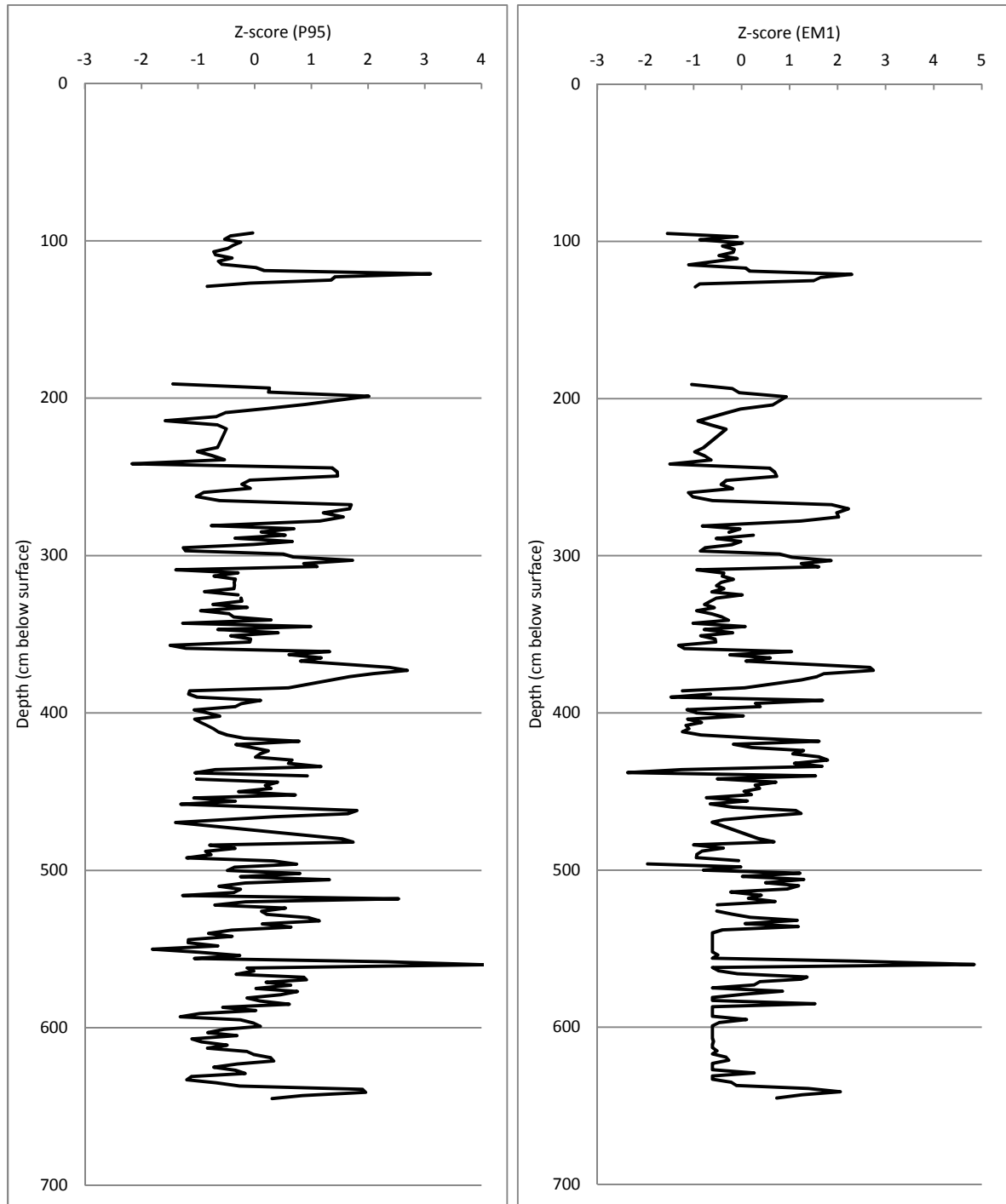


Figure SB_5: Normalised Z-scored grain-size data.

Table SB_2: Age information for Schloss Bellinghoven.

Depth (cm)	Type	Description	Age (range)	Source/Lab-code
87	AMS ¹⁴ C dating	Seeds: <i>Cicuta virosa</i> , <i>Rorippa amphibia</i> , <i>Epilobium palustre</i> , <i>Ranunculus sceleratus</i> , <i>Carex</i> cf. <i>rostrata</i> (leaf fragments and bud scales), <i>Spongilla lacustris</i> , <i>Menyanthes trifoliata</i> .	AD 1055 ± 48	SUERC-40328
194	AMS ¹⁴ C dating	<i>Alnus</i> (female cat skin).	AD 616 ± 23	GrA-54340
232	AMS ¹⁴ C dating	<i>Alnus</i> (male cat skin and leaf fragments). Seeds: <i>Stellaria media</i> , <i>Oenanthe aquatica</i> , <i>Alisma plantago</i> , <i>Alnus glutinosa</i> , <i>Scirpus lacustris</i> , <i>Sagittaria sagittifolia</i> , <i>Rorippa palustris</i> .	1006 ± 64 BC	GrA-54923
329	AMS ¹⁴ C dating	Seeds: <i>Alnus glutinosa</i> , <i>Alisma plantago-aquatica</i> , <i>Schoenoplectus lacustris</i> .	1535 ± 49 BC	SUERC-37139
526	AMS ¹⁴ C dating	<i>Carex</i> sect. <i>Acute</i> (seed and leaf fragments).	3730 ± 78 BC	GrA-54919

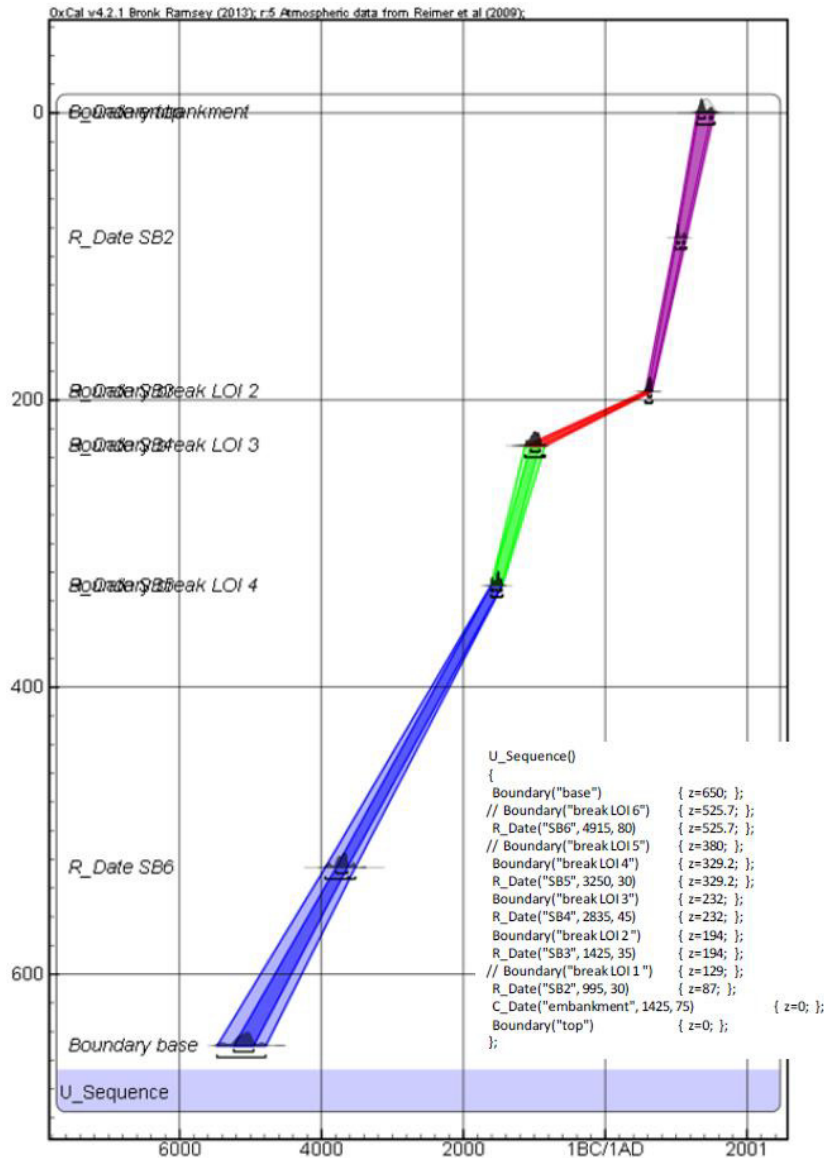


Figure SB_6: Oxcal age-depth model of Schloss Bellinghoven (Bronk Ramsey, 2009; Reimer et al., 2009).

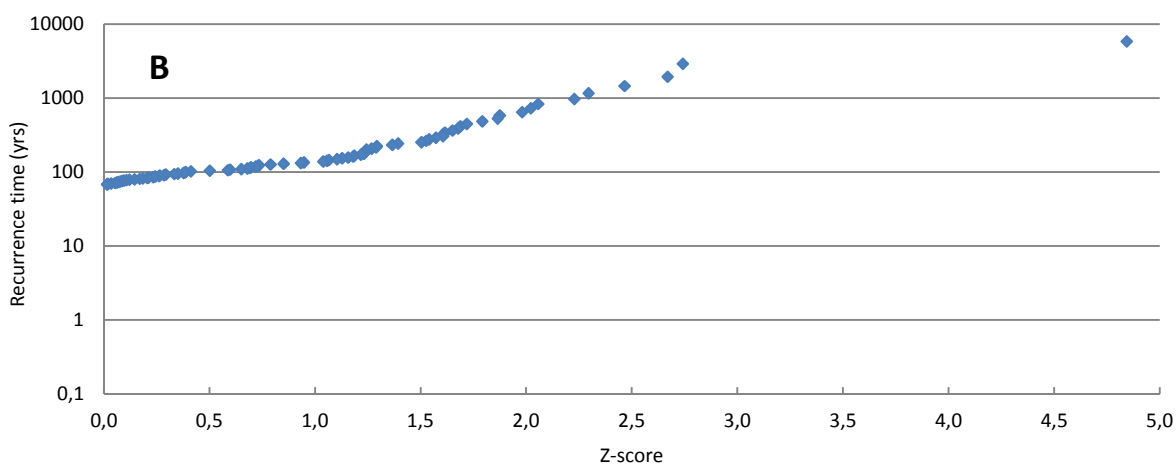
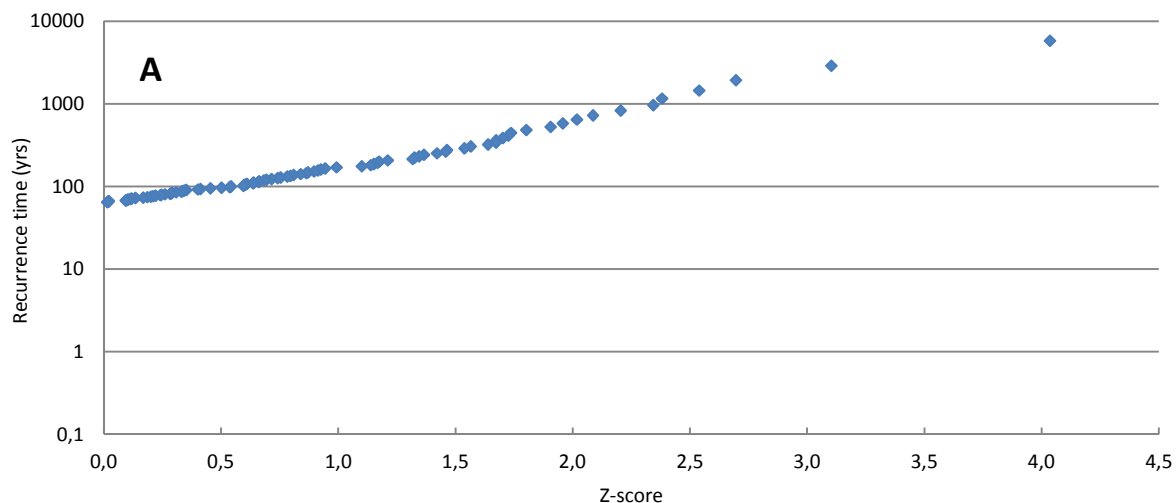


Figure SB_7: Recurrence time versus Z-score plots. The upper graph (A) shows the distribution for P95, the lower graph (B) for EM1.

Table SB_3: Regression formula and determination coefficients for calculated recurrence time versus Z-scores. The regression formula have been used to assess the recurrence times of largest events.

Data	Regression formula	R ²
P95 Z>1	$t = 40.591e^{1.229x}$	0.98
EM1 Z>1	$t = 45.454e^{1.240x}$	0.89

Site: **Schriek**
 Abbreviation: Sc
 Type: Infilled palaeochannel
 Town: Netterden
 Country: Netherlands
 Coordinates: 51.8512 N; 6.3433 E.
 Elevation: 13.3 m +O.D.
 Begin flood registration: ~6200 BC
 End flood registration: ~4300 BC
 Remark: P90 grain-size information provided by J.F. Berger (Univ. Lyon2, France). No end member modelling due to limited data availability.

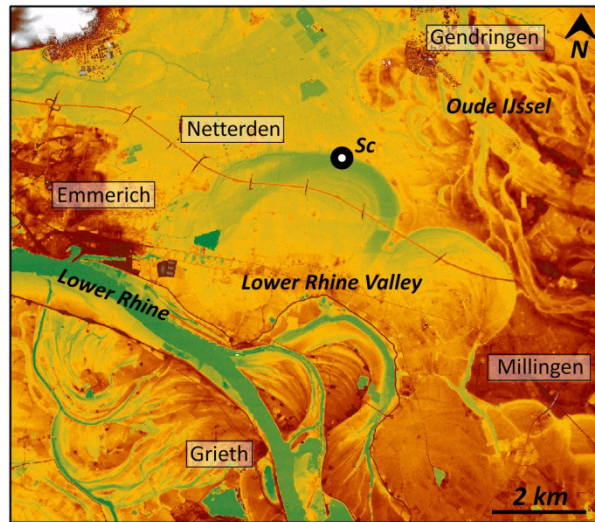


Figure Sc_1: Close-up DEM of the palaeochannel research location. Green colours indicate relative low elevations, white indicate high elevations (Rijkwaterstaat-AGI, 2005 and Landvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, as used in Cohen et al., 2009).

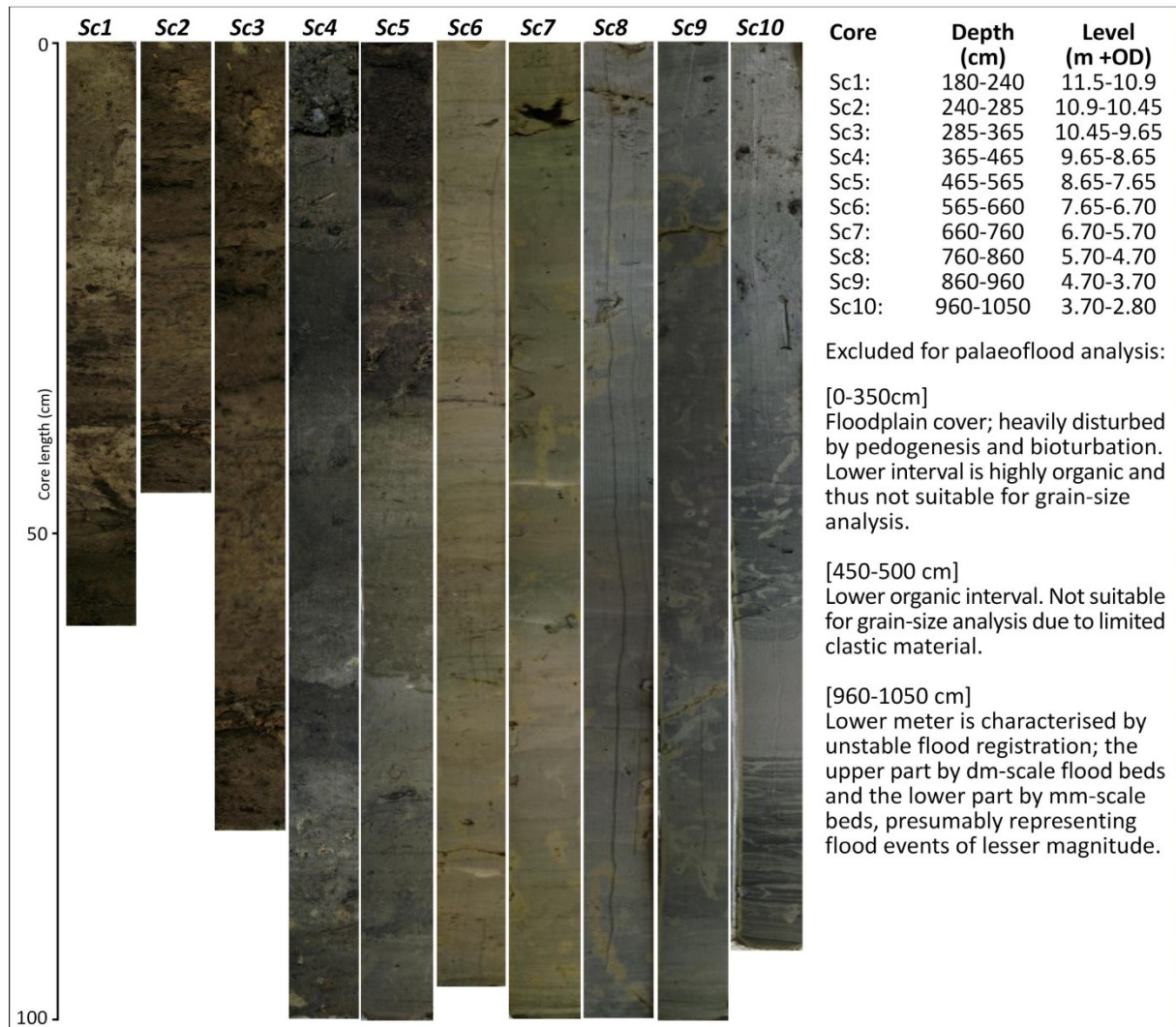


Figure Sc_2: Photos of core segments with depth information and intervals used for palaeoflood analysis.

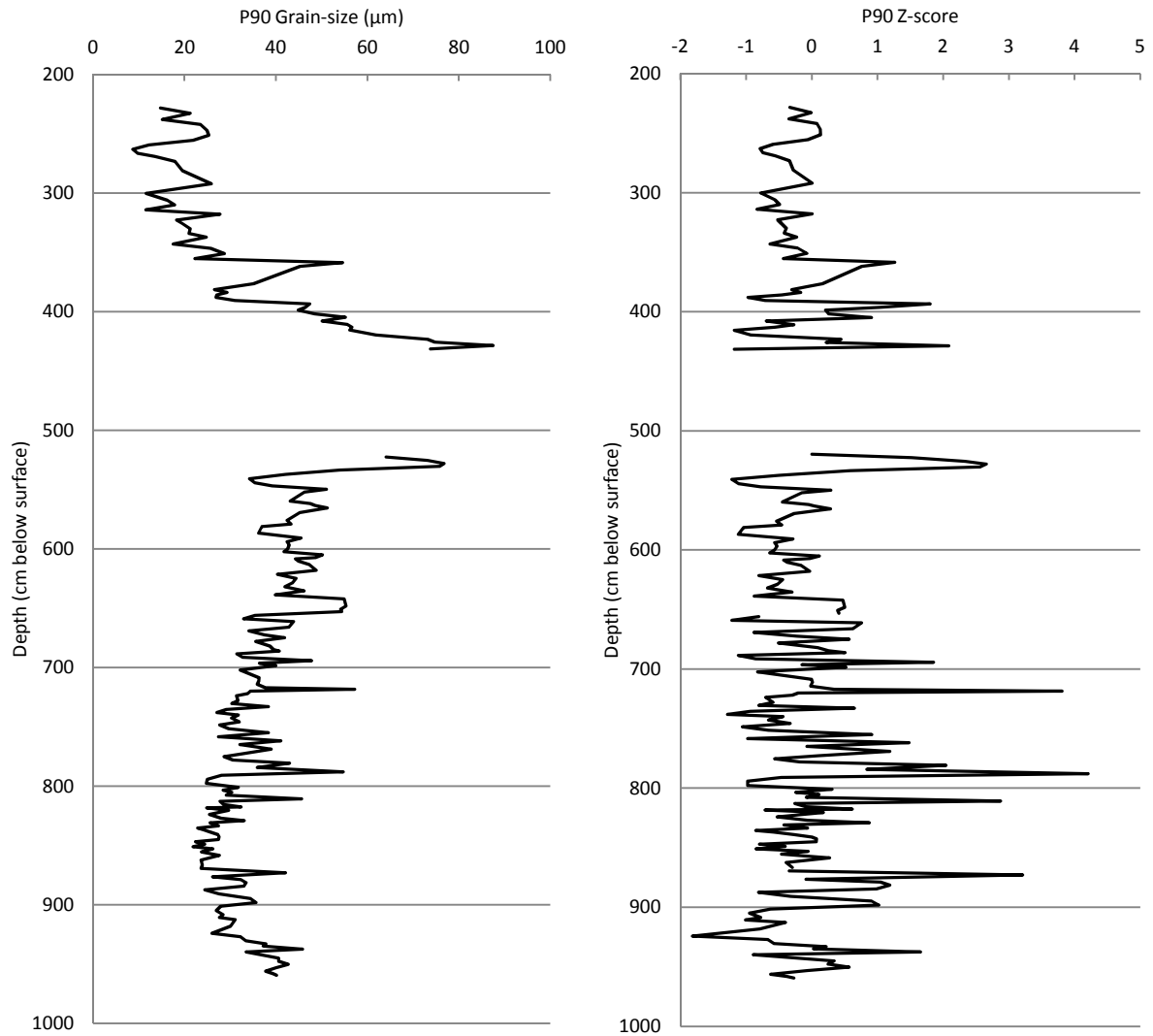


Figure Sc_3: (left) Plot of unprocessed grain-size information; Z-score conversion (right).

Table Sc_1: Change points (change point analysis; Taylor, 2000) used to normalise phasing in sedimentary data.

SB P90	Confidence level	>95%
	Data grouping	n = 1
	Identified change points	384 432 520 653 867 cm

Table Sc_2: Age information for Schriek.

Depth (cm)	Type	Description	Age (range)	Source/Lab-code
0	Present surface	Closure of main dykes, preventing flooding and deposition	AD ~1500	Estimated from historical records
216	AMS ¹⁴ C dating	<i>Alnus</i> (fruits and male catkins), leaf fragments.	2407 ± 116 BC	GrA-50905
257	AMS ¹⁴ C dating	<i>Alnus</i> (fruits and male catkin + twig), <i>Alisma plantago-aquatica</i> (seed).	2978 ± 50 BC	GrA-50005
302	AMS ¹⁴ C dating	<i>Alnus</i> (fruits, male catkins).	3792 ± 76 BC	GrA-50006
341	AMS ¹⁴ C dating	Charcoal	3912 ± 69 BC	Poz-49901
357	AMS ¹⁴ C dating	Charcoal	4333 ± 44 BC	Poz-49902
390	AMS ¹⁴ C dating	Charcoal	4543 ± 45 BC	SacA-27632
449	AMS ¹⁴ C dating	Charcoal	4915 ± 52 BC	SacA-27633

503	AMS ¹⁴ C dating	Fruit (indet.). Seeds: <i>Schoenoplectus lacustris</i> , <i>Alisma plantago-aquatica</i> , <i>Lythrum salixcaria</i> , <i>Alnus</i> (catskin).	5192 ± 85 BC	GrA-50008
514	AMS ¹⁴ C dating	Charcoal	5517 ± 27 BC	Poz-46835
620	AMS ¹⁴ C dating	Charcoal	5451 ± 80 BC	Poz-46836
700	AMS ¹⁴ C dating	Charcoal, wood particle, leaf fragments.	5722 ± 37 BC	SacA-26156
778	AMS ¹⁴ C dating	Wood particles and leaf fragments.	5951 ± 41 BC	SacA-26157
906	AMS ¹⁴ C dating	Charcoal	6253 ± 115 BC	Poz-46837
1056	AMS ¹⁴ C dating	<i>Alnus</i> (catskin), leaf fragments.	6222 ± 106 BC	GrA-50897

Samples Sc4-7/9-17; courtesy of J.F. Berger (Obresoc-project, Univ. Lyon2, France).

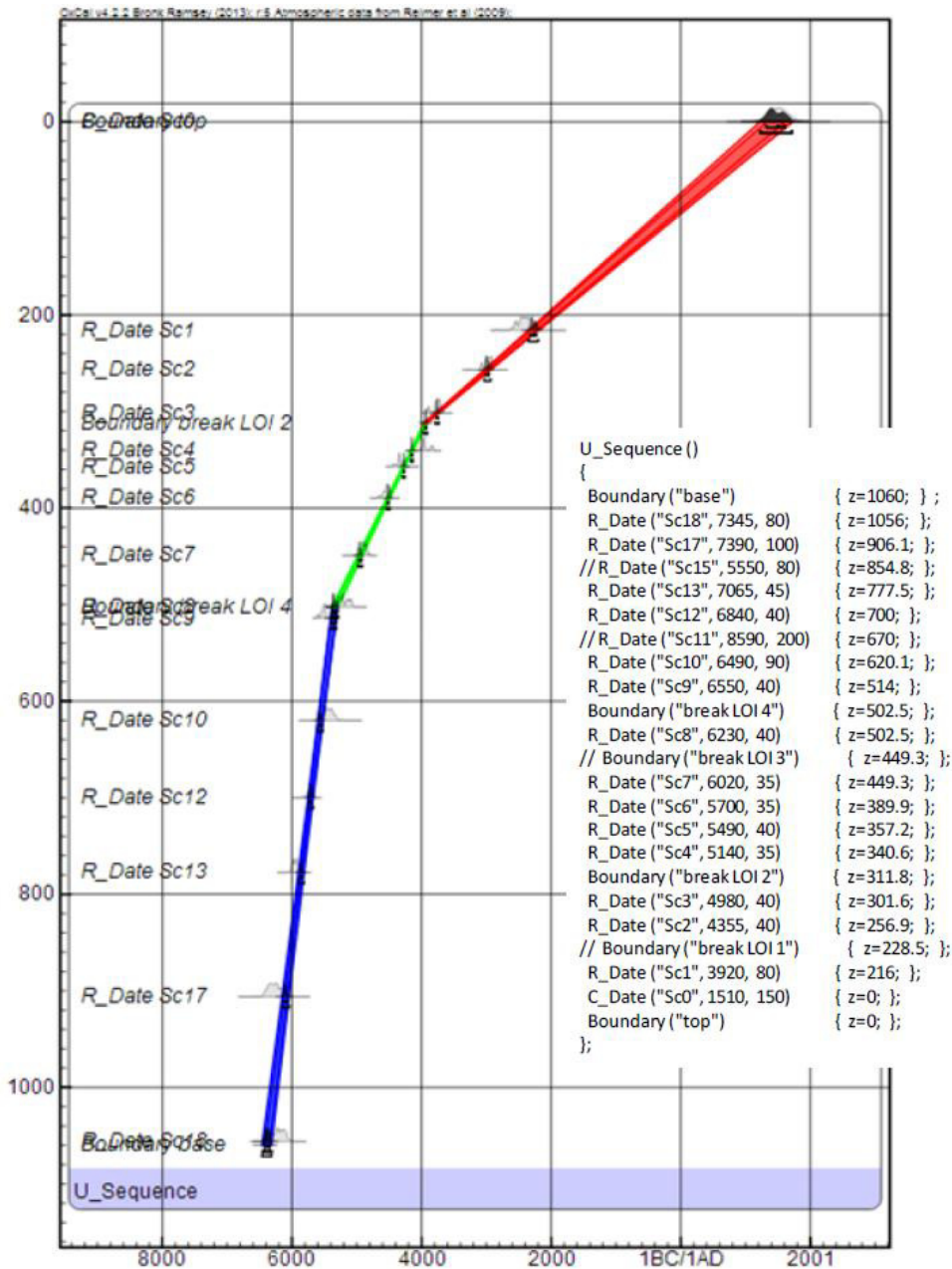


Figure Sc_4: Oxcal age-depth model of Schriek (Bronk Ramsey, 2009; Reimer et al., 2009).

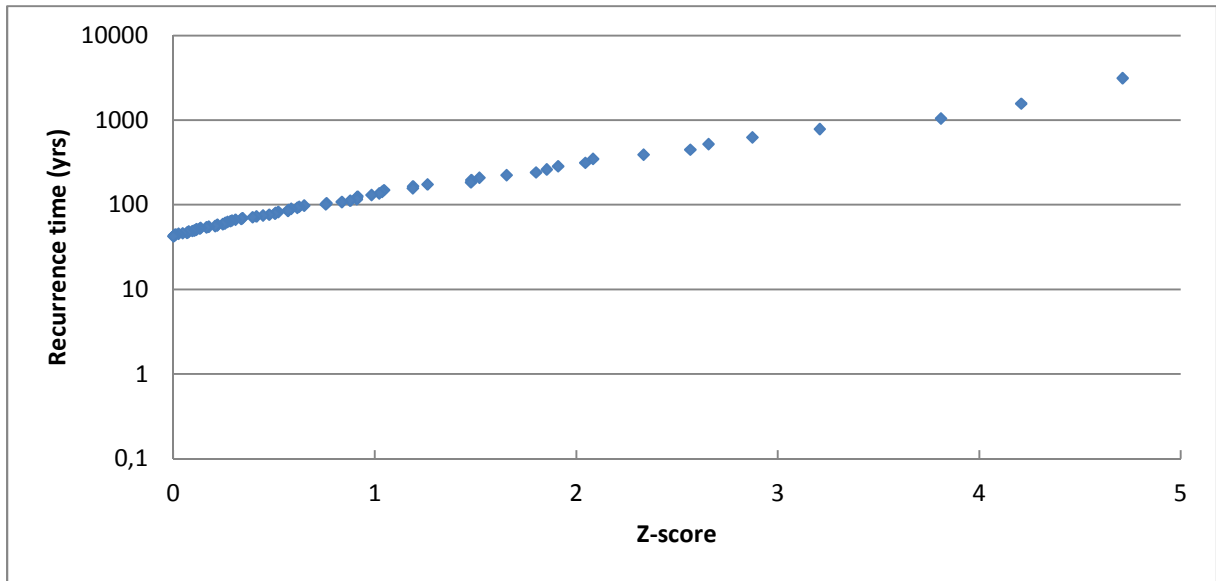


Figure Sc_5: Recurrence time versus Z-score plot.

Table Sc_3: Regression formula and determination coefficients for calculated recurrence time versus Z-scores. The regression formula have been used to assess the recurrence times of largest events.

Data	Regression formula	R ²
P90 Z>1	$t = 62.160e^{0.791x}$	0.99

References Supplementary Materials:

- Berendsen, H.J.A., Stouthamer, E., 2001. Palaeogeographic development of the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Van Gorcum, Assen, 268 pp.
- Braun, F.J., Thiermann, A., 1981. Erläuterungen zu Blatt 4103 Emmerich, Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000. Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld, 104 pp.
- Bronk Ramsey, C., 2009. Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon* 51, p 337-360.
- Cohen, K.M., Stouthamer, E., Hoek, W.Z., Berendsen, H.J.A., Kempen, H.F.J., 2009. Zand in banen: zanddiepte kaarten van het riviereengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel. Utrecht University and Provincie Gelderland, 130 pp.
- De Groot, L.V., Toonen, W.H.J., van der Meulen, B., Hoek, W.Z., Langereis, C., 2014. Holocene palaeomagnetic variability as recorded from fluvial deposits in the Netherlands. Submitted to *Geophysical Journal International*.
- De Molenaar, M.M., 2012. Reconstructing palaeoflood discharges of the river Rhine during the Early and Middle Holocene. Unpublished MSc-thesis, Utrecht University, 62 pp.
- Feijen, M., 2011. Beheerplan Amerongse Bovenpolder en Amerongse Bos 2011-2021. Stichting het Utrechtse landschap, The Netherlands.
- Hesselink, A.W., 2002. History makes a river; morphological changes and human interference in the river Rhine, The Netherlands. *Netherlands Geographical Studies* 292.
- Huisman, M., Bas, M., 2013. Late-Holocene flooding history of the river Rhine as recorded at Amerongen, The Netherlands. Unpublished MSc-thesis, VU University Amsterdam, 62 pp.
- Middelkoop, H., 1997. Embanked floodplains in the Netherlands. *Geomorphological evolution over various time scales. Netherlands Geographical Studies* 224, 341 pp.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S., Turney, C.S.M., van der Plicht, J., Weyhenmeyer, C.E., 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 51, p 1111-1150.
- Rijkswaterstaat-AGI, 2005. Actueel Hoogtebestand Nederland, revised edition. Rijkswaterstaat, Adviesdienst Geoinformatie en ICT, Delft.
- Taylor, W., 2000. Change-point analyser 2.0, Taylor Enterprises, Libertyville, Illinois.
- Teunissen, D., Teunissen-van Oorschot, H., de Man, R., 1987. Palynological investigations in Castellum Meinerswijk near Arnhem (the Netherlands). *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen C90*, p 211-229.
- Toonen, W.H.J., Winkels, T.G., Cohen, K.M., Prins, M.A., Middelkoop, H., 2014. Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450 years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using End-Member Modelling. Submitted to *Catena*.
- Van den Broeke, P.W., den Braven, J.A., Ball, E.A.G., 2010. Midden-Neolithic tot en met vroeg-Romeinse Tijd in het Zuiderveld; onderzoek van nederzettingssporen en graven te Nijmegen-Ressen. *Archeologische Berichten Nijmegen - rapport 15*, 230 pp.
- Van der Gaauw, P., 1989. Boor- en weerstandsonderzoek Castellum Meinerswijk. RAAP-rapport 41. RAAP Archaeologisch Adviesbureau, Amsterdam.
- Van Kempen, P.A.M.M., 2004. Voorterrein kasteel Amerongen, Gemeente Amerongen; Een inventariserend archaeologisch onderzoek. RAAP-rapport 1025. RAAP Archaeologisch Adviesbureau, Amsterdam.
- Willems, W., 1980. Castra Herculis, een Romeins castellum bij Arnhem. *Spiegel Historiae* 15, p 665-671.